

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบเคลื่อนย้ายได้



นายมนตรีมนัน ภูริวิศิษฎ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

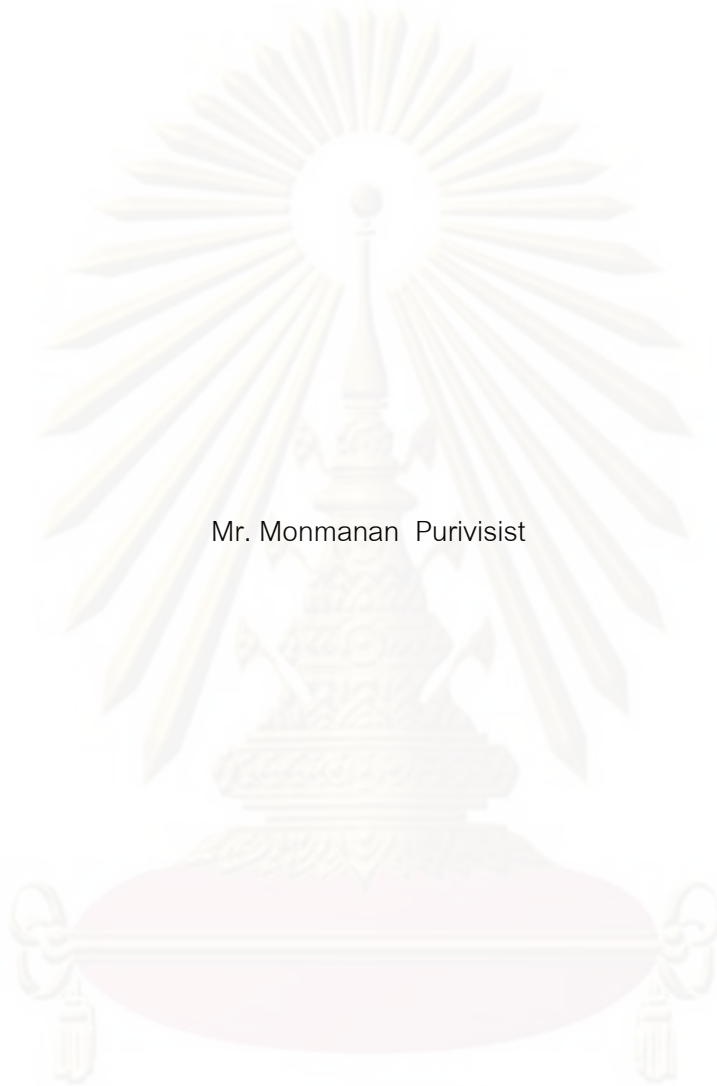
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A PORTABLE 3D COORDINATE MEASURING MACHINE



Mr. Monmanan Purivisist

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เครื่องวัดพิทัก 3 มิติ แบบเคลื่อนย้ายได้

โดย

นายมนตรีมนัน ภูริวิศิษฎ์

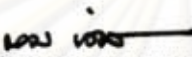
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

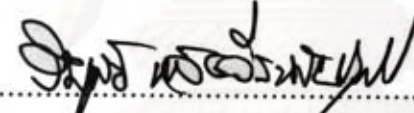
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

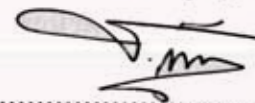
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

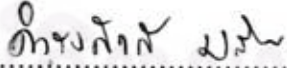

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนัทธวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ดี มลิตา)

ศูนย์วิจัยและพัฒนาเครื่องจักรกล
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มนตรีมันัน ภูวิวิศิษฐ์ : เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบเคลื่อนย้ายได้. (A PORTABLE 3D COORDINATE MEASURING MACHINE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 111 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เพื่อให้สามารถใช้งานเครื่องได้สะดวกและมีฟังก์ชันการทำงานมากยิ่งขึ้น โดยคงค่าความถูกต้องไว้ที่น้อยกว่า +/- 100 ไมโครเมตรเช่นเดิม รวมทั้งการหาวิธีการต่อจุดสำหรับการถอดแบบชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากจำเป็นต้องเคลื่อนย้ายตัวเครื่อง โดยจะมีการพัฒนาในหลายส่วนไม่ว่าจะเป็น การออกแบบหัวจับ ณ ตำแหน่งปลายของแขนกล เพื่อให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน การเลือกตัวถ่วงน้ำหนักที่เหมาะสมเพื่อช่วยผ่อนแรง เนื่องจากแขนของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม มีน้ำหนักค่อนข้างมาก การออกแบบตัวตั้งค่าเริ่มต้น (Home position) เพื่อให้มีความสะดวกในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นในกับตัวแขนกลและการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องตามที่กำหนดไว้ รวมทั้งส่วนของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่จะเพิ่มเติมในหลายๆฟังก์ชัน เพื่อที่จะสามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ซึ่งเครื่องวัดพิกัดนี้ ได้พัฒนาเพื่อใช้สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse Engineering) ไม่ได้มีเป้าหมายในการใช้งานสำหรับการตรวจสอบคุณภาพแต่อย่างใด ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ไม่สามารถหาได้โดยตรง จึงจะทำการหาด้วยระเบียบวิธีเชิงเลขโดยใช้การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) ด้วยการรู้ค่าตำแหน่งมุม ความยาวหัววัด โครงสร้างของสมการแบบเอกพันธ์ที่ใช้ในการหาค่าตำแหน่งพิกัด และตำแหน่งปลายหัววัดที่วัดเทียบกับเครื่องบราวน์ แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่รู้ค่า ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จะนำมาใช้ในการสร้างสมการแบบเอกพันธ์ของแขนกลที่ใช้ในการวัดพิกัด ข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่วัดได้สามารถเชื่อมโยงเข้ากับโปรแกรมแคดที่ใช้โดยทั่วไปในภาคอุตสาหกรรม (ตัวอย่างเช่น CATIA) ได้ โดยการจัดเรียงข้อมูลที่วัดได้ไว้ในรูปแบบกลาง แบบ CGO_ASCII สำหรับการต่อจุดจะใช้วิธีการกำหนดจุด 3 จุด เพื่อใช้สร้างเฟรมอ้างอิงในการเคลื่อนย้ายตัวเครื่องได้ โดยที่ตำแหน่งที่เครื่องวัดได้หลังจากย้ายตัวเครื่องจะมีตำแหน่งเทียบกับเฟรมที่ 0 ของเครื่องที่ไม่ได้ทำการย้าย

จากการทดลอง ได้ผลการทดสอบว่าเครื่องมีค่าความถูกต้องน้อยกว่า +/-100 ไมโครเมตร และได้โปรแกรมที่มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายและใช้งานได้จริงตามที่ได้ออกแบบไว้

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่อนิสิต มนต์ร์มันัน ภูวิวิศิษฐ์

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา.....2552.....

497 03408 21 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : 3D CMM / SIX JOINTS / REVERSE ENGINEERING

MONMANAN PURIVISIST : A PORTABLE 3D COORDINATE MEASURING MACHINE. THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROFESSOR VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 111 pp.

This Research is developing the CU-CMM for more convenient and more functions by maintain the accuracy not exceed about +/- 100 Micron including finding the method for scanning the huge part. The development including designing the probe, choosing the counterbalance, setting home position, calibrating and programming. The CU-CMM is used in the Reverse Engineering project. It doesn't use in the Quality Control project. The CU-CMM's parameters can not be measured with high precision. Thus the Nonlinear Regression is required by knowing the angle position, the probe length, the coordinate equation structure and tip points that compare with the points from Brown&Sharpe CMM. The approximate parameters are used in the coordinate equation. The measuring data can be imported to CAD program (for example, CATIA) by CGO_ASCII file. Using 3 reference points to set the reference frame for moving the CU-CMM. The CU-CMM's second location has the probe tip's coordinate reference with frame 0 of the CU-CMM's first location.

The summary is the CU-CMM has the accuracy not exceed about +/-100 Micron and has the program's functions that are various and can exactly usable.

Department : Mechanical Engineering
Field of Study : Mechanical Engineering
Academic Year : 2009

Student's Signature
Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำและเสนอแนะข้อคิดเห็นต่างๆ ที่มีประโยชน์ในการวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งขัดเกลาระบบความคิดให้สามารถทำการวิจัยลุล่วงได้ อย่างเป็นระบบ พร้อมทั้งจัดหาทุน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาให้โดยตลอด ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ คุณพรชัย เพชรฤกษ์กุล ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการสร้างชิ้นงาน และขอขอบคุณ เพื่อนนิสิตและรุ่นพี่ ทั้งในระดับปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้การวิจัยครั้งนี้ประสบความสำเร็จได้

สุดท้ายนี้ วิทยานิพนธ์และงานวิจัยนี้คงจะไม่มีทางประสบผลสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดกำลังใจที่พร้อมจะสนับสนุนจากบิดามารดาในทุกๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นทางด้านเงินทุน ข้อคิดเห็นต่างๆ และความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งที่มีให้แก่ผู้เขียนเสมอมา ในโอกาสนี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ สิ่งที่ได้ให้แก่ผู้เขียนจนสามารถสำเร็จการศึกษาลงได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ผลงานวิจัยเดิม.....	5
2.1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่มีอยู่ในเดิม.....	5
2.1.1 ข้อมูลโดยรวมของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	5
2.1.2 อุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	7
2.1.2.1 อุปกรณ์ตรวจรู้.....	7
2.1.2.2 ฮาร์ดโมนิคไดรว์.....	7
2.1.3 การตั้งแกนและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ.....	7
2.2 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มที่มีอยู่เดิม	9
2.2.1 การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์.....	9
2.2.2 โปรแกรมที่ใช้ในการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มที่มีอยู่เดิม.....	9
3. แนวคิดในการเลือกใช้ตัวถ่วงน้ำหนัก.....	12
3.1 ความสำคัญของตัวถ่วงน้ำหนัก.....	12
3.2 ประเภทของตัวถ่วงน้ำหนัก.....	13
3.2.1 ถ่วงน้ำหนักด้วยมวลก้อน.....	13

บทที่	หน้า
3.2.2 ใช้สปริงรั้ง.....	13
3.2.3 ใช้ตัวล็อก.....	14
3.2.4 ใช้สปริงชนิดแบบบิด (Torsion Spring).....	15
3.2.5 ใช้ลูกสูบอัดอากาศ.....	15
3.2.6 คลัตช์ไฟฟ้า.....	16
3.3 ตัวถ่วงน้ำหนักที่เลือกใช้.....	17
4.การพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	18
4.1 การออกแบบ.....	18
4.2 การตั้งแกนและจลศาสตร์ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	21
4.2.1 การตั้งแกน.....	21
4.2.2 จลศาสตร์ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	22
4.3 การตั้งตำแหน่งอ้างอิง (Home position).....	24
4.4 การสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	25
4.4.1 แนวคิดในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง.....	26
4.4.2 การนำวิธีการถอดแบบไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้หาพารามิเตอร์จริง.....	26
4.4.2.1 จำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า.....	27
4.4.2.2 ชิ้นงานสอบเทียบ.....	28
4.4.2.3 ขั้นตอนการสอบเทียบ.....	28
4.4.2.4 การถอดแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	29
4.4.2.5 การหาฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณในการถอดแบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	31
5.การพัฒนาโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	33
5.1 Encoder position.....	33
5.2 Probe tip position.....	33
5.3 Qualification.....	34
5.4 Alignments.....	34
5.5 Measurement.....	35
5.5.1 วัดจุด (Point)	35
5.5.2 วัดวงกลม (Circle)	35
5.5.3 วัดทรงกระบอก (Cylinder)	35
5.5.4 วัดทรงกลม (Sphere)	35

บทที่	หน้า
5.6 ระยะในระนาบ 2 มิติ (2D distances)	37
5.7 ระยะใน 3 มิติ (3D distances)	37
5.8 มุม (Angles)	37
5.9 สแกนชิ้นงาน (Scan Object)	38
5.10 การวัดชิ้นงานขนาดใหญ่ (Huge Project).....	38
6. วิธีและขั้นตอนในการใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	40
7. การทดลองและผลการทดลอง.....	48
7.1 การทดลองในการสอบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	48
7.2 การทดลองวัดตำแหน่งเพื่อหาค่าความถูกต้องของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	55
7.2.1 ชิ้นงานสอบเทียบ.....	55
7.2.2 ชิ้นงานขนาดเล็ก.....	56
7.2.3 ชิ้นงานขนาดใหญ่.....	58
7.3 การทดลองใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ในการวัดชิ้นงานตามฟังก์ชันของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม	59
7.3.1 ฟังก์ชันเครื่องมือวัด (Measurement).....	59
7.3.2 ฟังก์ชันวัดระยะในระนาบ 2 มิติ.....	64
7.3.3 ฟังก์ชันวัดระยะใน 3 มิติ.....	66
7.3.4 ฟังก์ชันวัดมุม.....	67
7.4 การทดลองใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ในการถอดแบบ.....	69
7.4.1 ตัวอย่างที่ 1.....	69
7.4.2 ตัวอย่างที่ 2.....	71
7.4.3 ตัวอย่างที่ 3.....	73
7.4.4 ตัวอย่างที่ 4.....	74
7.4.5 ตัวอย่างที่ 5.....	75
7.5 การทดลองใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าพื้นที่ทำงาน (Workspace).....	77
7.5.1 ตัวอย่างที่ 1.....	77
7.5.2 ตัวอย่างที่ 2.....	79
7.6 การทดลองเปรียบเทียบพื้นผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มกับพื้นผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดพื้นผิว 3 มิติ (3D Scan GOM).....	82

บทที่	หน้า
8.สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	85
8.1 สรุปผลวิทยานิพนธ์.....	85
8.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำการวิจัย.....	85
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายการอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก เครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มและเครื่อง GOM.....	91
ภาคผนวก ข การหาฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณ ด้วยฟังก์ชัน lsqcurvefit ของโปรแกรม แมทแล็บ.....	93
ภาคผนวก ค การคำนวณในส่วนของฟังก์ชัน Alignments.....	94
ภาคผนวก ง การคำนวณในส่วนของฟังก์ชัน Measurement.....	101
ภาคผนวก จ การคำนวณในส่วนของฟังก์ชัน 2D distance และ 3D distance	103
ภาคผนวก ฉ การคำนวณในส่วนของฟังก์ชัน Angles.....	104
ภาคผนวก ช การคำนวณการตั้งตำแหน่งอ้างอิงในส่วนของฟังก์ชัน Huge Project.....	105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าดีเอสพารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละข้อต่อของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	8
3.1	วิเคราะห์เปรียบเทียบตัวถ่วงน้ำหนักแต่ละประเภท.....	17
4.1	พารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hatenberg.....	22
7.1	ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 28 ตัว ที่ได้จากการสอบเทียบ.....	54
7.2	ระยะทางระหว่างสองตำแหน่งที่ทำการวัดด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มและค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อเทียบกับระยะระหว่างตำแหน่งที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม (มม.).....	55
7.3	ผลการทดลองวัดชิ้นงานขนาดเล็ก.....	57
7.4	ผลการทดลองวัดชิ้นงานขนาดใหญ่.....	59
7.5	รัศมีและความสูงของทรงกระบอกที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม.....	62
7.6	รัศมีทรงกลมที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม.....	64
7.7	ค่าระยะในระนาบ 2 มิติ ที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม.....	65
7.8	ค่าระยะในระบบ 3 มิติ ที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม.....	67
7.9	ค่ามุมที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม.....	68

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	ตัวอย่างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิต.....	2
2.1	เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	5
2.2	สัญลักษณ์ในการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ของข้อต่อที่ 2-5	6
2.3	การตั้งแกนพิกัดของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	8
2.4	หน้าต่างหลักของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	9
2.5	หน้าต่าง Encoder position ของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	10
2.6	หน้าต่างตำแหน่งปลายหัววัด ของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	11
3.1	บริเวณข้อต่อที่ 2 ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	12
3.2	ถ่วงน้ำหนักด้วยมวล.....	13
3.3	สปริงรั้ง.....	13
3.4	ตัวล็อก.....	14
3.5	สปริงดีด.....	15
3.6	ลูกสูบอัดอากาศ.....	15
3.7	คลัตช์ไฟฟ้า.....	16
4.1	ตัวแขนที่เชื่อมต่อระหว่าง ข้อต่อที่ 2 กับข้อต่อที่ 3 ที่ถูกลดความยาวลงไป.....	18
4.2	ตัวแขนที่เชื่อมต่อระหว่าง ข้อต่อที่ 4 กับข้อต่อที่ 5 ที่ถูกลดความยาวลงไป.....	18
4.3	ส่วนของข้อต่อที่ 6 ที่ได้มีการดัดแปลง.....	19
4.4	ส่วนของมือจับ ที่ได้มีการดัดแปลง.....	19
4.5	ปุ่มกดรับค่าที่ติดอยู่บนด้ามจับ.....	20
4.6	สปริงดีดที่สวมในแขนกล.....	20
4.7	เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่ได้มีการดัดแปลงแล้ว.....	21
4.8	การตั้งแกนของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	21
4.9	แท่นอ้างอิง.....	25
4.10	ปลายหัววัดสวมเข้ากับแท่นอ้างอิง.....	25
4.11	บราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม.....	27
4.12	ชิ้นงานสอบเทียบที่ได้จากการออกแบบ.....	28
4.13	แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต้นและตัวแปรตาม.....	31
5.1	หน้าต่างฟังก์ชัน Encoder position.....	33

ภาพที่		หน้า
5.2	หน้าต่างฟังก์ชัน Encoder position.....	34
5.3	หน้าต่างฟังก์ชัน Qualification.....	34
5.4	หน้าต่างฟังก์ชัน Alignments.....	35
5.5	หน้าต่างฟังก์ชัน Measurement.....	36
5.6	หน้าต่างฟังก์ชัน 2D distances.....	36
5.7	หน้าต่างฟังก์ชัน 3D distances.....	37
5.8	หน้าต่างฟังก์ชัน Angles.....	37
5.9	หน้าต่างฟังก์ชัน Scan Object.....	38
5.10	หน้าต่างฟังก์ชัน Scan Object.....	39
6.1	ขณะที่นำปลายหัววัดสวมเข้ากับแท่นอ้างอิง.....	40
6.2	ฟังก์ชันการสื่อสารและสถานการณ์สื่อสารจากโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	41
6.3	หน้าต่างแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์.....	41
6.4	หน้าต่างแสดงตำแหน่งของปลายหัววัด.....	42
6.5	หน้าต่างแสดงฟังก์ชัน Qualification.....	42
6.6	หน้าต่างแสดงฟังก์ชัน Set Obj. Origin.....	43
6.7	หน้าต่างแสดงฟังก์ชัน Huge Project.....	43
6.8	ชิ้นงานเป็นตัวอย่างในการใช้ฟังก์ชัน Huge Project.....	44
6.9	กำหนดจุดอ้างอิง.....	44
6.10	การใช้หัววัดแบบทรงกลม.....	45
6.11	กลุ่มก้อนของจุดที่วัดได้.....	46
6.12	ส่วนที่ใช้งานและไม่ได้ใช้งานของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	47
7.1	ชิ้นงานสอบเทียบตั้งบนฐานของเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม.....	48
7.2	ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นบนตัวชิ้นงานสอบเทียบ.....	49
7.3	การวางหัววัดบนปากหลุม.....	50
7.4	ชิ้นงานสอบเทียบบนฐานของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม.....	51
7.5	ตัวลูกน้ำที่ใช้ในการตั้งระดับชิ้นงาน.....	51
7.6	ระยะห่างโดยประมาณระหว่าง เฟรม 0 ของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม กับเฟรมอ้างอิงของ ชิ้นงาน.....	52
7.7	การระบุตำแหน่งบนชิ้นงานสอบเทียบ.....	53
7.8	ชิ้นงานขนาดเล็ก.....	56

ภาพที่		หน้า
7.9	รูปแบบการจับยึด 2 รูปแบบของชิ้นงานขนาดเล็ก.....	56
7.10	ตัวอย่างการวัดเก็บค่าจุดด้านละ 4 จุด.....	57
7.11	ระนาบที่สร้างจากจุดที่วัดได้ในโปรแกรมคาเทีย.....	57
7.12	ชิ้นงานขนาดใหญ่.....	58
7.13	รูปแบบการจับยึด 2 รูปแบบของชิ้นงานขนาดใหญ่.....	58
7.14	ชิ้นงานทรงกระบอก.....	59
7.15	ชิ้นงานทรงกลม.....	60
7.16	ส่วนของทรงกระบอกที่จะทำการทดลองวัด.....	61
7.17	การทดลองทำการวัดทรงกระบอก.....	61
7.18	การทดลองทำการวัดทรงกลม.....	63
7.19	ชิ้นงานสอบเทียบและตำแหน่งที่ใช้ในการทดลองวัดระยะในระนาบ 2 มิติ และ 3 มิติ.	65
7.20	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองวัดมุม.....	68
7.21	ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบตัวอย่างที่ 1.....	69
7.22	หัววัดแบบเข็มตัวอย่างที่ 1.....	70
7.23	กลุ่มก้อนของจุดตัวอย่างที่ 1.....	70
7.24	การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อนตัวอย่างที่ 1.....	71
7.25	ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบตัวอย่างที่ 2.....	71
7.26	กลุ่มก้อนของจุดตัวอย่างที่ 2.....	72
7.27	การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อนตัวอย่างที่ 2.....	72
7.28	ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบตัวอย่างที่ 3.....	73
7.29	กลุ่มก้อนของจุดตัวอย่างที่ 3.....	73
7.30	การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อนตัวอย่างที่ 3.....	74
7.31	ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบตัวอย่างที่ 4.....	74
7.32	กลุ่มก้อนของจุดตัวอย่างที่ 4.....	75
7.33	การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อนตัวอย่างที่ 4.....	75
7.34	ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบตัวอย่างที่ 5.....	76
7.35	กลุ่มก้อนของจุดตัวอย่างที่ 5.....	76
7.36	การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อนตัวอย่างที่ 5.....	77
7.37	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชัน Huge Project ตัวอย่างที่ 1.....	78
7.38	กำหนดจุดอ้างอิง ตัวอย่างที่ 1.....	78

ภาพที่		หน้า
7.39	การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 1.....	78
7.40	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชัน Huge Project ตัวอย่างที่ 2.....	79
7.41	การแบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วนและการติดจุดอ้างอิง 3 จุด ตัวอย่างที่ 2.....	79
7.42	การวัดพื้นผิวทั้งด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน ตัวอย่างที่ 2.....	80
7.43	กลุ่มก้อนของจุดที่วัดได้ ตัวอย่างที่ 2.....	81
7.44	การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 2.....	81
7.45	การเปรียบเทียบชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.1.....	82
7.46	การเปรียบเทียบชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.3.....	83
7.47	การเปรียบเทียบชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.4.....	83
7.48	การเปรียบเทียบชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.5.....	84
ก.1	บราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม.....	91
ก.2	เครื่อง GOM.....	92
ง.1	การหาจุดศูนย์กลางวงกลม.....	101
ช.1	แนวคิดการย้ายแกนเมื่อมีการเคลื่อนที่ตัวเครื่อง.....	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตการแข่งขันทางอุตสาหกรรมจะเน้นหนักทางด้านการพัฒนาคุณภาพและราคาของผลิตภัณฑ์ แต่ในปัจจุบันความเร็วในการผลิตก็เป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญมากในการแข่งขันเพื่อที่จะตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในงานออกแบบสินค้าใหม่ๆ ให้ตามยุคสมัยได้ทัน

ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ เมื่อนักออกแบบได้ทำการออกแบบจนได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว นักออกแบบจะต้องทำการเขียนแบบเพื่อนำไปใช้ในการผลิต ซึ่งในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้สูงและใช้เวลานาน เนื่องจากจะต้องทำการวัดขนาดจากผลิตภัณฑ์ต้นแบบซึ่งก็อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดจากการวัดได้ จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากการวัดไปเขียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบ หรือที่เรียกว่าโปรแกรมแคด (CAD) ซึ่งขั้นตอนในการเขียนก็มีความยุ่งยาก และต้องใช้ประสบการณ์ในการเขียนในระดับหนึ่ง ดังนั้นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ก็คือ ทำการวัดพิกัดต่างๆ ของงานต้นแบบด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แล้วจึงนำข้อมูลที่วัดได้นี้ส่งไปยังโปรแกรมแคด เพื่อทำการสร้างแบบ 3 มิติ บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถลดขั้นตอน และความผิดพลาดต่างๆ ลงได้มาก ทำให้ผู้ผลิตสามารถผลิตสินค้าได้รวดเร็วขึ้น และนอกจากความเร็วในการผลิตสินค้าแล้ว คุณภาพสินค้าก็เป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้ในการผลิตสินค้าให้ได้มาซึ่งคุณภาพตามที่ต้องการขั้นตอนที่ขาดเสียไม่ได้เลยก็คือขั้นตอนตรวจเช็คคุณภาพ (Quality control) ซึ่งสามารถทำได้รวดเร็วได้ด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติอีกเช่นกัน

จะเห็นได้ว่า เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ มีความสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตเป็นอย่างมาก แต่ตัวเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ โดยส่วนใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนย้ายโดยสะดวก จึงทำให้ถูกจำกัดขอบเขตการใช้งาน ไม่สามารถใช้ในการวัดชิ้นงานที่เคลื่อนย้ายไม่ได้ หรือไม่สะดวกในการวัดที่หน้างานทำให้ถูกลดความเร็วในการทำงานลงไป ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการศึกษาและออกแบบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ให้มีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น รวมถึงสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวกด้วย ซึ่งก็จะเป็นการทำให้อุตสาหกรรมพัฒนาก้าวหน้ามากยิ่งขึ้นด้วย



[1]

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิต

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 พัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่สามารถเคลื่อนย้ายเพื่อใช้งานในที่ต่างๆ ได้ และเพื่อให้สามารถใช้งานได้หลากหลายและสะดวกมากขึ้น

1.2.2 ออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยในการหาตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น (Home position) ให้กับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

1.2.3 คงค่าความถูกต้องของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ให้มีค่าน้อยกว่า ± 100 ไมโครเมตร

1.2.4 พัฒนาโปรแกรมการใช้งานเพื่อให้การใช้งานสามารถทำได้สะดวกและหลากหลายมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ปรับปรุงโครงสร้างของตัวแขนกลบางส่วนให้เหมาะสมกับการใช้งานกับมนุษย์ และสามารถเคลื่อนย้ายไปทำงานกับชิ้นงานได้ (ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่หรือไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้)

1.3.2 ออกแบบอุปกรณ์เพื่อช่วยในการหาตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น (Home position) ให้กับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

1.3.3 พัฒนาโปรแกรม/วิธีการ เพื่อให้การใช้งานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติที่มีความสะดวกและหลากหลายมากขึ้น รวมทั้งหาวิธีการที่จะวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่า Working space หรืองานที่จำเป็นต้องเคลื่อนย้ายอุปกรณ์วัด

1.3.4 ทำการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

1.3.5 ศึกษาเพื่อหาขอบเขตของการใช้งานที่มีค่าความถูกต้องของการวัดน้อยกว่า ± 100 ไมโครเมตร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่ใช้งานได้สะดวกขึ้น สามารถเคลื่อนย้ายติดตั้งใกล้กับชิ้นงานที่ต้องการจะวัด

1.4.2 ได้วิธีการและรูปแบบที่ช่วยให้การกำหนดตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) เพื่อให้การใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม สะดวกรวดเร็วขึ้น

1.4.3 ได้โปรแกรมต้นแบบเพื่อให้การใช้งานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติที่มีความสะดวกและสามารถใช้งานได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1.5.1 ศึกษาการทำงานและโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบต่างๆและซียู-ซีเอ็มเอ็ม เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนา เครื่อง ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ต่อไป

1.5.2 ศึกษากลไกและระบบทางกลต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบแก้ปัญหา เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม ให้สามารถใช้งานได้สะดวก แม่นยำ มากยิ่งขึ้น

1.5.3 ศึกษาการใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ Brown and Sharpe ซึ่งมีความละเอียดในการวัดถึง ± 3 ไมโครเมตร เพื่อนำมาสนับสนุนในการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยในการสอบเทียบเครื่องมือวัด

1.5.4 ศึกษาการตั้งตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) เพื่อใช้ในการออกแบบชุดอุปกรณ์ สำหรับช่วยในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้เครื่อง ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ได้สะดวกมากขึ้น

1.5.5 ศึกษาการแปลงจลศาสตร์ (Kinematics transformation) เพื่อใช้แปลงพิกัดจากระบบพิกัดแบบข้อต่อ (Joint coordinate) ไปยังระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate)

1.5.6 ศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลพิกัดเพื่อที่จะสามารถเชื่อมต่อเข้ากับโปรแกรมแคดแคม เช่น โปรแกรม คาเทีย (CATIA) เป็นต้น

1.5.7 ออกแบบ และ ดัดแปลงเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม

1.5.8 ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ร่วมกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ เพื่อใช้ในการวัดและเก็บข้อมูลพิกัด

1.5.9 พัฒนาโปรแกรมเพื่ออำนวยความสะดวก และเพิ่มความหลากหลายในการใช้งาน เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

1.5.10 ทำการทดลองเพื่อหาช่วงการทำงาน ที่มีความแม่นยำของการวัดน้อยกว่า ± 100
ไมโครเมตร

1.5.11 สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5.12 เขียนวิทยานิพนธ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ผลงานวิจัยเดิม

2.1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่มีอยู่เดิม

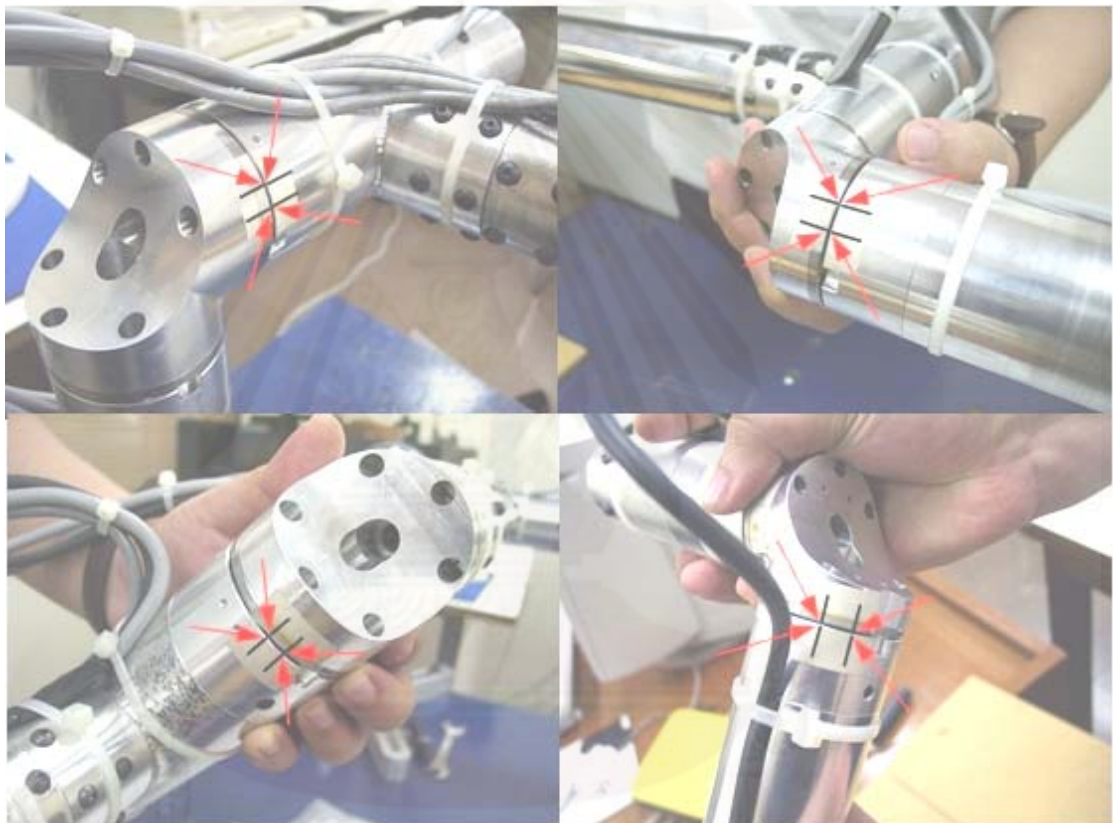
2.1.1 ข้อมูลโดยรวมของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม มีรูปร่างลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.1 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม [2]

เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเป็นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน ที่มีค่าความถูกต้องน้อยกว่า ± 100 ไมโครเมตร และมีขอบเขตการทำงาน $500 \times 500 \times 300$ ลูกบาศก์มิลลิเมตร เพื่อใช้ร่วมในกระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ (reverse engineering) ไม่ได้มีจุดประสงค์ในการตรวจสอบคุณภาพ (Quality Control) โดยอาศัยหลักการทางจลศาสตร์ ในการแปลงค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อของเครื่องวัดพิกัดไปเป็นค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดในระบบพิกัดฉาก ค่าตำแหน่งพิกัดที่ได้จะถูกเก็บอยู่ในรูปแบบมาตรฐานดังเช่นรูปแบบซีจีไอแอสกี (CGO_ASCII) ซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ในโปรแกรมแคด (CAD) ทั่วๆ ไปได้ ซึ่งเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน จะถูกควบคุมโดยมือของมนุษย์ ไม่สามารถถูกควบคุมให้เคลื่อนที่เองได้ เนื่องจากไม่มีมอเตอร์ขับเคลื่อนเฉพาะเอนโค้ดเดอร์สำหรับวัดค่าตำแหน่งที่ข้อต่อหมุนไปเท่านั้น

การตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ จะทำการตั้งโดยกำหนดสัญลักษณ์ให้กับแต่ละข้อต่อดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะเป็นการตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) ให้กับพิกัดแกนหมุน (Joint coordinate) ซึ่งการกำหนดสัญลักษณ์แบบนี้จะขาดความแม่นยำ ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าความเหลื่อมระหว่างตำแหน่งศูนย์ที่ตั้งขึ้นกับตำแหน่งศูนย์จริงตามจลศาสตร์ของแขนกล ด้วยการทำการถดถอยโดยอาศัยทรงกลมสอบเทียบเป็นตัวอ้างอิง ดังนั้นในการใช้งานเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม ทุกครั้งที่เปิดเครื่องขึ้นมาใหม่จะต้องทำการหาค่าความเหลื่อมเพื่อนำไปชดเชยค่าตำแหน่งมุมที่วัดได้ทุกครั้ง



รูปที่ 2.2 สัญลักษณ์ในการตั้งค่าศูนย์ให้กับเอนโค้ดเดอร์ของข้อต่อที่ 2-5 [2]

ค่าความถูกต้องของเครื่องซึ่งทดสอบโดยการวัดตำแหน่งพิกัดระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลม 2 จุด เปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มซึ่งมีค่าความถูกต้องถึง ± 10 ไมโครเมตร พบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีค่าสูงสุดน้อยกว่า ± 100 ไมโครเมตร

นอกจากการทดสอบเพื่อหาค่าความถูกต้องของเครื่องแล้ว ยังได้มีการทำการทดลองวัดพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างพร้อมทั้งนำผลการวัดที่ได้ไปสร้างเป็นพื้นผิวในโปรแกรมคาเทีย พบว่าเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกนนี้สามารถวัดพื้นผิวที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่าเครื่องวัดพิกัด

3 มิติแบบอื่นๆ (ประเภทของเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติ สามารถดูได้จาก [2]) ตัวอย่างเช่นเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติแบบที่ใช้แถบแสงเลเซอร์ในการวัด เนื่องจากมีองศาอิสระที่มากกว่า อีกทั้งยังไม่มีปัญหาที่เกิดจากคุณสมบัติการสะท้อนแสงและความชันของพื้นผิวชิ้นงานอีกด้วย แต่เนื่องจากเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกนนี้เป็นเครื่องวัดที่จะต้องทำการวัดที่ละเอียดจึงทำให้ต้องใช้เวลาในการวัดมากกว่าเครื่องวัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์มาก

อย่างไรก็ตามเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ยังต้องการการพัฒนาอีกมาก ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของน้ำหนักของตัวแขนกลซึ่งไม่สามารถยกได้ด้วยมือเดียว ทำให้เกิดความยากลำบากในการใช้งาน และการตั้งตำแหน่งเริ่มต้น (Home position) ก็มีความยุ่งยากเนื่องจากต้องทำการหาค่าความเหลื่อมทุกครั้ง อีกทั้งเรื่องของการปรับปรุงลักษณะของตัวเครื่องเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานกับมนุษย์ด้วย

2.1.2 อุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม

2.1.2.1 อุปกรณ์ตรวจรู้

ในเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ใช้ฮอปติคัลเอนโค้ดเดอร์ (optical encoder) ชนิด อินครีเมนทัล (incremental) ในการวัดค่าตำแหน่งมุม ณ ข้อต่อต่างๆ ซึ่งมีความละเอียดดังนี้

ข้อต่อที่ 1 – 4 มีค่าความละเอียด 10,000 PPR

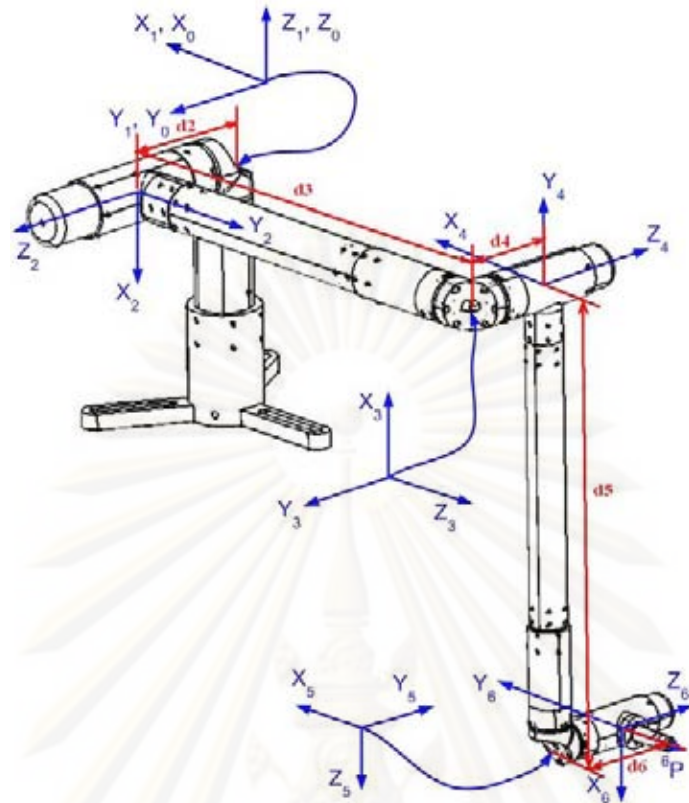
ข้อต่อที่ 5 – 6 มีค่าความละเอียด 1,024 PPR

2.1.2.2 ฮาร์โมนิคไดรฟ์

ซึ่งอุปกรณ์ตรวจรู้ยังมีความละเอียดไม่เพียงพอจึงต้องใช้ฮาร์โมนิคไดรฟ์ มาช่วยเพิ่มค่าความละเอียดและช่วยป้องกันการเกิดแบกแลช ซึ่งในเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ได้เลือกใช้ฮาร์โมนิคไดรฟ์ ที่มีอัตราทด 1:50 ทำให้ได้ค่าความละเอียดที่สูงขึ้นมากจนเพียงพอกับความต้องการ

2.1.3 การตั้งแกนและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

เครื่องวัดพิทช์ 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม มีการตั้งแกนดังรูปที่ 2.3 และ มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.3 การตั้งแกนพิกัดของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม [2]

ตารางที่ 2.1 ค่าดีเอชพารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละข้อต่อของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม [2]

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	$\frac{3\pi}{2}$	0	d_2	θ_2
3	$\frac{3\pi}{2}$	0	d_3	θ_3
4	$\frac{\pi}{2}$	0	d_4	θ_4
5	$\frac{\pi}{2}$	0	d_5	θ_5
6	$\frac{3\pi}{2}$	0	d_6	θ_6

2.2 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มเดิม

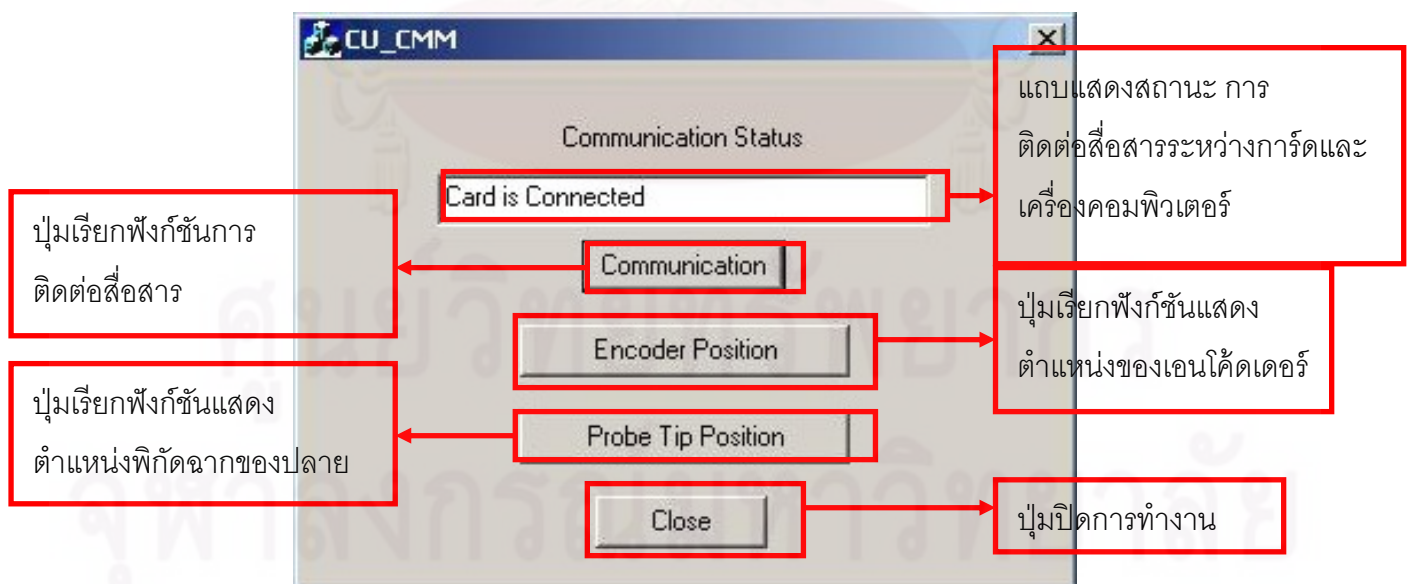
ในการที่จะทำการรับค่าจากอุปกรณ์การวัด ซึ่งในที่นี้คือ เอนโค้ดเดอร์ แล้วนำค่าที่ได้มาประมวลผลในคอมพิวเตอร์ จะต้องมีส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับค่าสัญญาณและตัวโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัดที่ได้สร้างขึ้น เพื่อให้เป็นไปตามที่ต้องการดังนี้

2.2.1 การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์

การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์จะทำหน้าที่ในการติดต่อรับสัญญาณขาออกที่ได้มาจากเอนโค้ดเดอร์ แล้วนำมาประมวลผลเพื่อหาทิศทาง การหมุน, ตำแหน่ง, ความเร็ว และเก็บข้อมูลของตัวเอนโค้ดเดอร์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณ “เอสพีไอทู พีซีไอ คอนโทรลเลอร์ (SPii PCI Controller)” ของบริษัท ACS-Tech80 ซึ่งนอกจากจะเป็นการ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์แล้ว ยังสามารถใช้เป็นการ์ดควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) และสเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) ได้อีกด้วย ซึ่งการใช้งานการ์ดเอสพีไอทู จะใช้ภาษาซีหรือวิซวลซี (Visual C) ในการเขียนโปรแกรมควบคุม

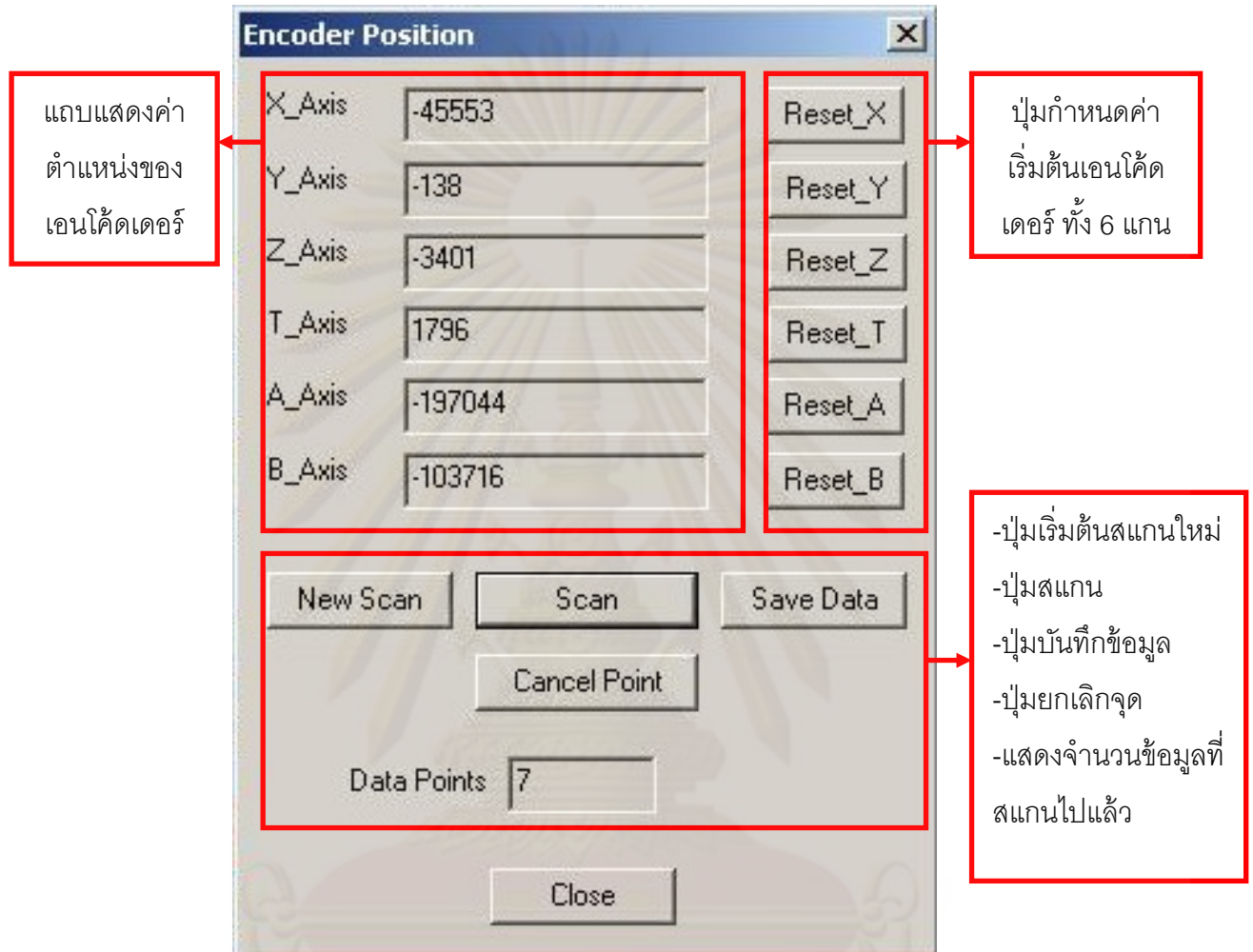
2.2.2 โปรแกรมที่ใช้ในการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มเดิม

โปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็มนี้ มีชื่อว่า โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม (CU_CMM) ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยมีพื้นฐานมาจากภาษาวิซวลซีพลัส พลัส (Visual C++) ลักษณะรูปแบบของโปรแกรมจะเป็นแบบไดอะล็อก (Dialog Base) ซึ่งมีการทำงานดังนี้

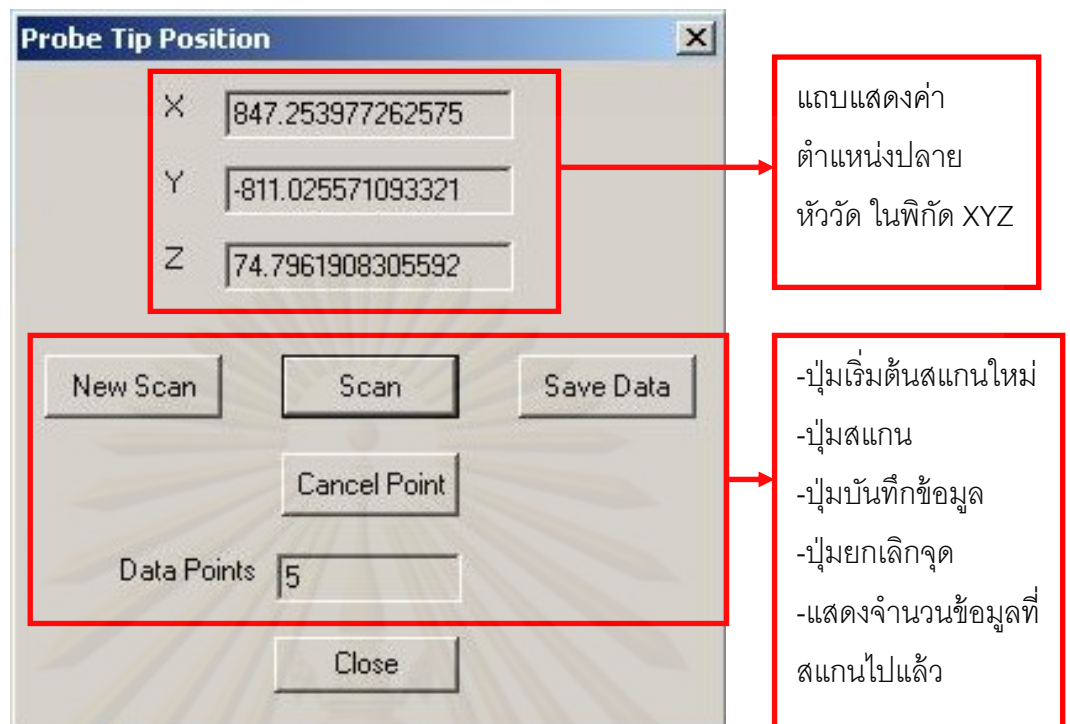


รูปที่ 2.4 หน้าต่างหลักของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม [2]

ส่วนของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่จะใช้ในการรับค่าตำแหน่งมืออยู่ 2 ส่วนด้วยกัน ซึ่งก็คือ ปุ่มเรียกฟังก์ชันแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ ดังรูปที่ 2.5 และปุ่มเรียกฟังก์ชันแสดงตำแหน่งพิกัดฉากของปลายหัววัดดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีหน้าตาต่างดังนี้



รูปที่ 2.5 หน้าต่าง Encoder position ของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม [2]



รูปที่ 2.6 หน้าต่างตำแหน่งปลายหัววัด ของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม [2]

ในส่วนเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มที่ได้กล่าวมานี้ เป็นเครื่องซีเอ็มเอ็มที่มีลักษณะเป็นแบบข้อต่อ 6 แกน เครื่องซีเอ็มเอ็มแบบอื่น ๆ นั้น สามารถดูได้จากวิทยานิพนธ์ของผู้ที่ได้ทำวิจัยคนก่อนได้เขียนไว้ใน [2]

บทที่ 3

แนวคิดในการเลือกใช้ตัวถ่วงน้ำหนัก

3.1 ความสำคัญของตัวถ่วงน้ำหนัก

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็มเดิม ตัวเครื่องจะมีน้ำหนักค่อนข้างมาก ผู้ใช้เครื่องจึงจะต้องออกแรงในการยกตัวแขนมากและไม่สามารถทำได้ด้วยมือเดียว ทำให้เกิดอาการล้าหรือยกแขนกลไม่ไหว จึงเป็นสาเหตุให้เกิดความลำบากในการใช้งาน และพบว่าบริเวณส่วนของข้อต่อที่ 2 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.1 จะเป็นส่วนที่รับน้ำหนักส่วนใหญ่ของตัวแขนกล ดังนั้นถ้าสามารถที่จะหาอุปกรณ์ที่สามารถช่วยในการชดเชยกับแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของตัวแขนกลได้ ก็จะทำให้การใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ทำได้สะดวกขึ้น ซึ่งอุปกรณ์ที่สามารถช่วยในปัญหานี้ได้เรียกว่า ตัวถ่วงน้ำหนัก



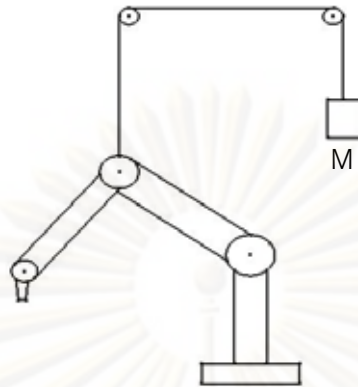
รูปที่ 3.1 บริเวณข้อต่อที่ 2 ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม [2]

ตัวถ่วงน้ำหนัก (counterbalance)

คือ อุปกรณ์ที่ช่วยในการปรับสภาพให้สิ่งที่เราต้องการจะถ่วงน้ำหนักอยู่ในสภาพสมดุล หรือ ช่วยในการผ่อนแรง ที่เกิดจากน้ำหนักของสิ่งที่เราต้องการจะถ่วงให้น้อยลง ทำให้สามารถใช้งานได้สะดวกขึ้น ซึ่งตัวถ่วงน้ำหนักจะมีอยู่หลายประเภทด้วยกัน ในที่นี้จะขอยกตัวถ่วงน้ำหนักบางประเภทที่ผู้ออกแบบได้คาดว่าจะนำมาใช้ในการออกแบบ

3.2 ประเภทของตัวถ่วงน้ำหนัก

3.2.1 ถ่วงน้ำหนักด้วยมวลก้อน



รูปที่ 3.2 ถ่วงน้ำหนักด้วยมวล

ข้อดี 1) ไม่ซับซ้อน

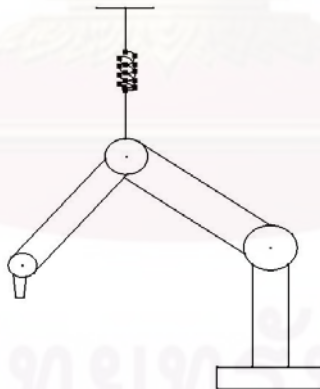
2) ใช้ความรู้เดิมก็ทำได้

ข้อเสีย 1) ลำบากในการทำ ต้องสร้างเพดานเพื่อยึดรอก

2) ยุ่งยากต่อการใช้งาน

3) เสียพื้นที่ในการทำงานไปหลายส่วน

3.2.2 ใช้สปริงรั้ง



รูปที่ 3.3 สปริงรั้ง

ข้อดี 1) ไม่ซับซ้อน

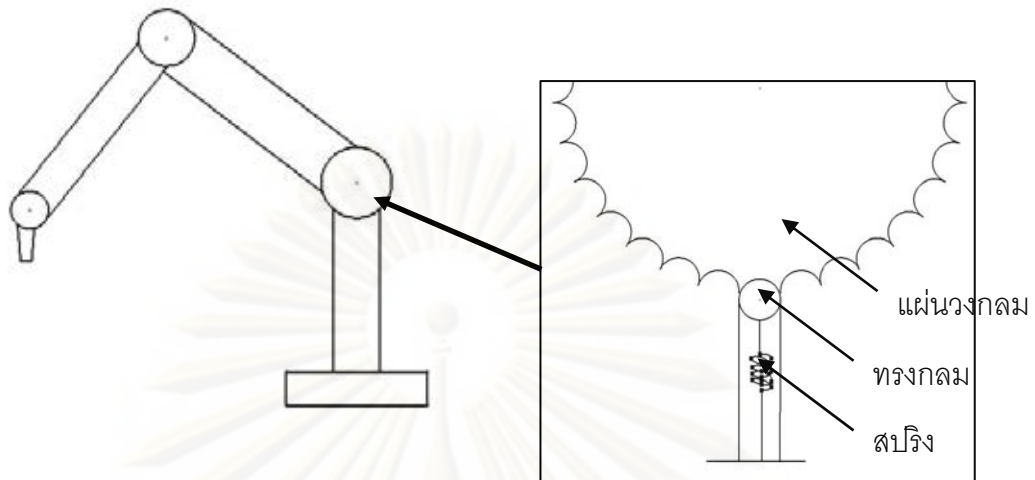
2) ใช้ความรู้เดิมก็ทำได้

ข้อเสีย 1) ลำบากในการทำ ต้องสร้างเพดานเพื่อยึดสปริง

2) ยุ่งยากต่อการใช้งาน

3) เสียพื้นที่ในการทำงานไปหลายส่วน

3.2.3 ใช้ตัวล๊อค



รูปที่ 3.4 ตัวล๊อค

ตัวล๊อคจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะติดอยู่ที่ข้อต่อที่ 2 ของตัวเครื่อง โดยจะเป็นแผ่นวงกลมที่บากเป็นร่องไว้ เพื่อให้ตัวทรงกลมทางด้านล่างซึ่งถูกสปริงดันอยู่ตลอดเวลาได้เข้าไปอยู่ในร่อง ซึ่งเป็นการล๊อคไปในตัว ในการทำงานแผ่นวงกลมจะหมุนตามข้อต่อที่ 2 ดังนั้นถ้าหยุดการเคลื่อนที่ของแขนกลเมื่อใด ตัวแขนกลก็จะสามารถค้างอยู่ในตำแหน่งที่ถูกล๊อคไว้ได้

ข้อดี 1) สามารถบังคับตัวแขนกลได้ โดยที่ตัวแขนจะไม่ตกตามแรงโน้มถ่วงของโลกถ้าปล่อยตัวแขน

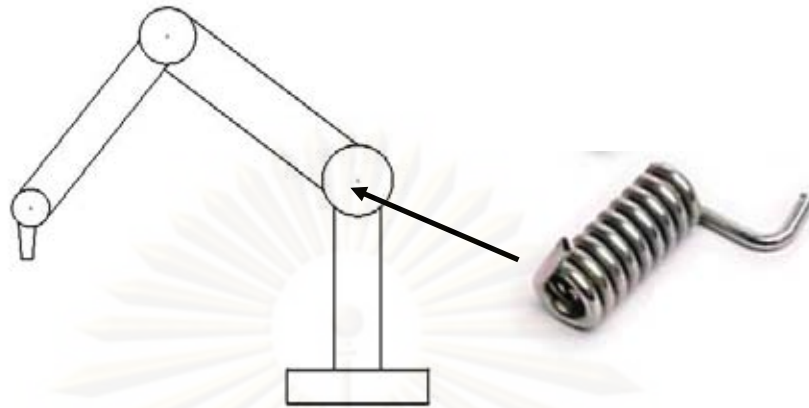
2) ตัวแขนสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระ ไม่สูญเสียพื้นที่ในการทำงาน

ข้อเสีย 1) ลำบากในการทำ ต้องดัดแปลงตัวเครื่อง

2) ไม่สามารถช่วยผ่อนแรงในขณะที่ใช้ได้

3) การวัดค่ามุมไม่ละเอียด เนื่องจากมีร่องบังคับ

3.2.4 ใช้สปริงชนิดแบบบิด (Torsion Spring)



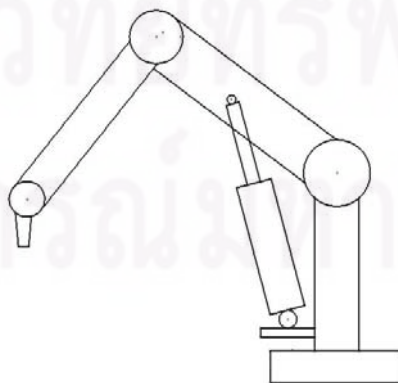
รูปที่ 3.5 สปริงชนิดแบบบิด

สปริงชนิดแบบบิด คือลวดสปริงที่ขดขึ้นรูป โดยที่ปลายทั้งสองข้าง จะมีขายึดเพื่อรับแรงบิด ซึ่งแรงบิดนี้จะขึ้นอยู่กับมุมองศาของขาสปริงชนิดแบบบิด เป็นสปริงที่ออกแบบมาเพื่อรับความเค้นดัด โดยหน้าที่ของสปริงชนิดแบบบิด จะใช้รับความเค้นดัดเพื่อใช้ในการส่งถ่ายกำลัง ซึ่งก็สามารถนำมาใช้เป็นตัวถ่วงน้ำหนักของแขนกลได้

- ข้อดี
- 1) สามารถต้านแรงที่เกิดจากน้ำหนักของแขนกลได้เป็นอย่างดี
 - 2) ทำได้ง่าย ราคาถูก
 - 3) ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องดัดแปลงตัวเครื่อง

- ข้อเสีย
- 1) ช่วยผ่อนแรงได้แค่ด้านเดียว
 - 2) เสียพื้นที่การทำงานไปบางส่วน

3.2.5 ใช้ลูกสูบอัดอากาศ



รูปที่ 3.6 ลูกสูบอัดอากาศ

ลูกสูบอัดอากาศ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ช่วยในการรับแรงที่กระทำกับลูกสูบ ซึ่งมีอยู่หลายประเภท เช่น รับแรง 2 ทาง หรือรับแรงทางเดียว เป็นต้น ซึ่งขนาดของลูกสูบก็ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่กระทำกับลูกสูบ ถ้าแรงที่กระทำมาก ขนาดของลูกสูบที่ต้องใช้ก็จะใหญ่ตามไปด้วย

- ข้อดี
- 1) มีความราบเรียบในการใช้
 - 2) สามารถต้านแรงที่เกิดจากน้ำหนักของแขนกลได้เป็นอย่างดี
- ข้อเสีย
- 1) ลำบากในการทำ ต้องดัดแปลงตัวเครื่อง
 - 2) เสียพื้นที่การทำงานไปบางส่วน
 - 3) มีขนาดใหญ่ ดูเทอะทะ
 - 4) มีความยุ่งยากในการเลือกใช้ เนื่องจากคำนวณได้ลำบาก

3.2.6 คลัตช์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 คลัตช์ไฟฟ้า [3]

คลัตช์ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วการหมุนระหว่างเพลาทั้งสองข้าง ให้มีความเร็วต่างกันได้ โดยอาศัยกระแสไฟฟ้าในการควบคุม ซึ่งอาจจะสั่งให้หยุดก็ได้ ดังนั้นจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้มาเป็นตัวถ่วงน้ำหนักได้เช่นกัน

- ข้อดี
- 1) มีความราบเรียบในการใช้
 - 2) สามารถต้านแรงที่เกิดจากน้ำหนักของแขนกลได้เป็นอย่างดี
 - 3) สามารถควบคุมขนาดของแรงได้ตามต้องการ
 - 4) ไม่สูญเสียพื้นที่ในการทำงาน
- ข้อเสีย
- 1) ลำบากในการทำ ต้องดัดแปลงตัวเครื่องอย่างมาก
 - 2) ราคาแพง
 - 3) ต้องสร้างระบบควบคุม

3.3 ตัวถ่วงน้ำหนักที่เลือกใช้

ตัวถ่วงน้ำหนักแต่ละประเภทที่ได้กล่าวมาแล้วก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ดังนั้นจะทำการเลือกโดยนำเอามาเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วิเคราะห์เปรียบเทียบตัวถ่วงน้ำหนักแต่ละประเภท

จุดที่นำมาวิเคราะห์	ถ่วงน้ำหนักดรัม	สปริงรั้ง	ตัวล๊อค	สปริงดีด	ลูกสูบอัดอากาศ	คลัตช์ไฟฟ้า
การศึกษาค้นคว้า	ง่าย	ง่าย	ปานกลาง	ปานกลาง	ยาก	ยาก
การสร้าง	ปานกลาง	ปานกลาง	ยาก	สั่งทำได้	สั่งทำได้	สั่งทำได้
การประกอบเข้ากับตัวเครื่อง	ปานกลาง	ปานกลาง	ยาก	ง่าย	ยาก	ยาก
การใช้งาน	เทอะทะ	เทอะทะ	สะดวก	สะดวก	เทอะทะ	สะดวก
การสูญเสียพื้นที่ในการทำงาน	มาก	มาก	ไม่เสีย	บางส่วน	บางส่วน	ไม่เสีย
ความสามารถในการต้านแรง	มาก	มาก	ไม่ได้	มาก	มาก	มาก
ต้องดัดแปลงตัวเครื่อง	เล็กน้อย	เล็กน้อย	มาก	เล็กน้อย	มาก	มาก
ต้องมีระบบควบคุม	ไม่ต้องมี	ไม่ต้องมี	ไม่ต้องมี	ไม่ต้องมี	ไม่ต้องมี	ต้องมี
ความรบกวนของการวัด	มาก	มาก	น้อย	มาก	มาก	มาก
ราคา	ถูก	ถูก	ปานกลาง	ถูก	แพง	แพงมาก

จากตารางที่ 3.1 ช่องที่เป็นแถบสีแสดงถึงตัวถ่วงน้ำหนักที่ดีที่สุดของแต่ละจุดที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสปริงดีดมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวถ่วงน้ำหนักได้ดีที่สุด ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกใช้สปริงดีดมาเป็นตัวถ่วงน้ำหนัก

สปริงดีด สามารถสั่งทำได้ง่ายตามร้านขายสปริงทั่วไป อีกทั้งยังมีราคาถูก ดังนั้นในการทำการทดลองก็สามารถที่จะทำการเลือกใช้แบบ trial and error ได้ ในการวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้สปริงดีดที่มี

1. ขนาดลวด $\phi 6.5$ mm
2. จำนวนรอบ $7\frac{3}{8}$ รอบ
3. ทำจากเหล็ก

ซึ่งจะมีแรงต้านน้ำหนักของแกนกลได้เหมาะสมที่สุด

บทที่ 4

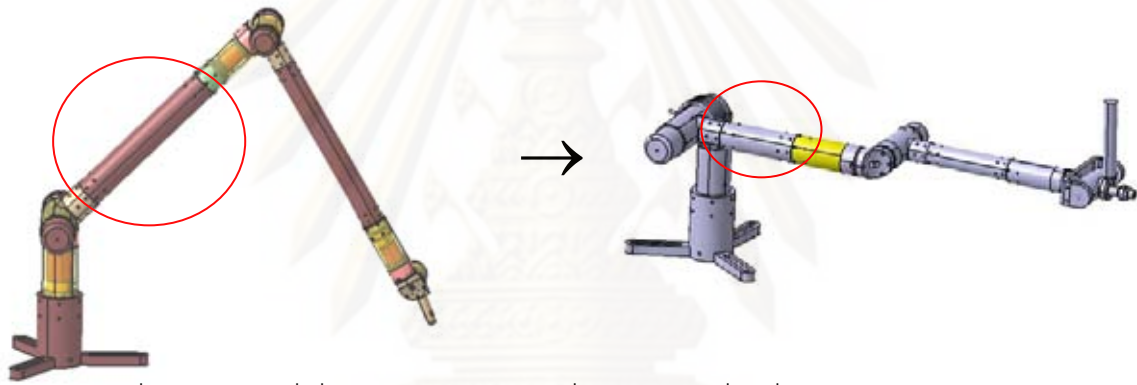
การพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

4.1 การออกแบบ

ในงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม ให้ใช้งานได้สะดวกมากขึ้น จึงได้มีการดัดแปลงในส่วนของแขนกลบางส่วน ดังนี้

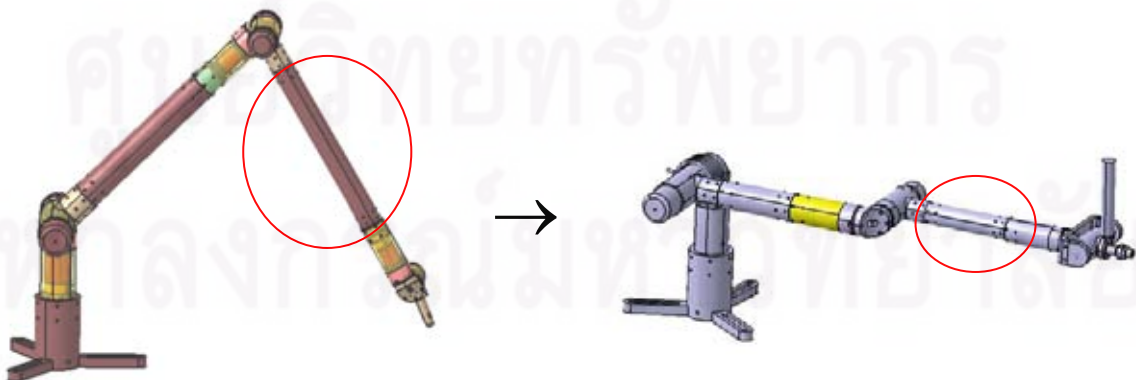
1) ลดความยาวของตัวแขนลง เพื่อให้เครื่องมีขนาดกะทัดรัดมากขึ้น ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น ซึ่งตัวแขนที่จะลดความยาวจะมีอยู่ 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 เป็นตัวแขนดังรูปที่ 4.1 โดยลดความยาวจาก 320 มิลลิเมตร เหลือ 160 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 ตัวแขนที่เชื่อมต่อระหว่าง ข้อต่อที่ 2 กับข้อต่อที่ 3 ที่ถูกลดความยาวลงไป

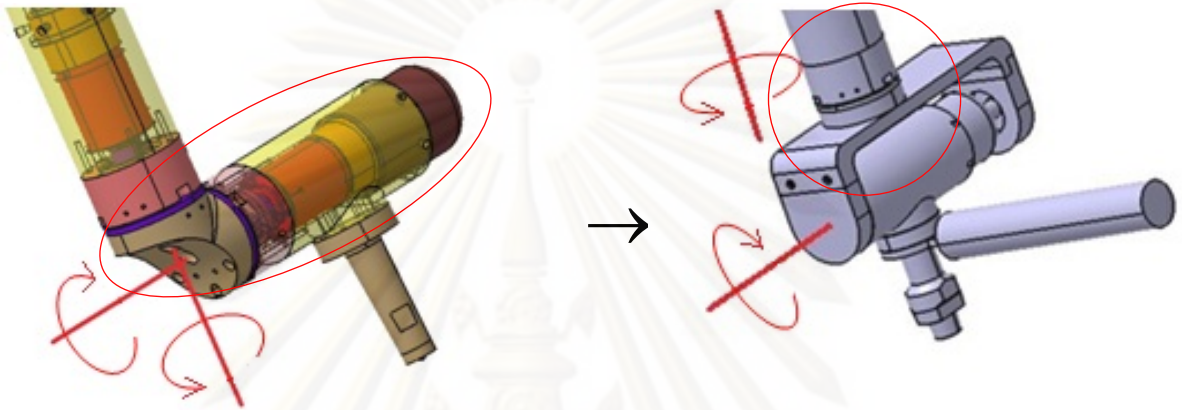
ส่วนที่ 2 เป็นตัวแขนดังรูปที่ 4.2 โดยลดความยาวจาก 360 มิลลิเมตร เหลือ 180 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.2 ตัวแขนที่เชื่อมต่อระหว่าง ข้อต่อที่ 4 กับข้อต่อที่ 5 ที่ถูกลดความยาวลงไป

2) ปรับปรุงในส่วนของข้อต่อที่ 6 ให้สะดวกต่อการจับมากยิ่งขึ้น ในส่วนนี้มีการดัดแปลงหลายจุดด้วยกันดังนี้

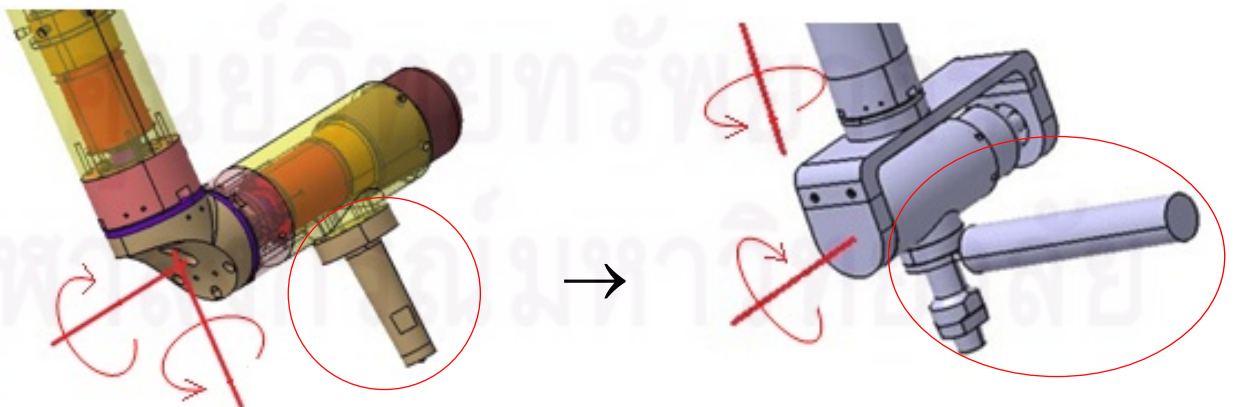
ส่วนที่ 1 ส่วนข้อต่อได้มีการดัดแปลงให้ต่อออกมาตรงๆ กล่าวคือ ไม่มีน้ำหนักถ่วงเนื่องจาก การวางตัวของตัวแขนกับการวางตัวของมือจับอยู่คนละแนวกัน ทำให้สามารถยกตัวแขนได้ด้วยมือเดียว โดยส่วนที่ถูกดัดแปลงจะมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4.3 ส่วนของข้อต่อที่ 6 ที่ได้มีการดัดแปลง

จากรูปจะเห็นได้ว่า ข้อต่อที่ 6 ได้ถูกดัดแปลง เพื่อให้ตัวแขนกับตัวมือจับมีการวางตัวในแนวเดียวกัน เพื่อให้การใช้งานเป็นไปได้สะดวกยิ่งขึ้นและช่วยลดค่าพารามิเตอร์บางตัวที่ไม่ทราบค่าออกไป ทำให้มีความง่ายในการสอบเทียบมากยิ่งขึ้น โดยออกแบบให้มีลักษณะเป็นก้ามปู ทำให้เป็นไปตามที่ต้องการได้

ส่วนที่ 2 ส่วนของมือจับ ถูกออกแบบให้มีด้ามจับ เพื่อความสะดวกในการจับถือ ซึ่งมีลักษณะดังรูป



รูปที่ 4.4 ส่วนของมือจับ ที่ได้มีการดัดแปลง

3) วางปุ่มกดบนมือจับ เพื่อรับค่าตำแหน่งในขณะที่ใช้งานอยู่ ซึ่งเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เดิม ไม่มีในส่วนของปุ่มกดอยู่ที่ตัวมือจับ ทำให้เกิดความไม่สะดวกในการกดรับค่าตำแหน่ง เนื่องจากต้องไปกดรับค่าตำแหน่งที่คอมพิวเตอร์ ซึ่งในส่วนของปุ่มกดมีการวาง ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ปุ่มกดรับค่าที่ติดอยู่บนด้ามจับ

4) สวมสปริงติด เพื่อช่วยในการรับน้ำหนักของแขนกล ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สปริงติดที่สวมในแขนกล

ดังนั้นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่ได้ถูกดัดแปลงแล้ว จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.7

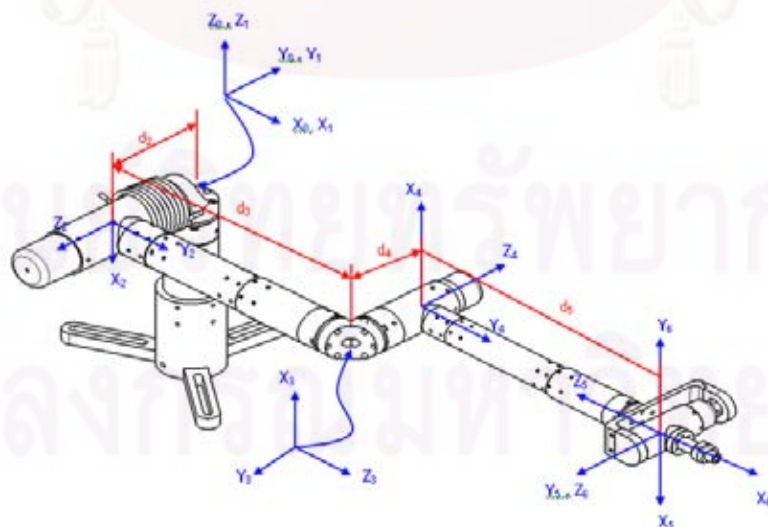


รูปที่ 4.7 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่ได้มีการดัดแปลงแล้ว

4.2 การตั้งแกนและจลศาสตร์ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

4.2.1 การตั้งแกน

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็มมีข้อต่อทั้ง 6 ข้อต่อ เป็นข้อต่อแบบหมุนซึ่งการตั้งแกนจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.8 และมีค่าพารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hatenberg แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.8 การตั้งแกนของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hatemberg

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	$\frac{\pi}{2}$	0	d_2	θ_2
3	$\frac{3\pi}{2}$	0	d_3	θ_3
4	$\frac{\pi}{2}$	0	d_4	θ_4
5	$\frac{\pi}{2}$	0	d_5	θ_5
6	$\frac{3\pi}{2}$	0	0	θ_6

การตั้งแกนโดยให้เฟรมที่ 5 และ เฟรมที่ 6 อยู่ที่จุดเดียวกัน มีจุดประสงค์เพื่อกำหนดให้ d_6 ซึ่งเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า มีค่าเป็น 0 ทำให้การคำนวณในส่วนของการสอบเทียบมีโอกาสได้ผลการประมาณดูง่ายขึ้น

4.2.2 จลศาสตร์ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เนื่องจากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เป็นเครื่องมือวัดที่ถูกควบคุมโดยมนุษย์โดยตรง ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมแบบป้อนกลับและไม่ต้องอาศัยมอเตอร์ในการควบคุม ซึ่งในการวัดจะใช้เพียงแค่เอนโค้ดเดอร์ในการวัดมุมเท่านั้น ดังนั้นในการพิจารณาเรื่องจลศาสตร์จะสนใจเฉพาะจลศาสตร์แบบไปข้างหน้า(Forward Kinematics) [4] เท่านั้น

จลศาสตร์แบบไปข้างหน้า เป็นสมการที่ใช้หาตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลเมื่อกำหนดตำแหน่งข้อต่อของแขนกล โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลกับค่ามุมต่างๆของข้อต่อ สามารถเขียนในรูปเมตริกการแปลง (Transformation Matrix) ซึ่งเมตริกการแปลงของปลายแขนกลหรือเฟรมที่ 6 กับ เฟรมที่ 0 จะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$$r_{11} = c_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] + s_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) \quad (4.2)$$

$$r_{12} = c_1[c_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] + s_1(c_4c_6 - s_4c_5s_6) \quad (4.3)$$

$$r_{13} = -c_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) - s_1s_4s_5 \quad (4.4)$$

$$r_{21} = s_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] - c_1(s_4c_5c_6 + c_4s_6) \quad (4.5)$$

$$r_{22} = s_1[c_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] - c_1(c_4c_6 - s_4c_5s_6) \quad (4.6)$$

$$r_{23} = -s_1(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5) + c_1s_4s_5 \quad (4.7)$$

$$r_{31} = -s_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - c_{23}s_5c_6 \quad (4.8)$$

$$r_{32} = -s_{23}(-c_4c_5s_6 - s_4c_6) - c_{23}s_5s_6 \quad (4.9)$$

$$r_{33} = s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5 \quad (4.10)$$

$$p_x = c_1[a_2c_2 + a_3c_{23} - d_4s_{23}] - d_3s_1 \quad (4.11)$$

$$p_y = s_1[a_2c_2 + a_3c_{23} - d_4s_{23}] + d_3c_1 \quad (4.12)$$

$$p_z = -a_3s_{23} - a_2s_2 - d_4c_{23} \quad (4.13)$$

โดยที่

p_x, p_y, p_z แทนตำแหน่งของปลายแขนที่อยู่ห่างจากเฟรมที่ 0 ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ เป็น เมตริกการหมุน (Rotation Matrix) ของปลายแขนกล เทียบกับเฟรมที่ 0

$$c_i = \cos \theta_i, s_i = \sin \theta_i$$

และ $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$

$$s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$$

ซึ่งในการหาเมตริกการแปลงของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม สามารถทำได้โดยการแทนค่า a, α, d และ θ ลงในสมการ 4.1 – 4.13

เวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายหัววัด

เป็นเวกเตอร์คองที่ซึ่งอ้างอิงจากระบบแกนสุดท้าย (เฟรมที่ 6) กำหนดให้เวกเตอร์นี้มีชื่อว่า 6P โดยจะเป็นเวกเตอร์ที่ชี้ตำแหน่งไปยังจุดปลายของหัววัด ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

$${}^6P = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

โดย x_p คือ ระยะในแกน X ของปลายหัววัดที่ห่างจากจุดกำเนิดของระบบแกนที่ 6

y_p คือ ระยะในแกน Y ของปลายหัววัดที่ห่างจากจุดกำเนิดของระบบแกนที่ 6

z_p คือ ระยะในแกน Z ของปลายหัววัดที่ห่างจากจุดกำเนิดของระบบแกนที่ 6

สมการที่ใช้หาตำแหน่งปลายหัววัด

จากเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งที่สร้างขึ้นสามารถนำมาสร้างสมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งของซียู-ซีเอ็มเอ็ม ได้ดังนี้

จากสมการที่ 4.1 จะได้ว่า

$${}^0P = {}^0T {}^6P \quad (4.15)$$

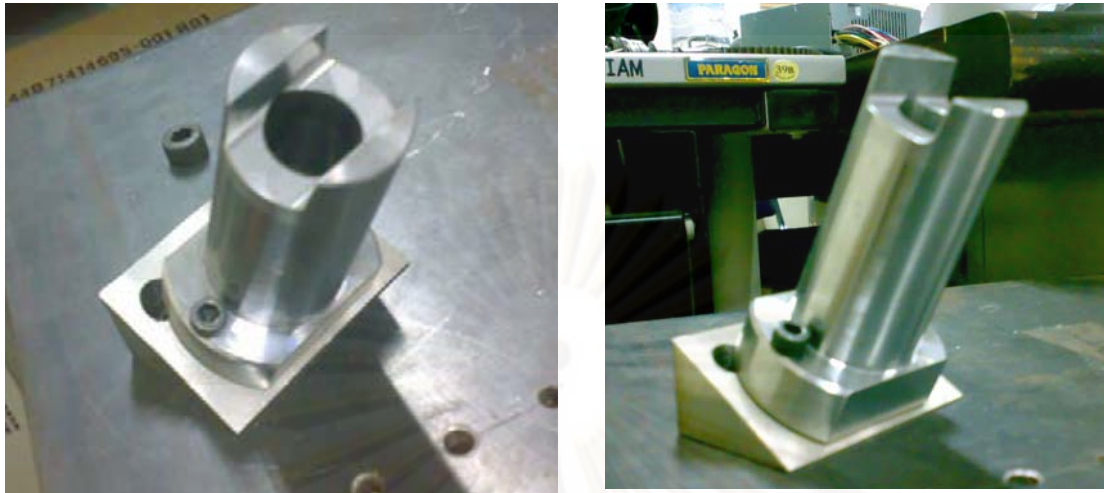
โดย 0P คือ เวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายหัววัดซึ่งอ้างอิงจากเฟรมที่ 0

ในสมการที่ 4.15 จะประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระคือ ค่ามุมของข้อต่อในแต่ละข้อต่อทั้ง 6 ซึ่งได้รวมอยู่ในเมตริกซ์การแปลง และจะมีเวกเตอร์ 0P เป็นตัวแปรตาม

4.3 การตั้งตำแหน่งอ้างอิง (Home position)

เครื่องวัดพิทัก 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มเดิม ยังขาดในเรื่องของความสะดวกในการตั้งตำแหน่งอ้างอิง ซึ่งมีการติดตั้งดังรูปที่ 2.2 โดยจะหมุนตัวแขนกลจนกระทั่งสัญลักษณ์รูปเส้นตรง 2 เส้นตรงกันแล้วทำการกดรีเซตค่ามุมของเอนโคเดอร์ โดยจะเข้าไปที่ละข้อต่อจนครบทั้ง 6 ข้อต่อ ซึ่งอาจจะเกิดความผิดพลาดจากสายตามนุษย์ได้ ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดในการที่จะทำให้การตั้งตำแหน่งอ้างอิงมีความสะดวกและเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น ดังนี้

ตำแหน่งอ้างอิง หมายถึง ตำแหน่งที่อุปกรณ์วัดจะอ่านค่าตำแหน่งเป็นศูนย์เพื่อที่จะกำหนดเป็นค่าเริ่มต้นให้กับเครื่อง (ซึ่งในการทำการวัดทุกครั้งควรจะต้องให้ตำแหน่งอ้างอิงอยู่ในตำแหน่งเดิมหรือใกล้เคียงกับตำแหน่งเดิมให้ได้มากที่สุด) และตำแหน่งต่อไปก็จะเป็นตำแหน่งที่เทียบเท่ากับตำแหน่งอ้างอิงนี้ ซึ่งเครื่องวัดพิทัก 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม จะมีแนวแกนหมุนทั้งหมด 6 แกน ซึ่งในแนวแกนหมุนแต่ละแกนได้ทำการติดตั้งเอนโคเดอร์ไว้ เพื่อใช้ในการวัดค่ามุม ซึ่งในการตั้งตำแหน่งอ้างอิง ได้ออกแบบและสร้างแท่นอ้างอิงขึ้นมาใหม่ เพื่อช่วยในการตั้งตำแหน่งอ้างอิง โดยนำปลายหัววัดมาสวมเข้ากับแท่นดังกล่าว เพื่อกำหนดให้ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งอ้างอิง โดยแท่นอ้างอิงดังกล่าวมีรูปร่างดังรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 แท่นอ้างอิง



รูปที่ 4.10 ปลายหัววัดสวมเข้ากับแท่นอ้างอิง

4.4 การสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เป็นเครื่องมือวัดที่วัดตำแหน่งจากการหมุนของแต่ละข้อต่อ แล้วใช้หลักการทางจลศาสตร์ แปลงค่าต่างๆมาเป็นตำแหน่งปลายหัววัดในระบบพิกัดฉากผ่านการคำนวณทางเมตริกการแปลง ซึ่งนอกจากความแม่นยำของเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการวัดแล้วยังต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการคำนวณด้วย โดยปกติแล้วค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะได้มาจากการเขียนแบบ (Drawing) ของแขนกล แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะสร้างตัวแขนกลให้มีขนาดพอดีกับที่กำหนดไว้ในแบบได้ ดังนั้นจึงต้องทำการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง

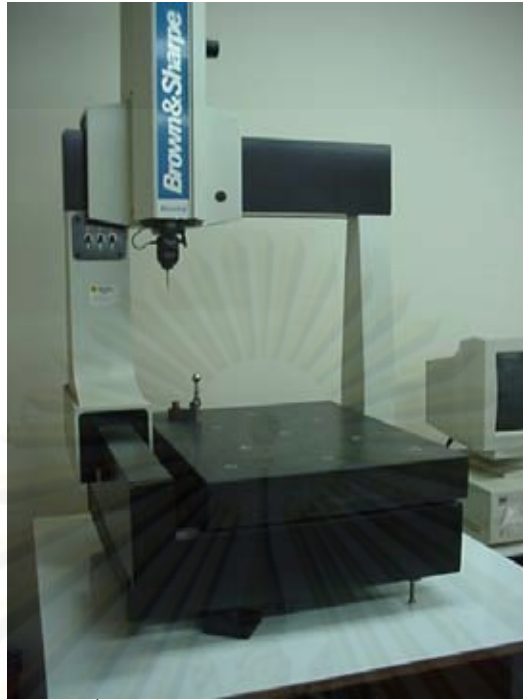
4.4.1 แนวคิดในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความยาวของตัวแขนกล ความยาวของหัววัด ไม่สามารถทำการวัดโดยตรงได้โดยง่าย เนื่องจากจะต้องนำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบเข้าด้วยกันเสียก่อน จึงจะนำมาวัด ซึ่งตัวเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม มีขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีลักษณะพิเศษที่ต้องมีทั้งความแม่นยำสูง และมีขอบเขตการทำงานที่ใหญ่เพียงพอที่จะใช้ในการวัดชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัดนี้ได้ ซึ่งในห้องปฏิบัติการของผู้ทำการวิจัย ไม่มีเครื่องมือวัดที่มีขอบเขตการทำงานเพียงพอ ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการวัดได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องใช้แนวทางอื่นในการหาแทน ซึ่งแนวทางหนึ่งที่ยุทธศาสตร์การวิจัยคนก่อนหน้า [2] ได้เสนอไว้ คือ การใช้ระเบียบวิธีการถดถอยแบบน้อยสุด (least square regression) โดยใช้แนวทางของวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) ซึ่งเป็นหลักการทางคณิตศาสตร์ ที่ผู้ทำการวิจัยมีความเห็นว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะใช้นำมาหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้

สำหรับเนื้อหา หลักการ และข้อบกพร่องของระเบียบวิธีการถดถอยแบบน้อยสุดโดยใช้แนวทางของวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression) สามารถหาอ่านได้จากวิทยานิพนธ์ของผู้ทำวิจัยคนก่อน [2] ได้ (หน้า 47-54) สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอยกเฉพาะสมการและหลักการ ที่จำเป็นต้องใช้ในการหาพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เท่านั้น

4.4.2 การนำวิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นมาใช้หาพารามิเตอร์จริง

ในการทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นจำเป็นต้องรู้ข้อมูลของระบบจริงซึ่งในที่นี้ก็คือค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัด ค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อที่สัมพันธ์กับค่าตำแหน่งพิกัดที่วัดได้ และต้องรู้อีกด้วยว่าในระบบจริงมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมดกี่ตัว เพื่อที่จะทราบได้ว่าจะต้องใช้ตำแหน่งอย่างน้อยกี่ตำแหน่งในการสอบเทียบ สำหรับค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อสามารถหาได้จากเอนโคเดอร์ที่ติดอยู่ในแต่ละข้อต่อได้ แต่ในส่วนของตำแหน่งของปลายหัววัด จำเป็นที่จะต้องอาศัยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบพิกัดฉากของทางห้องปฏิบัติการ ซึ่งก็คือ บรรวณ แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม (ภาคผนวก ก) ดังรูปที่ 4.11 เพื่อช่วยในการวัด



รูปที่ 4.11 บราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

ซึ่งในการวัดจะต้องมีชิ้นงานสอบเทียบ (Calibrated part) เพื่อใช้ในการสอบเทียบตำแหน่งที่วัดได้ของเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มและเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

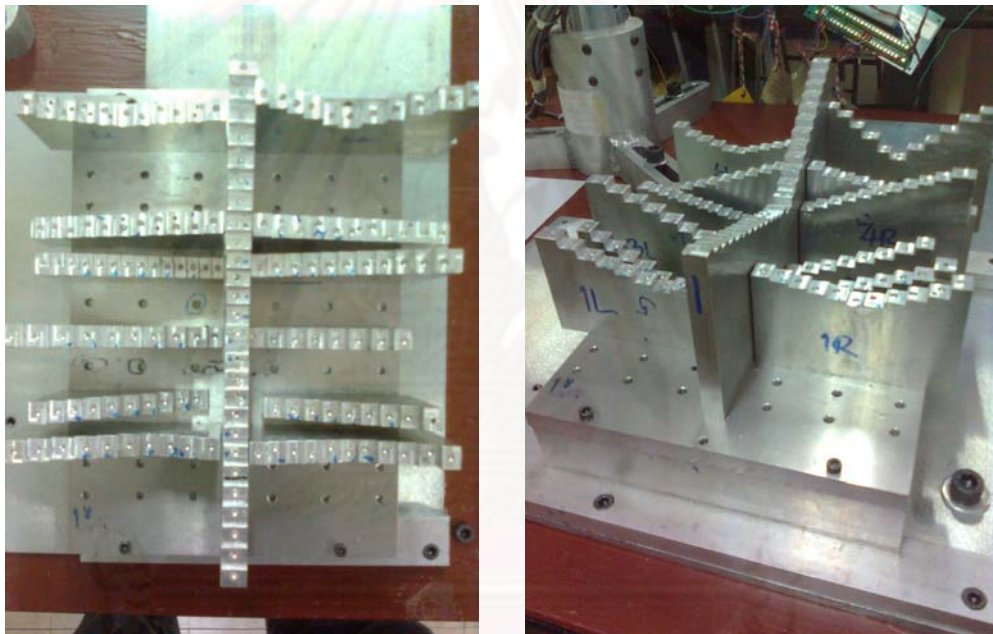
4.4.2.1 จำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

ในขั้นต้นจำเป็นที่จะต้องรู้ว่าระบบมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมดกี่ตัวเพื่อที่จะสามารถออกแบบชิ้นงานสอบเทียบให้มีจำนวนตำแหน่งที่จะทำการวัดได้เพียงพอ ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าทั้งหมด 28 ตัว โดยจะเป็นค่าพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงของซียู-ซีเอ็มเอ็ม 22 ตัว ได้แก่ $a_1, a_2, a_3, a_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, d_2, d_3, d_4, d_5, x_p, y_p, z_p, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ และ θ_6 โดยพารามิเตอร์ a_0, a_5, α_0, d_1 และ d_6 ไม่ได้รวมอยู่ด้วยเนื่องจากกำหนดให้เฟรมที่ 0 ซ้อนทับกับเฟรมที่ 1 และ เฟรมที่ 5 ซ้อนทับกับเฟรมที่ 6 ดังรูปที่ 4.7 ทำให้มีค่าเป็น 0 ทั้งหมด จึงไม่จำเป็นที่จะต้องนำไปทำการถอดหายเพื่อหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ อีก ส่วนค่าพารามิเตอร์อีก 6 ตัวที่เหลือจะเป็นค่าพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงที่ใช้ในการย้ายแกน (จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.4.2.3 ส่วนของการสอบเทียบกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม) ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์ของตัวเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม มี 6 ตัวคือ $\alpha, \beta, \gamma, x_{0Origin}, y_{0Origin}$ และ $z_{0Origin}$ ดังนั้นชิ้นงานสอบเทียบจะต้องมีตำแหน่งที่จะทำการวัดอย่างน้อย 28 ตำแหน่ง

4.4.2.2 ชิ้นงานสอบเทียบ

ชิ้นงานสอบเทียบจะต้องมีลักษณะดังนี้

1. มีรูปร่างกะทัดรัดไม่เทอะทะ
2. สะดวกต่อการวัดด้วยหัววัดทรงกลมหรือหัววัดแบบเข็ม (เนื่องจากหัววัดของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มที่มีอยู่ เป็นแบบหัวเข็มและหัวทรงกลม)
3. มีตำแหน่งที่จะทำการวัดกระจายเพียงพอกับพื้นที่ทำงาน (Workspace) ของเครื่อง ซึ่งมีพื้นที่ทำงาน 300x300x200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร
4. มีจำนวนตำแหน่งที่จะทำการวัดเพียงพอกับจำนวนของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจากการออกแบบตามลักษณะดังกล่าว ชิ้นงานสอบเทียบซึ่งเป็นของห้องปฏิบัติการที่มีผู้ทำไว้ก่อนหน้าแล้วสามารถใช้ได้ ซึ่งลักษณะดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ชิ้นงานสอบเทียบที่ได้จากการออกแบบ

ซึ่งชิ้นงานสอบเทียบจะมีลักษณะเป็นหลุมขนาด $\phi 4$ มิลลิเมตร เนื่องจากเมื่อนำหัววัดที่มีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดเดียวกันมาวางไว้บนหลุม จุดศูนย์กลางของวัดถูทรงกลมทั้งสองจะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน และมีลักษณะเป็นขั้นบันไดเพื่อเป็นการกระจายของตำแหน่งทั้งในแนวแกน x, y และ z

4.4.2.3 ขั้นตอนการสอบเทียบ

ในการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ

1. การวัดชิ้นงานสอบเทียบด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม เพื่อที่จะหาตำแหน่งที่กำหนดไว้ในชิ้นงานสอบเทียบ แล้วจึงจะนำไปเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มต่อไป ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจจะทำเพียงแค่ครั้งเดียวแล้วเก็บข้อมูลค่าตำแหน่งไว้ใช้

ในการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มในครั้งต่อไปได้ โดยในส่วนนี้มีขั้นตอนการสอบเทียบดังนี้

- (1) นำชิ้นงานสอบเทียบตั้งบนฐานของเครื่องบราวน์แอนด์ซาร์ปซีเอ็มเอ็ม
- (2) กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้กับตัวชิ้นงานสอบเทียบ
- (3) ทำการวัดตำแหน่งของหลุมซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมโดยการวางหัววัดทรงกลมลงบนปากหลุม
- (4) เก็บค่าตำแหน่งที่วัดได้ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป
- (5) ทำซ้ำข้อ (3) และ (4) เพื่อเก็บค่าตำแหน่งของหลุมอื่นๆจนครบทั้งหมด

2. การสอบเทียบกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

หลังจากที่ทำการเก็บค่าตำแหน่งจากเครื่องบราวน์แอนด์ซาร์ปซีเอ็มเอ็มแล้ว ค่าตำแหน่งดังกล่าวจะนำมาใช้สอบเทียบกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยมีขั้นตอนการสอบเทียบดังนี้

- (1) นำชิ้นงานสอบเทียบตั้งบนฐานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม
- (2) ตั้งเฟรมใหม่โดยกำหนดให้ในตอนเริ่มต้นและตำแหน่งของแกนให้อยู่ที่จุดเดียวกับจุดเริ่มต้นของชิ้นงานสอบเทียบที่ตั้งไว้ในขั้นตอนของเครื่องบราวน์แอนด์ซาร์ปซีเอ็มเอ็ม ซึ่งในส่วนนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์ของตัวเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงทำให้เกิดพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าขึ้นอีก 6 ตัว คือ ตำแหน่งการหมุน α, β และ γ และจุดกำเนิดของเฟรมใหม่ $x_{0Origin}, y_{0Origin}$ และ $z_{0Origin}$
- (3) วัดระยะห่างโดยประมาณระหว่างเฟรมที่ 0 กับ ตำแหน่งเริ่มต้นของชิ้นงานสอบเทียบ
- (4) วัดตำแหน่งของหลุมโดยเอาปลายหัววัดทรงกลม วางไว้บนปากหลุม แล้วกดบันทึก
- (5) เก็บค่าตำแหน่งที่วัดได้ทั้งหมด
- (6) นำข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดมาทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ตามที่ต้องการ

วิธีการทำการสอบเทียบโดยละเอียดและผลจากการสอบเทียบจะขอกกล่าวไว้ในบทที่ 7.1

4.4.2.4 การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น

เมื่อได้ข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดแล้ว จากนั้นจะนำข้อมูลดังกล่าวมาทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งโปรแกรมแมทแลป (Matlab) มีฟังก์ชันที่สามารถทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ฟังก์ชันดังกล่าวคือ ฟังก์ชัน lsqcurvefit ฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันสำหรับแก้ปัญหาอนลิเนียร์เคิร์ฟฟิตติง (nonlinear curve-fitting) โดยใช้การถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดดังในสมการ

$$\min_x \frac{1}{2} \|F(x, xdata) - ydata\|_2^2 = \frac{1}{2} \sum_i (F(x, xdata_i) - ydata_i)^2 \quad (4.16)$$

ฟังก์ชัน lsqcurvefit จะรับค่าตัวแปรต้น ($xdata$) และค่าตัวแปรตามที่ได้จากระบบจริง ($ydata$) เป็นค่าอินพุต (input) ของฟังก์ชัน แล้วจึงจะหาค่าพารามิเตอร์ x ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ภายในฟังก์ชัน F ที่ทำให้สมการที่ 4.16 เป็นจริง

ในการเรียกใช้งานฟังก์ชัน lsqcurvefit จะต้องการพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

$x = \text{lsqcurvefit}(\text{fun}, x0, xdata, ydata, lb, ub, \text{options})$

$[x, \text{resnorm}, \text{residual}, \text{exitflag}, \text{output}, \text{lambdajacobian}] = \text{lsqcurvefit}(\dots)$

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

residual เป็นค่าความผิดพลาดระหว่างค่าของฟังก์ชันกับค่าที่ได้จากการวัด
เมื่อฟังก์ชัน F มี x เป็นสัมประสิทธิ์

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

exitflag จะเก็บค่าที่อธิบายสาเหตุของการสิ้นสุดของการทำการทดลอง โดยถ้าหากค่าที่ได้มากกว่า 0 ก็แสดงว่าคำตอบที่ได้ลู่เข้า แต่ถ้าหากค่าที่ได้น้อยกว่า 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 และ ub เป็นขีดจำกัดล่าง และบนของสัมประสิทธิ์ x ที่ต้องการหา

options จะเป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และอัลกอริทึมที่ใช้ในการทำการทดลอง

อัลกอริทึมที่ฟังก์ชัน lsqcurvefit ใช้ สามารถที่จะเลือกใช้ได้โดยการตั้งอัลกอริทึมที่ต้องการเก็บไว้ในพารามิเตอร์ options ซึ่งจะมีอัลกอริทึมหลักๆ คือ

1. ลาร์จสเกลออปติไมซ์เซชัน (Large-Scale Optimization) เป็นอัลกอริทึมมาตรฐานของฟังก์ชันซึ่งจะใช้วิธีซัพสเปซทรัสต์รีเจียน (subspace trust region method) และตั้งอยู่บนพื้นฐานของวิธีอินทีเรียฟิเรคทีฟนิวตัน (interior-reflective Newton) [5] และ [6]

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

เนื่องจากข้อมูลที่วัดได้จากหัวข้อ 4.4.2.3 จะมีอยู่ 2 ส่วนก็คือ

(1) ตำแหน่งที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม ซึ่งก็คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางทรงกลมของปลายหัววัดทรงกลม

(2) ตำแหน่งที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัก 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ซึ่งก็คือ ตำแหน่งการหมุนของแต่ละข้อต่อซึ่งวัดได้จากเอนโค้ดเดอร์

ดังนั้น

อินพุต (input) ของระบบนี้มีตัวแปรต้น (xdata) ทั้งหมด 6 ตัว คือ ค่ามุมทั้ง 6 ข้อต่อที่หาได้จากการวัดในส่วนที่ (2) และตัวแปรตาม (ydata) ทั้งหมด 3 ตัว คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของหลุมที่หาได้จากการวัดในส่วนที่ (1)

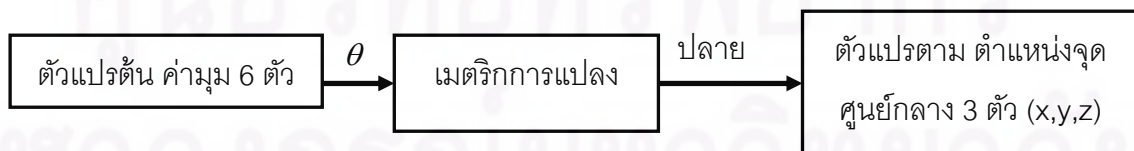
เอาต์พุต (output) คือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (x) ทั้ง 28 ตัว ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4.2.1 นั้นเอง

ค่าเริ่มต้น (x0) ที่ใช้ในการทำซ้ำ

ฟังก์ชัน (fun) ที่ใช้ในการคำนวณจะขอกว่าในหัวข้อถัดไป

4.4.2.5 การหาฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณในการทำการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น

ฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณสามารถหาได้โดยการไล่ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามแผนภาพดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

ดังนั้นฟังก์ชันที่ใช้คำนวณ คือ สมการของเมตริกการแปลง ซึ่งวิธีการหาฟังก์ชันโดยละเอียด สามารถดูได้ในภาคผนวก ข

เมื่อได้ฟังก์ชันที่ใช้คำนวณ ค่าเริ่มต้น อินพุต และเอาต์พุต ก็สามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าได้ ผ่านทางฟังก์ชัน lsqcurvefit ของโปรแกรมแมทแล็บ ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.4.2.4



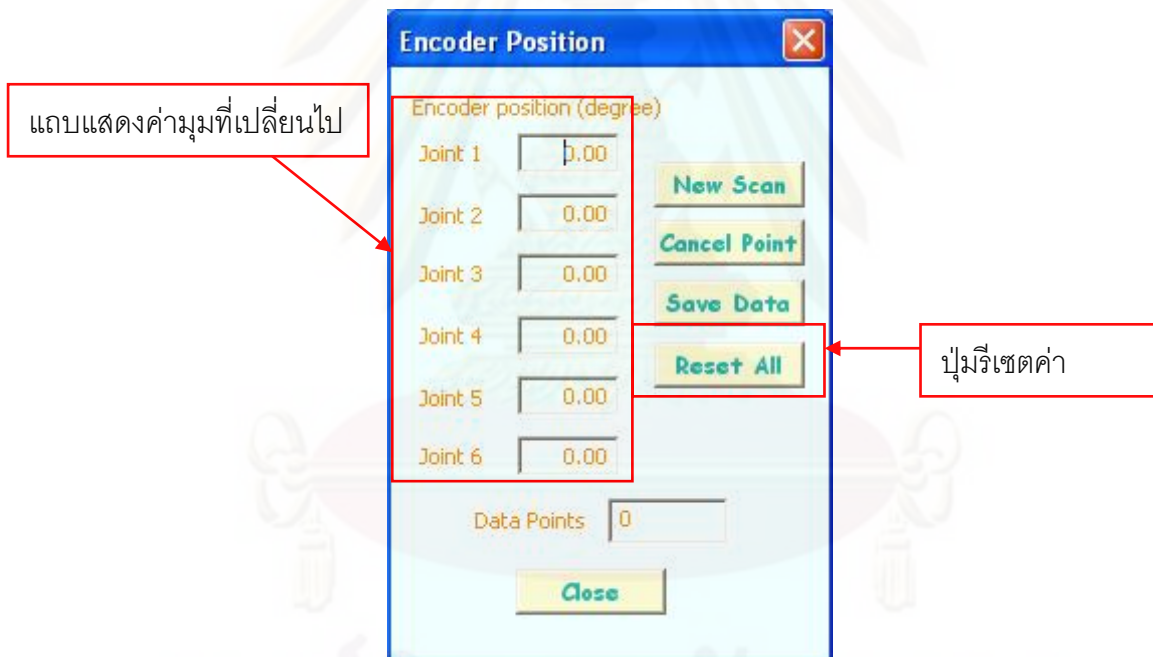
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การพัฒนาโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม

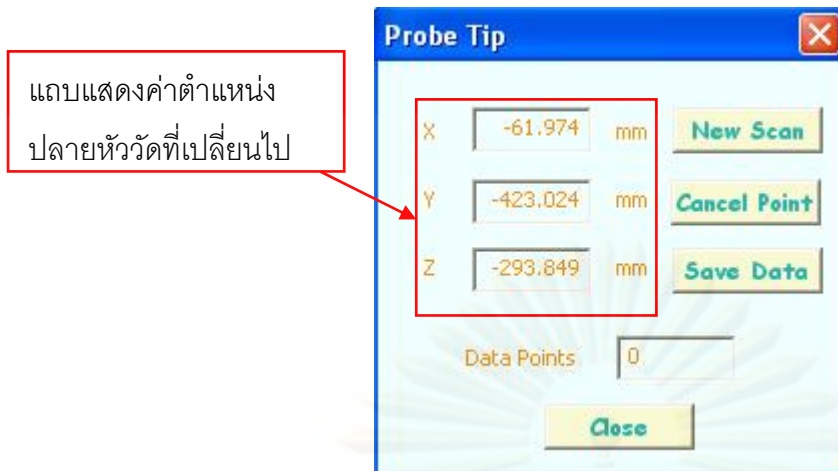
จากหัวข้อที่ 2.2.2 จะเห็นว่าโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม เดิม ทำได้เพียงแค่รับค่าที่ได้จากเอนโค้ดเดอร์ ทั้ง 6 แกน แล้วทำการแสดงค่าตำแหน่งปลายหัววัดในพิกัด XYZ และก็เก็บค่าได้เท่านั้น ยังไม่มีส่วนของฟังก์ชันการทำงาน เพื่อให้มีความสะดวกในการใช้งานมากขึ้น ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม ให้มีส่วนของฟังก์ชันการทำงานให้มีความหลากหลายในการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยจะเพิ่มเติมฟังก์ชัน ดังนี้

5.1 Encoder position ใช้ในการแสดงค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไป และแสดงการตั้งค่าเริ่มต้น (home position) ให้กับเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยมีหน้าต่างดังรูปที่ 5.1



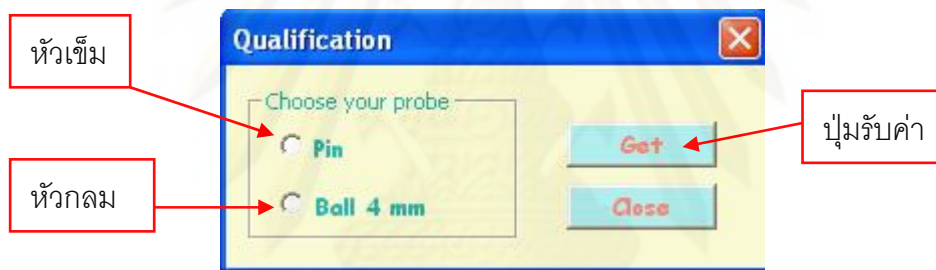
รูปที่ 5.1 หน้าต่างฟังก์ชัน Encoder position

5.2 Probe tip position ใช้ในการแสดงค่าตำแหน่งปลายหัววัดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีหน้าต่างดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 หน้าต่างฟังก์ชัน Encoder position

5.3 Qualification ใช้ในการให้ข้อมูลเกี่ยวกับหัว probe โดยจะมีให้เลือก 2 แบบ คือ หัววัดแบบทรงกลมและหัววัดแบบเข็ม โดยมีหน้าต่างดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 หน้าต่างฟังก์ชัน Qualification

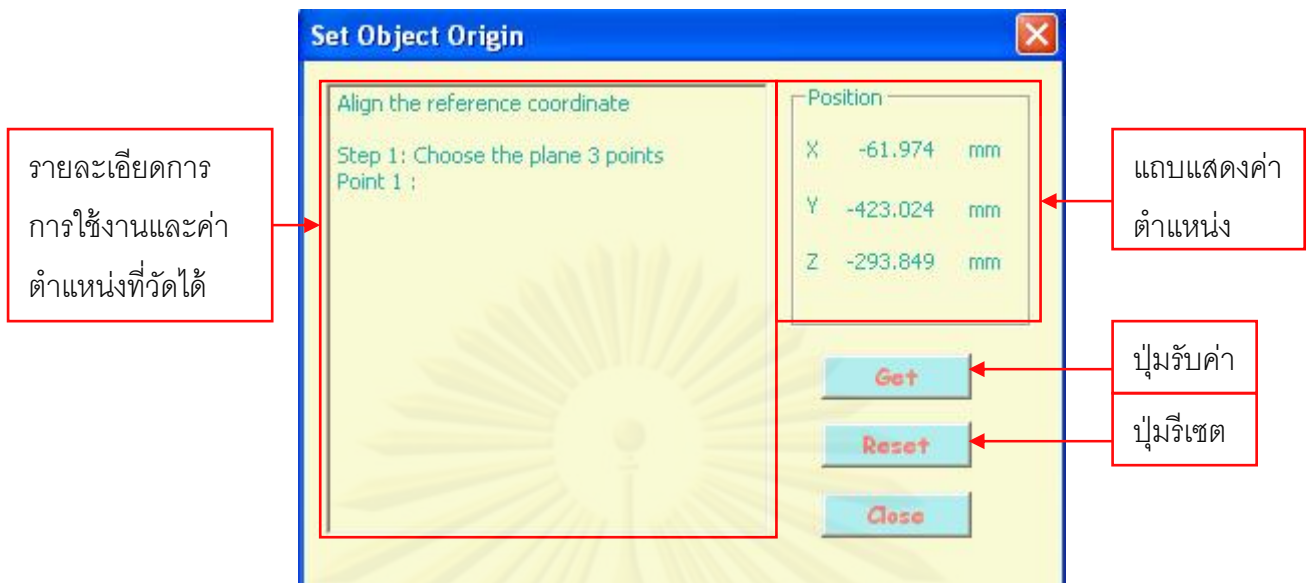
5.4 Alignments ใช้กำหนดตำแหน่งที่จะวางระบบแกนอ้างอิง (coordinate system) ให้กับชิ้นงาน ซึ่งต้องการทั้งตำแหน่งที่ต้องการวางระบบแกนอ้างอิงและทิศทางของแกน x, y และ z ของระบบแกนอ้างอิง ดังนั้นจึงต้องการข้อมูลทั้งหมด 7 จุด โดย

จุดที่ 1-3 เป็นการวัดจุด 3 จุดเพื่อใช้ในการกำหนดระนาบ (plane) ของชิ้นงานเพื่อให้แกน x และ y อยู่ในระนาบนี้ และแกน z จะมีทิศทางเดียวกันเวกเตอร์นอร์มอล (Normal vector) ของระนาบนี้

จุดที่ 4-5 เป็นการวัดจุด 2 จุดเพื่อใช้ในการกำหนดเส้นตรงที่ 1 ไร้วัดทิศทางของแนวแกน x ส่วนแกน y สามารถหาได้โดยใช้กฎมือขวา

จุดที่ 6-7 เป็นการวัดจุด 2 จุด เพื่อใช้ในการกำหนดเส้นตรงที่ 2 เพื่อหาตำแหน่งที่จะวางระบบแกนอ้างอิง โดยหาได้จากจุดตัดระหว่างเส้นตรงที่ 1 และเส้นตรงที่ 2

โดยในส่วนของการคำนวณจะขอกว่าในภาคผนวก ค และมีหน้าต่างดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 หน้าต่างฟังก์ชัน Alignments

5.5 Measurement ใช้เป็นเครื่องมือวัดค่าต่างๆ โดยจะแบ่งเป็น

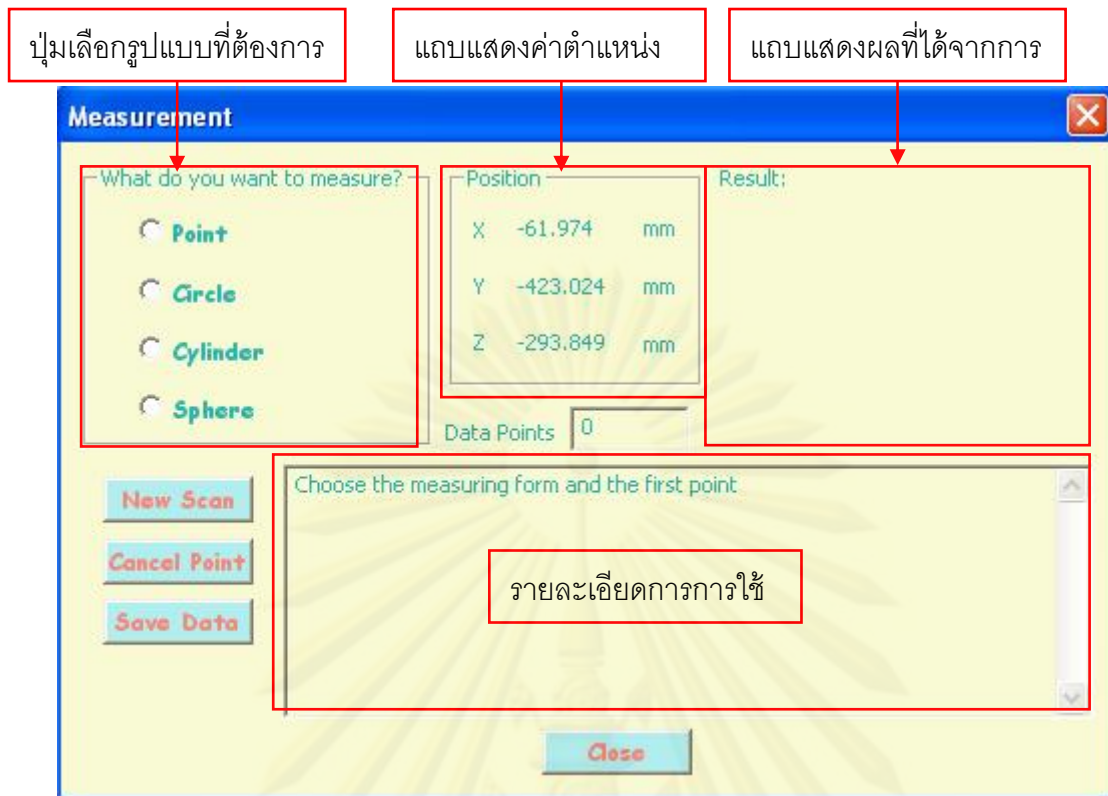
5.5.1 วัดจุด (Point) ว่า จุดที่ต้องการจะวัด มีค่าพิกัดเท่าไร

5.5.2 วัดวงกลม (Circle) ว่า วงกลมที่ต้องการจะวัดมีตำแหน่งจุดศูนย์กลางวงกลมและรัศมี เป็นเท่าไร ซึ่งต้องการข้อมูลทั้งหมด 3 จุดในการคำนวณ โดยในส่วนของ การคำนวณวงกลม จะขอกล่าวในภาคผนวก ง

5.5.3 วัดทรงกระบอก (Cylinder) ว่า ทรงกระบอกที่ต้องการจะวัด มีรัศมีและความยาว เป็นเท่าไร ซึ่งต้องการข้อมูลทั้งหมด 5 จุดในการคำนวณ โดยในส่วนของ การคำนวณทรงกระบอก จะขอกล่าวใน ภาคผนวก ง

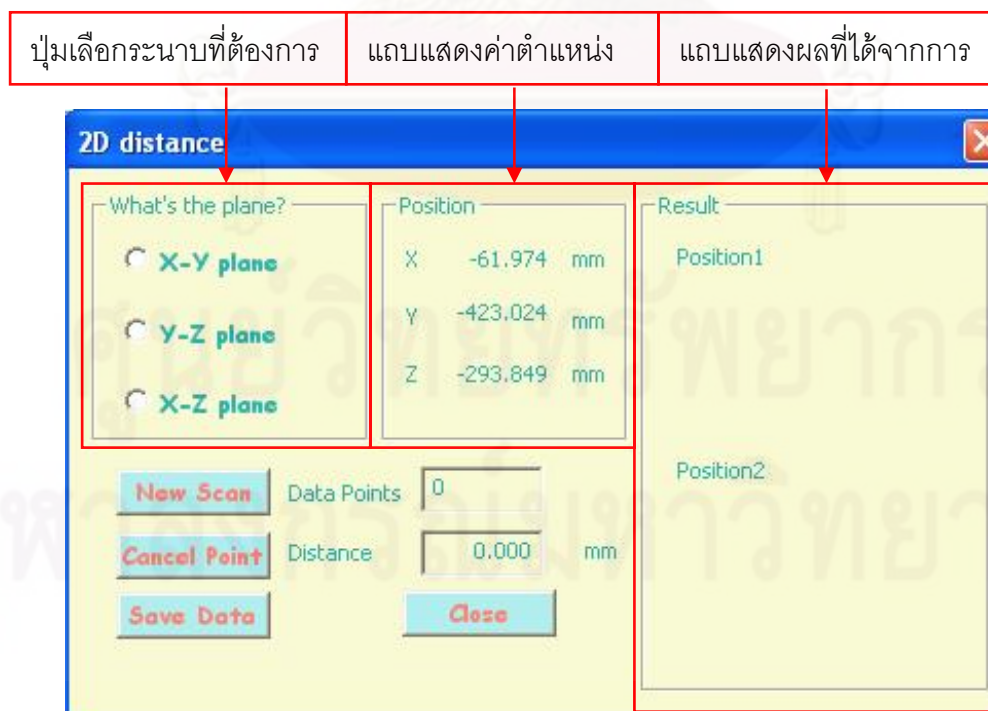
5.5.4 วัดทรงกลม (Sphere) ว่า ทรงกลมที่ต้องการจะวัด มีรัศมีเท่าไร ซึ่งต้องการข้อมูลทั้งหมด 4 จุดในการคำนวณ โดยในส่วนของ การคำนวณทรงกลมจะขอกล่าวในภาคผนวก ง

โดยมีหน้าตาดังรูปที่ 5.5



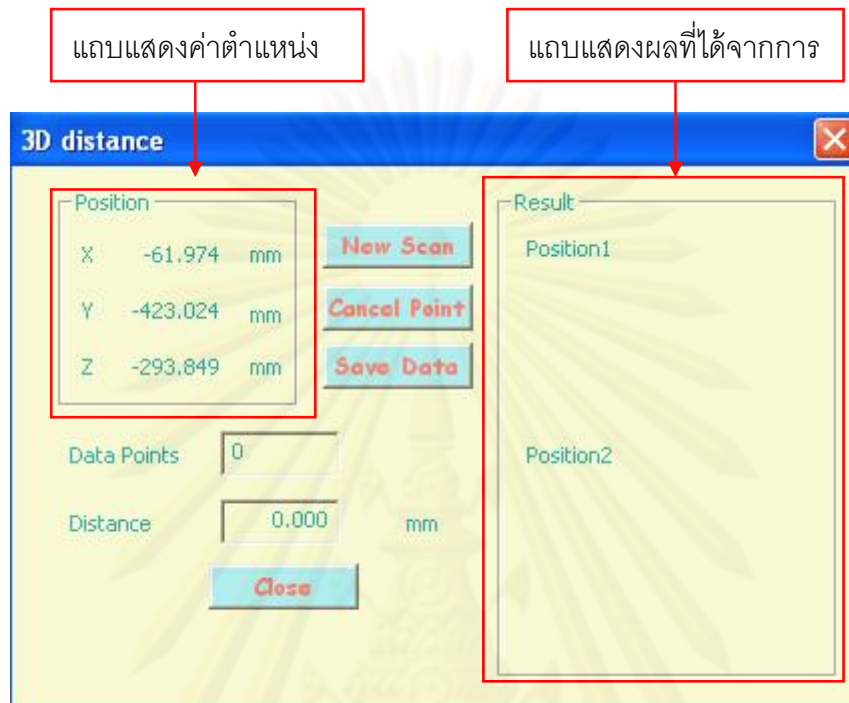
รูปที่ 5.5 หน้าต่างฟังก์ชัน Measurement

5.6 ระยะในระนาบ 2 มิติ (2D distances) ใช้เป็นเครื่องมือวัดระยะในระนาบ 2 มิติ ทั้งระนาบ XY , XZ , YZ ซึ่งต้องการข้อมูลทั้งหมด 2 จุดในการคำนวณ โดยในส่วนของกรคำนวณระยะในระนาบ 2 มิติจะขอกล่าวในภาคผนวก ๑ และมีหน้าตาดังรูปที่ 5.6



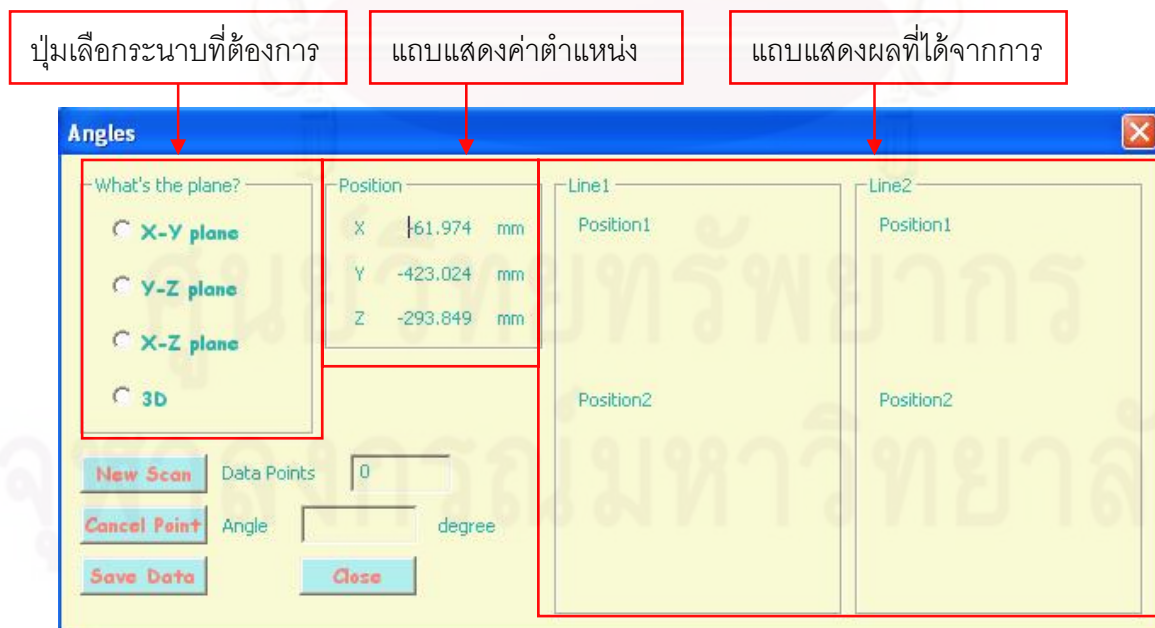
รูปที่ 5.6 หน้าต่างฟังก์ชัน 2D distances

5.7 ระยะใน 3 มิติ (3D distances) ใช้เป็นเครื่องมือวัดระยะในระนาบ 3 มิติ ซึ่งต้องการข้อมูลทั้งหมด 2 จุดในการคำนวณ โดยในการคำนวณระยะใน 3 มิติจะขอก้าวในภาคผนวก จ และมีหน้าตาดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 หน้าต่างฟังก์ชัน 3D distances

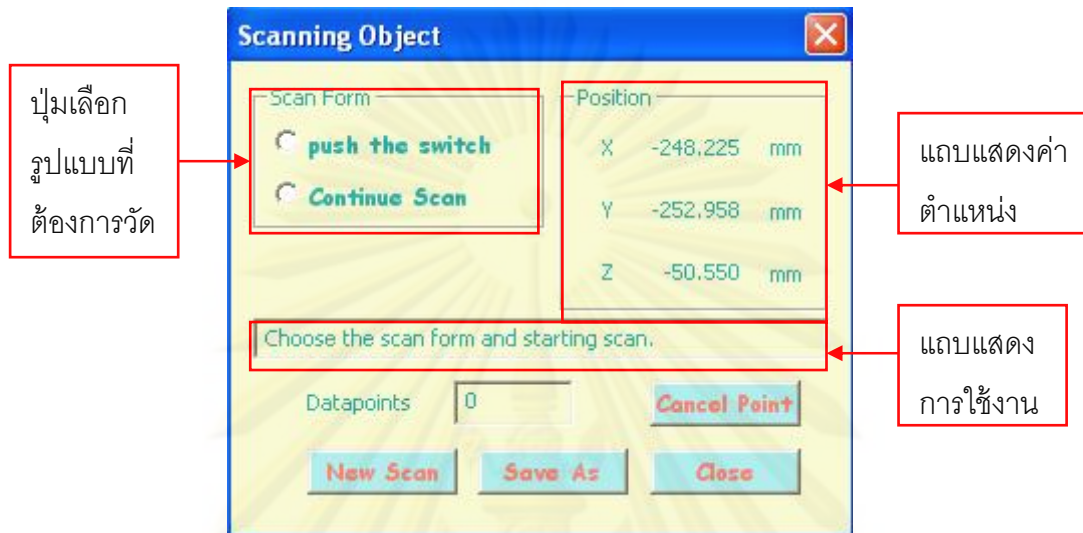
5.8 มุม (Angles) ใช้เป็นเครื่องมือวัดมุม ซึ่งต้องการข้อมูลทั้งหมด 4 จุดในการคำนวณ โดยในส่วนของการคำนวณค่ามุม จะขอก้าวในภาคผนวก ข และมีหน้าตาดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 หน้าต่างฟังก์ชัน Angles

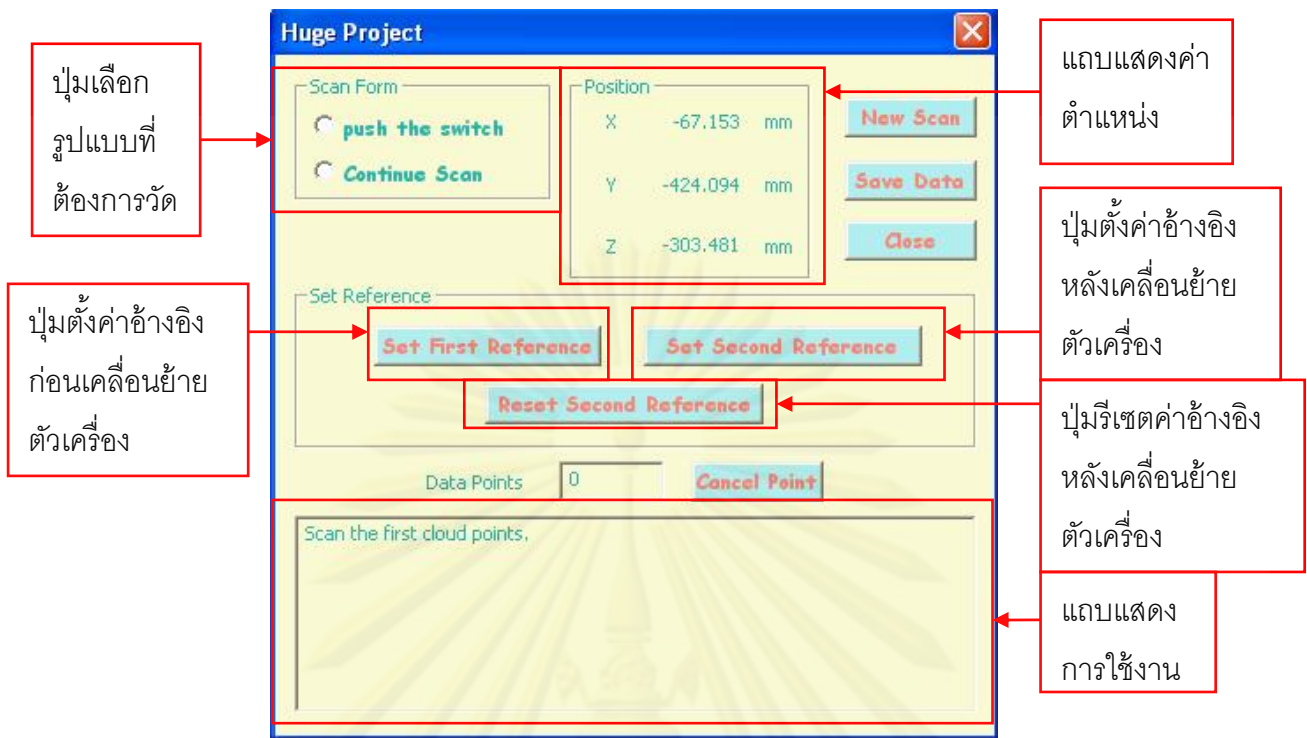
5.9 สแกนชิ้นงาน (Scan Object)

เป็นเครื่องมือในการเก็บค่าตำแหน่งเพื่อนำไปใช้ในการถอดแบบ โดยในส่วนของวิธีใช้และรายละเอียด จะขอกกล่าวในบทที่ 7.4 และมีหน้าต่างดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 หน้าต่างฟังก์ชัน Scan Object

5.10 การวัดชิ้นงานขนาดใหญ่ (Huge Project) เป็นเครื่องมือในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ที่จำเป็นจะต้องเคลื่อนย้ายเครื่องพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม เพื่อทำการวัดด้วย โดยในส่วนของวิธีใช้และรายละเอียดจะขอกกล่าวในบทที่ 7.5 และการคำนวณในส่วนของการตั้งตำแหน่งอ้างอิงจะขอกกล่าวในภาคผนวก ข และมีหน้าต่างดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 หน้าต่างฟังก์ชัน Scan Object

บทที่ 6

วิธีและขั้นตอนในการใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจู้ที่ใช้เป็นเอนโค้ดเดอร์ชนิดอินครีเมนทัล (incremental encoder) ซึ่งจะให้สัญญาณขาออกเป็นจำนวนพัลส์ตามตำแหน่งของเพลลาที่เปลี่ยนแปลงไปเท่านั้น ดังนั้นเมื่อปิดเครื่องหรือหยุดจ่ายไฟที่ป้อนให้กับตัวอินครีเมนทัลเอนโค้ดเดอร์ ก็จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดค่าตำแหน่งมุมขึ้น จึงต้องมีการกำหนดตำแหน่งอ้างอิง เพื่อให้การทำงานทุกครั้งสามารถเริ่มต้นที่จุดเดิมได้ทุกครั้งที่มีการเปิดเครื่อง

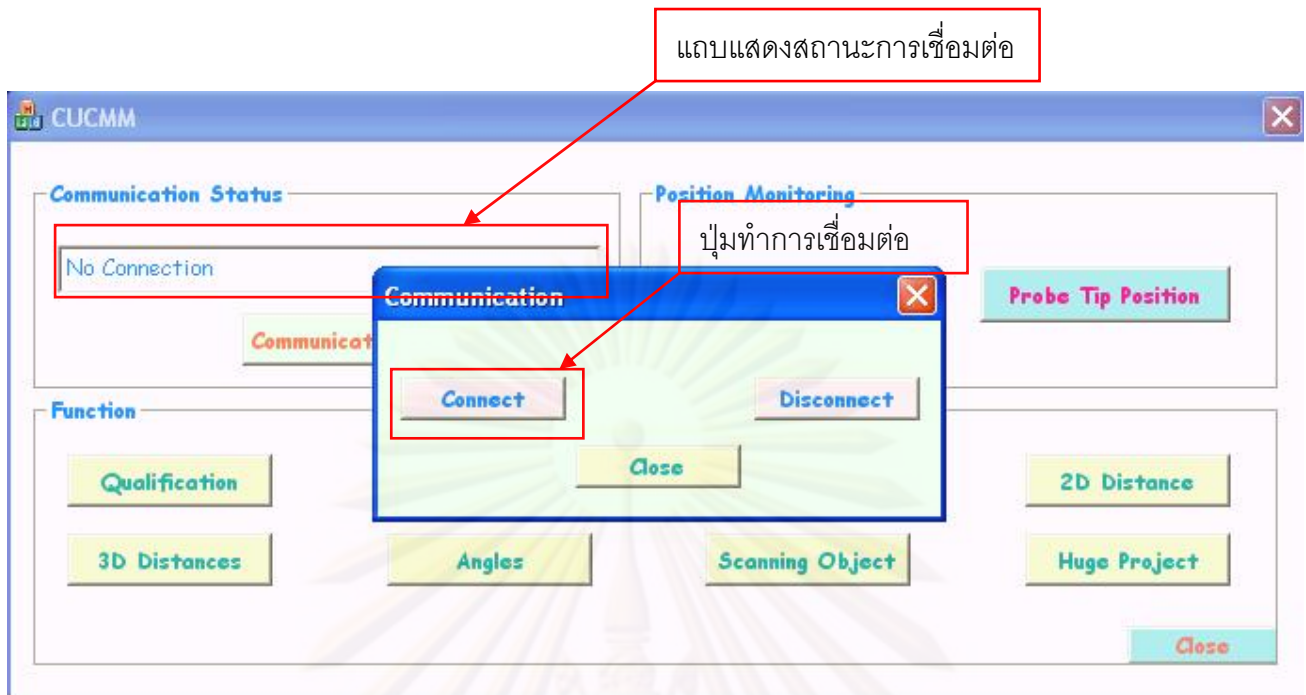
ในหัวข้อ 4.3 ได้กล่าวถึงการออกแบบการตั้งตำแหน่งอ้างอิงไว้เรียบร้อยแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานและการตั้งตำแหน่งอ้างอิงเพื่อเตรียมพร้อมก่อนการทำการวัด และตัวอย่างการใช้งานจนกระทั่งได้เป็นกลุ่มก้อนของจุด (point cloud) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. นำปลายหัววัดมาเสียบที่แท่นอ้างอิง ดังรูปที่ 6.1 เพื่อตั้งตำแหน่งอ้างอิง



รูปที่ 6.1 ขณะก็นำปลายหัววัดสวมเข้ากับแท่นอ้างอิง

2. เปิดโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม พร้อมทั้งจ่ายไฟให้กับเอนโค้ดเดอร์ทั้ง 6 ตัวของซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยจะต้องเป็นไฟกระแสตรง 5 โวลท์
3. กดปุ่มเรียกฟังก์ชันการสื่อสาร (communication button) แล้วจึงใช้คำสั่งเชื่อมต่อ (connect) เพื่อเชื่อมการสื่อสารระหว่างการ์ดเอสพีไอทูกับคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน และตรวจสอบสถานะการสื่อสารจากแถบแสดงสถานะที่หน้าจอหลักของโปรแกรม ดังรูปที่ 6.2



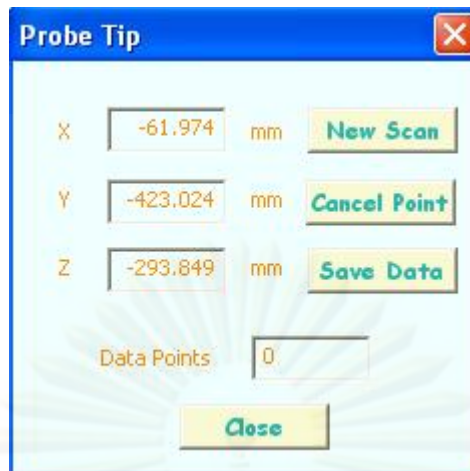
รูปที่ 6.2 ฟังก์ชันการสื่อสารและสถานะการสื่อสารจากโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม

4. กดปุ่มเรียกฟังก์ชันแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder Position) จะมีหน้าต่างขึ้นมาดังรูปที่ 6.3 และเปิดค้างไว้ เนื่องจากในฟังก์ชันอื่นๆของโปรแกรมมีการเรียกใช้ค่าจากฟังก์ชันแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์ จึงต้องทำการเปิดค้างไว้



รูปที่ 6.3 หน้าต่างแสดงตำแหน่งของเอนโค้ดเดอร์

5. กดปุ่มเรียกฟังก์ชันแสดงตำแหน่งของปลายหัววัด (Probe Tip Position) จะมีหน้าต่างขึ้นมาดังรูปที่ 6.4 และเปิดค้างไว้ เนื่องจากในฟังก์ชันอื่นๆของโปรแกรมมีการเรียกใช้ค่าจากฟังก์ชันแสดงตำแหน่งของปลายหัววัด จึงต้องทำการเปิดค้างไว้



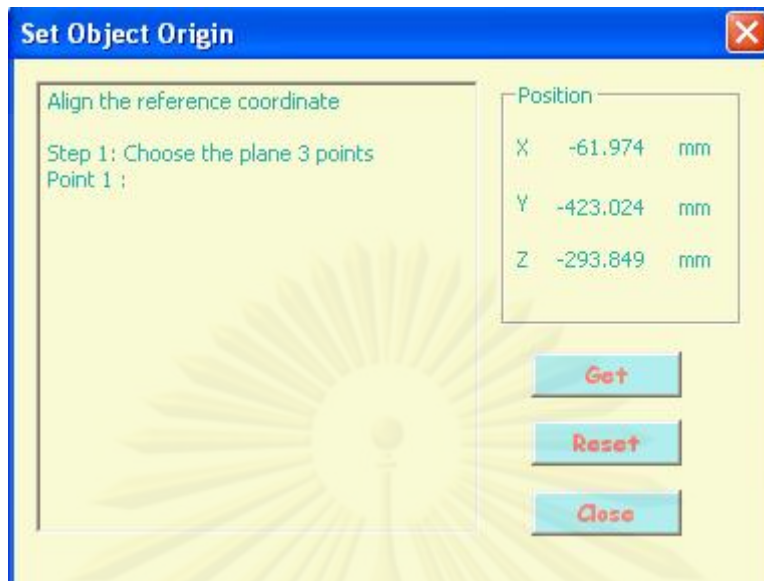
รูปที่ 6.4 หน้าต่างแสดงตำแหน่งของปลายหัววัด

6. กดปุ่มเรียกฟังก์ชัน Qualification จะมีหน้าต่างขึ้นมาดังรูปที่ 6.5 และทำการเลือกรูปแบบของหัววัดที่จะใช้ในการวัด เมื่อทำการเลือกแล้วให้กดปุ่ม Get หน้าต่างนี้จะหายไป



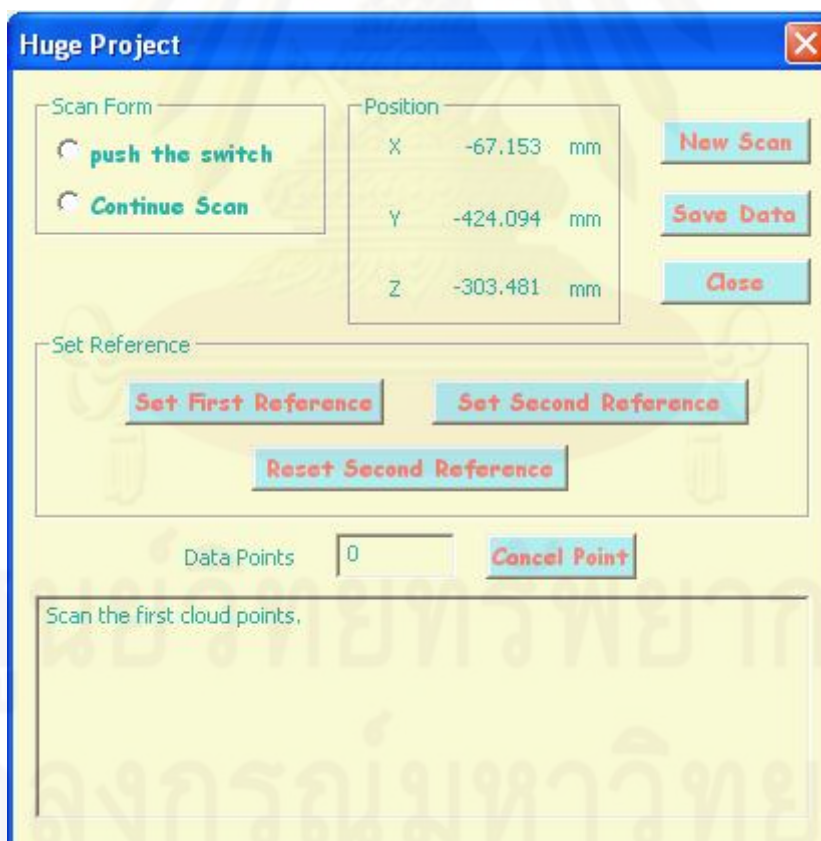
รูปที่ 6.5 หน้าต่างแสดงฟังก์ชัน Qualification

7. กดปุ่มเรียกฟังก์ชัน Set Obj. Origin จะมีหน้าต่างดังรูปที่ 6.6 แล้วทำการตั้งแกนอ้างอิงให้กับชิ้นงานที่จะทำการวัด โดยจะต้องทำการวัดทั้งหมด 7 จุด 3 จุดแรกเป็นการวัดระนาบ 2 จุดถัดมาเป็นการวัดเส้นตรงโดยจะทำการวัดที่ด้านหนึ่งของชิ้นงานและ 2 จุดสุดท้ายจะเป็นการวัดเส้นตรงอีกด้านหนึ่งของชิ้นงาน เมื่อทำการวัดครบ 7 จุดแล้ว ให้กดปุ่ม Get หน้าต่างนี้จะหายไป และค่าตำแหน่งปลายหัววัดจะเป็นค่าที่เทียบกับแกนอ้างอิงที่ได้ตั้งไว้โดยอัตโนมัติ ซึ่งในส่วนนี้อาจจะเรียกใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ในการใช้งานจริงการวัดเพื่อเก็บค่ากลุ่มก้อนของจุด (point cloud) อาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ฟังก์ชันนี้ก็ได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีการอ้างอิงจุดใดๆเพื่อทำการใช้งาน เป็นต้น



รูปที่ 6.6 หน้าต่างแสดงฟังก์ชัน Set Obj. Origin

8. กดปุ่มเรียกฟังก์ชัน Huge Project จะมีหน้าต่างดังรูปที่ 6.7 เหตุผลที่เลือกใช้ฟังก์ชันนี้เป็นตัวอย่าง เนื่องจากฟังก์ชันนี้มีการใช้งานที่ครอบคลุมฟังก์ชัน Scanning Object และมีส่วนเพิ่มเติมในการต่อจุดเพื่อทำการวัดต่อจากเดิมได้ ซึ่งจะทำให้เข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้น



รูปที่ 6.7 หน้าต่างแสดงฟังก์ชัน Huge Project

ในที่นี้จะยกตัวอย่างการวัดตัวครอบหลอดไฟซึ่งมีขั้นตอนการทำงานวัดดังนี้

(1) เตรียมชิ้นงานที่จะทำการวัด ในที่นี้จะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 ชิ้นงานเป็นตัวอย่างในการใช้ฟังก์ชัน Huge Project

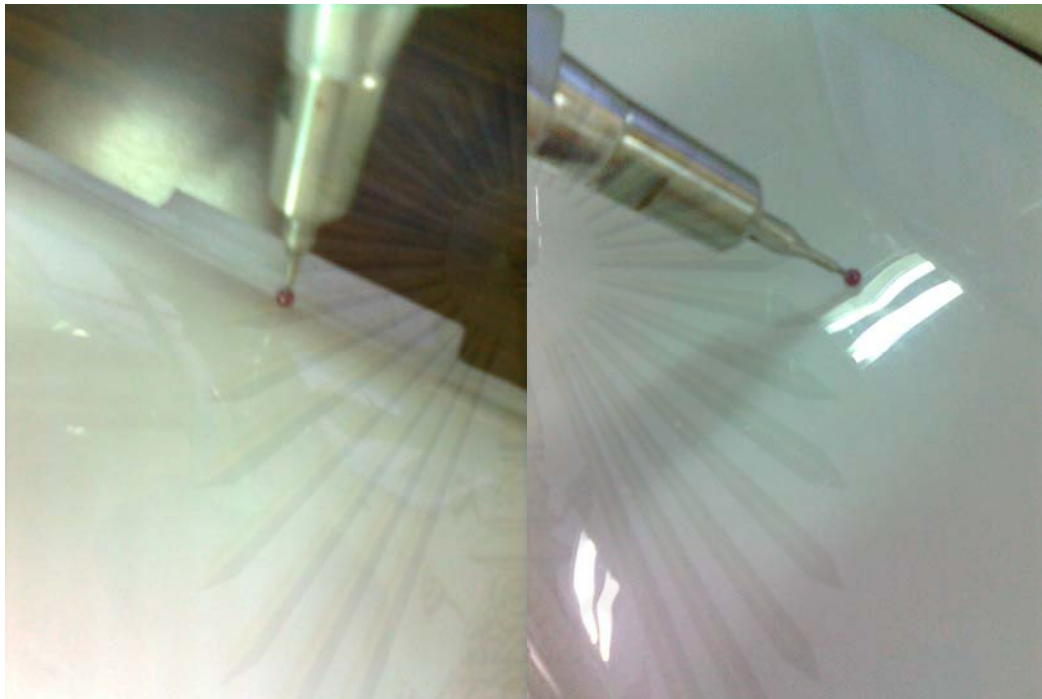
(2) ทำการยึดชิ้นงานให้มีความมั่นคง ไม่ให้มีการเคลื่อนที่ได้ และกำหนดจุดที่จะใช้สำหรับอ้างอิง ทั้งหมด 3 จุด ต่อการเคลื่อนย้ายตัวเครื่อง 1 ครั้ง (จุดอ้างอิงนี้ไม่จำเป็นต้องอยู่บนตัวชิ้นงาน เนื่องจากเป็นการย้ายเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม ไม่ใช้การย้ายชิ้นงาน) ในที่นี้จะกำหนดไว้เป็นจุดสีขาว เนื่องจากในการวัดจะใช้ปลายหัววัดแบบหัวแหลมซึ่งในการวัดจะทำให้เกิดจุดลงบนจุดอ้างอิงทำให้สามารถมองเห็นได้ง่าย ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 กำหนดจุดอ้างอิง

(3) เลือกรูปแบบการวัด โดยเลือกแบบเก็บค่าเมื่อกดสวิทช์(push the switch) หรือแบบกดสวิทช์ค้าง (continue scan) และทำการวัดตำแหน่งของชิ้นงานโดยในที่นี้จะเลือกรูปแบบการ

วัดเป็นแบบ continue scan และใช้หัววัดแบบหัวกลมในการวัด (รูปที่ 6.10) เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดใหญ่มาก



รูปที่ 6.10 การใช้หัววัดแบบทรงกลม

(4) ทำการเก็บค่าจุดโดยการลากตัวหัววัดไปตามพื้นผิวของชิ้นงานและในขณะที่ลาก ให้กดสวิตช์ตรงด้ามมือจับค้างไว้ด้วย เครื่องจะทำการเก็บค่าโดยอัตโนมัติตามค่าเวลาที่ได้ตั้งไว้ ขณะที่ทำการวัด ตัวเลขในช่อง Data points จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนจุดที่เครื่องทำการเก็บค่าได้

(5) เมื่อต้องการวัดในตำแหน่งที่แขนกลไม่สามารถไปถึง ให้กดปุ่ม Set First Reference ในฟังก์ชัน Huge Project แล้วทำการวัดค่าจุด 3 จุดที่กำหนดไว้เป็นจุดอ้างอิง โดยจะต้องเปลี่ยนหัววัดเป็นแบบเข็มและเลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ push the switch ทุกครั้ง เพื่อความแม่นยำในการตั้งจุดอ้างอิง

(6) ทำการเลื่อนตัวเครื่องให้สามารถวัดค่าในจุดถัดไปได้ตามต้องการ

(7) กดปุ่ม Set Second Reference ทำการวัดค่าจุดอ้างอิงในหัวข้อที่ (5) ซ้ำ โดยตำแหน่งและ ลำดับจุดที่ทำการวัดจะต้องเป็นจุดเดิมให้ได้มากที่สุด เพื่อใช้เปรียบเทียบ (ในส่วนนี้ จะต้องเปลี่ยนหัววัดเป็นแบบเข็มและเลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ push the switch)

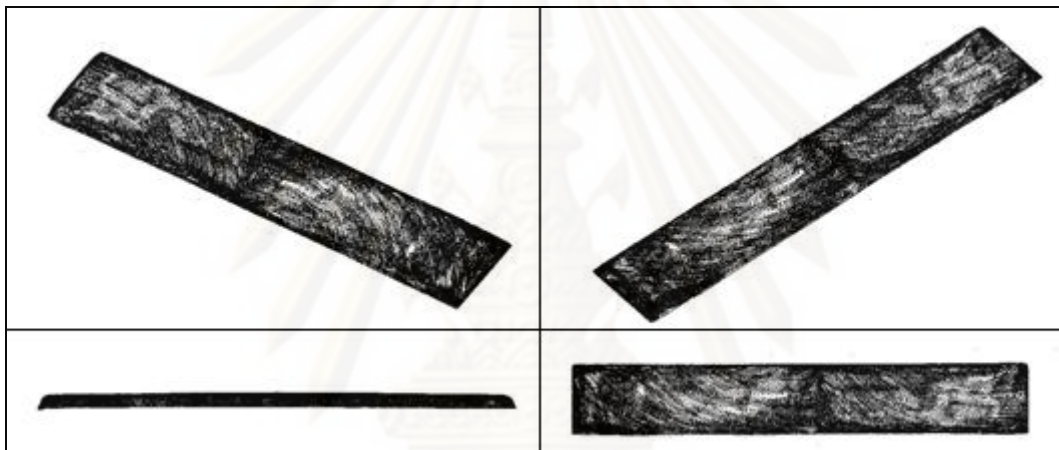
(8) ทำการวัดจุดต่อไปได้ (ทำการเปลี่ยนหัววัดเป็นแบบหัวกลมและเลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ continue scan เช่นเดิม)

(9) ถ้าต้องการเปรียบเทียบจุดอ้างอิงใหม่ (เนื่องจากการเปรียบเทียบเดิมไม่สามารถใช้ได้ อาจจะทำให้ผลที่ออกมามีค่าคลาดเคลื่อนมาก) ให้กดปุ่ม Reset Second Reference โปรแกรมจะลบค่าที่วัดหลังจากกดปุ่ม Set Second Reference ทั้งหมดและระบบจะกลับไปสู่การรอวัดจุดเปรียบเทียบ 3 จุด ตามหัวข้อ (7) เพื่อช่วยให้ไม่ต้องกลับไปทำการวัดใหม่ตั้งแต่ต้น

(10) ถ้าต้องการเลื่อนตัวเครื่องอีกให้ทำซ้ำข้อ (5) – (7)

(11) กดปุ่ม save เพื่อบันทึกค่าตำแหน่งที่วัดได้โดยโปรแกรมจะทำการบันทึกให้อยู่ในรูปแบบไฟล์นามสกุล .CGO_ASCII โดยอัตโนมัติ

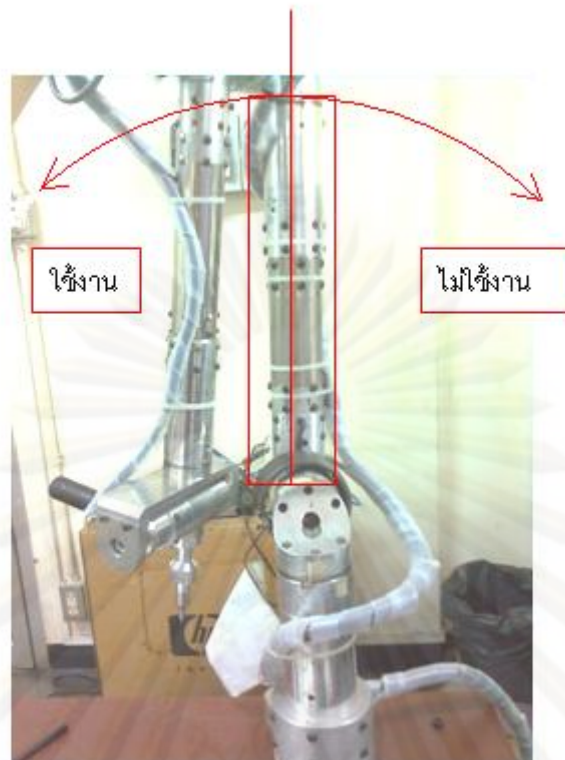
(12) ส่งข้อมูลนี้ไปยังโปรแกรมคาเทีย จะได้กลุ่มก้อนของจุด (point cloud) ดังแสดงไว้ในรูป 6.11



รูปที่ 6.11 กลุ่มก้อนของจุดที่วัดได้

ข้อจำกัดของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม คือ ข้อต่อที่ 2 ของแกนกลใช้งานได้แค่ฝั่งเดียว คือฝั่งที่มีแรงสปริงช่วยให้หน้าหนักของแกนกลเบาลง ส่วนอีกฝั่งหนึ่งจะไม่ได้ใช้งาน ดังรูปที่ 6.12 โดยจะช่วยลดโอกาสการเกิดซิงกูลาริตี (Singularity) [4] หรือการที่เครื่องมีผลการวัดจุดเดียวกัน โดยที่มีการวางตัวของแกนกลที่ต่างกันลงได้ แต่จะลดพื้นที่การใช้งานลงด้วยเช่นกัน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.12 ส่วนที่ใช้งานและไม่ได้ใช้งานของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

การทดลองและผลการทดลอง

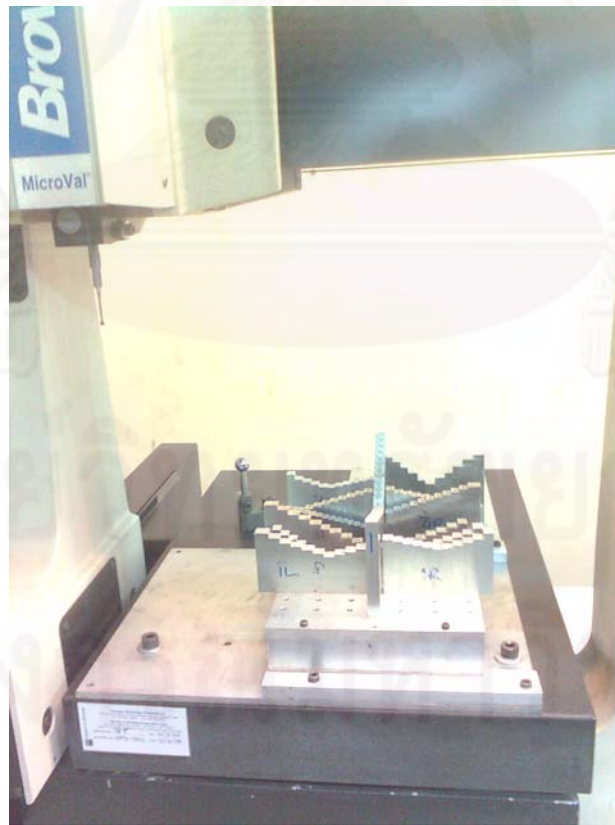
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองในการสอบเทียบและการวัดตำแหน่งของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

7.1 การทดลองในการสอบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ในการสอบเทียบ จะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ไม่ทราบค่าที่แน่นอนของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยจะมีชิ้นงานสอบเทียบซึ่งใช้สำหรับอ้างอิงตำแหน่งจุดต่างๆ ซึ่งจะทำให้การวัดด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มที่ทางห้องปฏิบัติการมีอยู่เพื่อหาค่าตำแหน่งที่แม่นยำ แล้วจึงนำไปวัดด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มต่อไป โดยมีขั้นตอนการสอบเทียบดังนี้

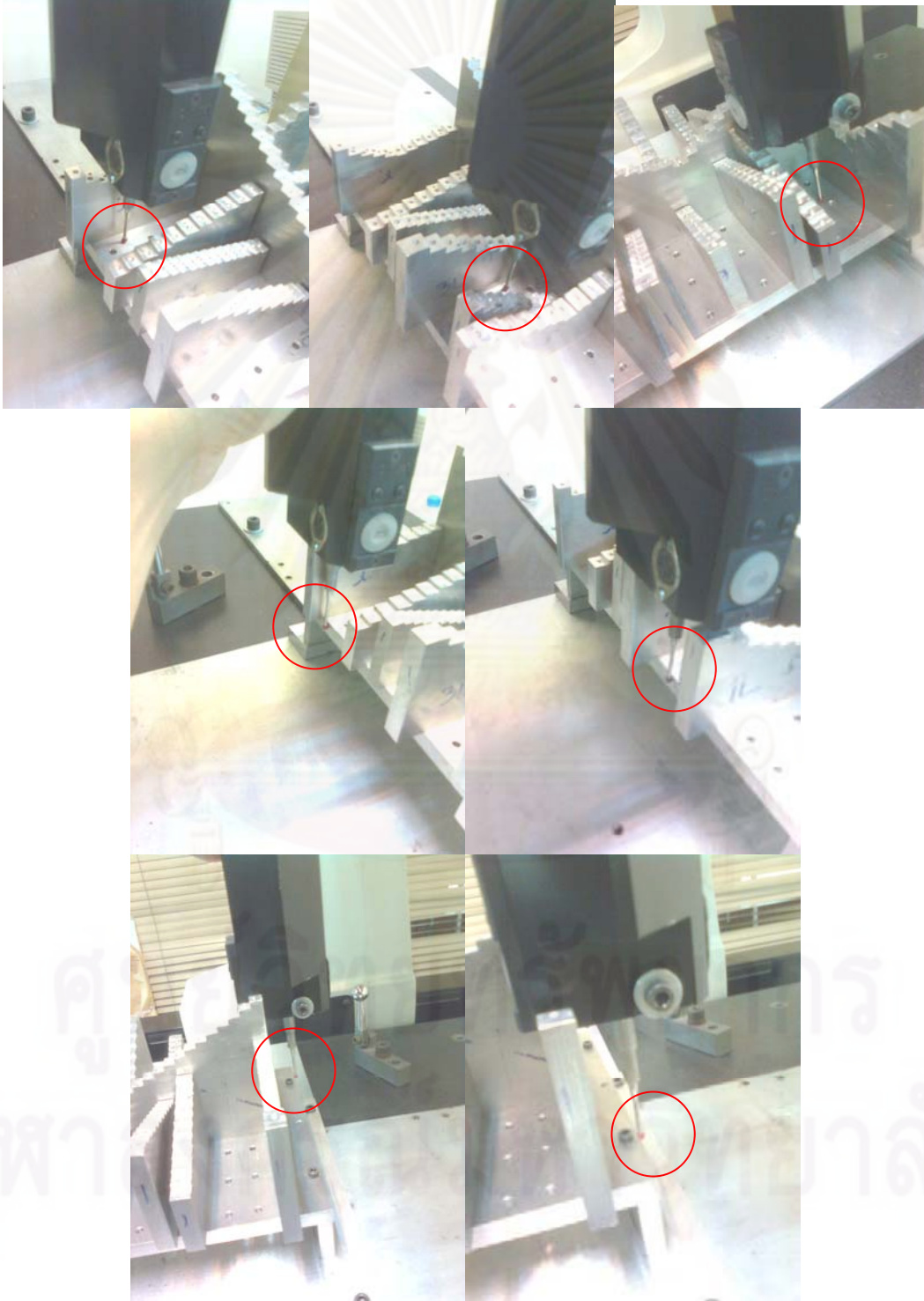
ในส่วนของการวัดตำแหน่งอ้างอิงด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

(1) นำชิ้นงานสอบเทียบตั้งบนฐานของเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม ดังรูปที่ 7.1 ซึ่งสำหรับเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มมีการตั้งฐานยึดชิ้นงานให้มีระนาบในแนวขนานกับพื้นโลกอยู่แล้วดังนั้นจึงสามารถวางชิ้นงานสอบเทียบแล้วทำการสอบเทียบได้เลย



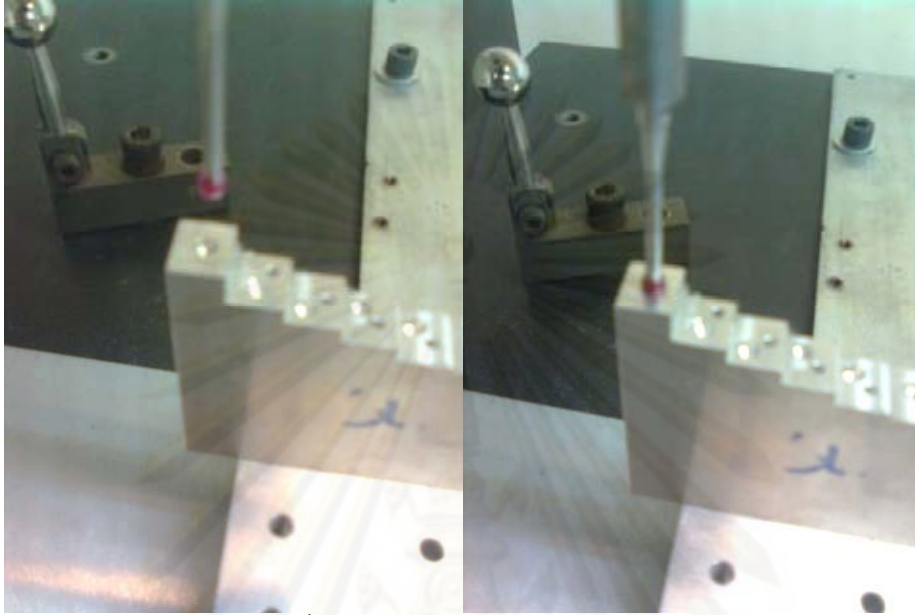
รูปที่ 7.1 ชิ้นงานสอบเทียบตั้งบนฐานของเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

(2) กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นให้กับตัวชิ้นงานสอบเทียบ ซึ่งในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นบนตัวชิ้นงานสอบเทียบจะต้องทำการวัดทั้งหมด 7 จุด โดย 3 จุดแรกจะวัดที่ระนาบบนตัวชิ้นงานสอบเทียบ 2 จุดถัดมาใช้วัดเพื่อหาเส้นตรงที่เป็นขอบด้านหนึ่งของชิ้นงานสอบเทียบ และ 2 จุดสุดท้ายใช้วัดเพื่อหาเส้นตรงที่เป็นขอบของด้านที่เหลือของชิ้นงานสอบเทียบ ซึ่งแสดงตัวอย่างตำแหน่งที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นไว้ดังรูปที่ 7.2



รูปที่ 7.2 ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นบนตัวชิ้นงานสอบเทียบ

(3) ทำการวัดตำแหน่งของหลุมซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมโดยการวางหัววัดทรงกลม $\phi 4$ มิลลิเมตร ลงบนปากหลุม ซึ่งในส่วนนี้จะต้องใช้หัววัดแบบแข็ง เนื่องจากต้องทำการวางหัววัดให้สัมผัสให้เต็มปากหลุม ดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 การวางหัววัดบนปากหลุม

(4) เก็บค่าตำแหน่งที่วัดได้ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป

(5) ทำซ้ำข้อ (3) และ (4) เพื่อเก็บค่าตำแหน่งของหลุมอื่นๆจนครบทั้งหมด ซึ่งตัวชิ้นงานสอบเทียบมีหลุมที่จะทำการวัดได้ทั้งหมด 147 ตำแหน่ง

ในส่วนของการสอบเทียบกับเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม

(1) นำชิ้นงานสอบเทียบตั้งบนฐานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ดังรูปที่ 7.4 ซึ่งในส่วนนี้จะต้องใช้ตัวลูกน้ำ ดังรูปที่ 7.5 ในการตั้งระดับให้ชิ้นงานมีระดับเดียวกับฐานของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม ซึ่งได้มีการตั้งให้มีระดับขนานกับพื้นโลกไว้ก่อนหน้านี้อแล้ว

ศูนย์วาทยทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



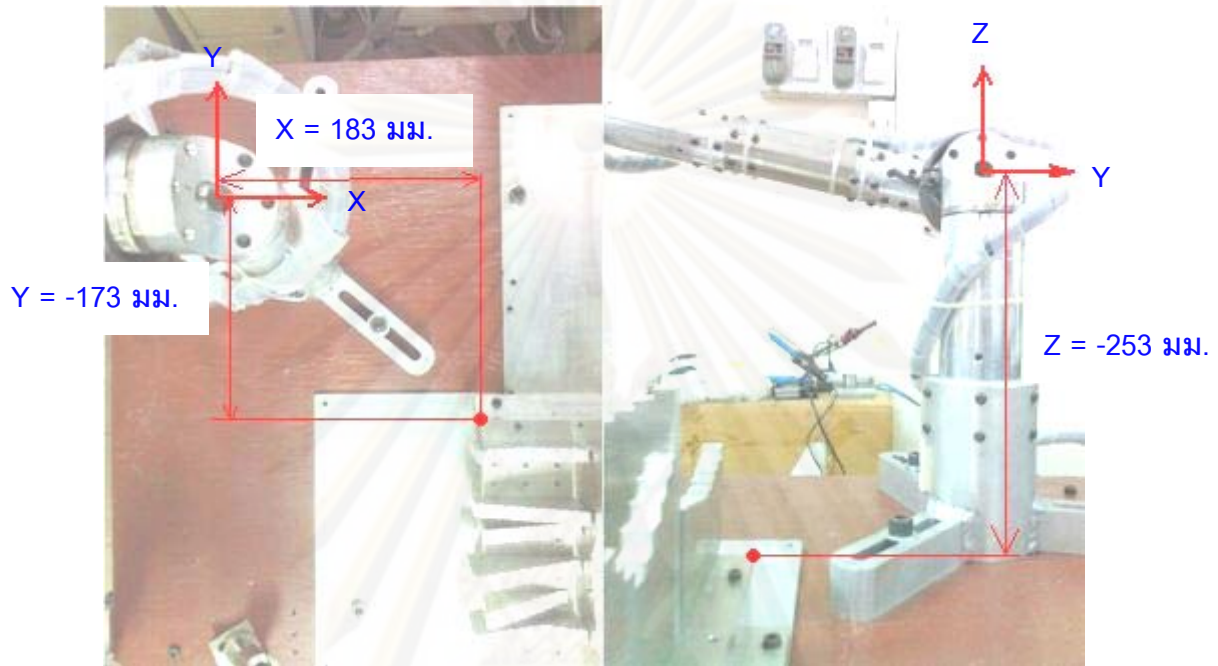
รูปที่ 7.4 ชิ้นงานสอบเทียบบนฐานของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม



รูปที่ 7.5 ตัวลูกนำที่ใช้ในการตั้งระดับชิ้นงาน

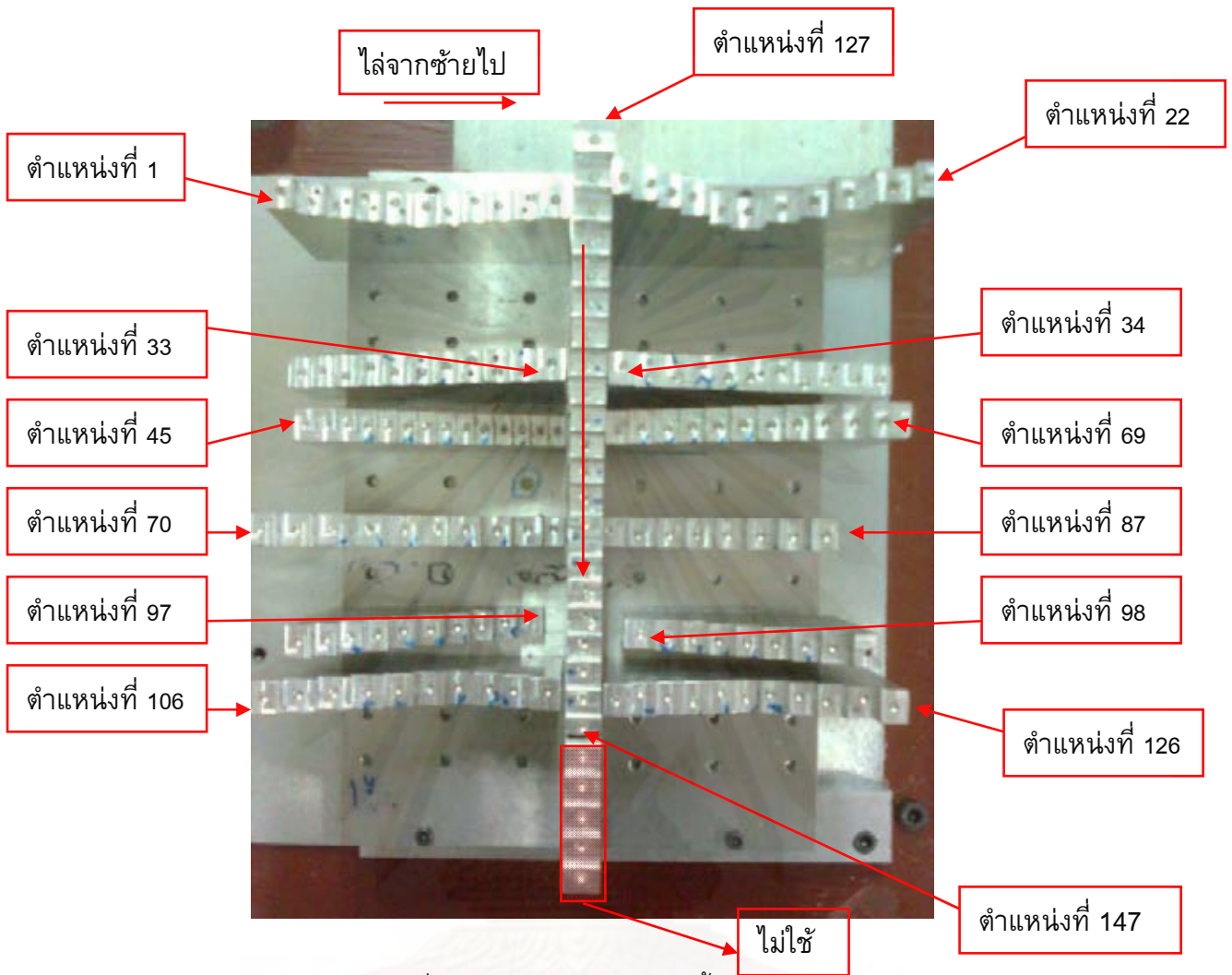
(2) ตั้งเฟรมใหม่โดยกำหนดให้จุดที่ตั้งเฟรมและตำแหน่งของแกนให้อยู่ที่จุดเดียวกับจุดเริ่มต้นของชิ้นงานสอบเทียบที่ตั้งไว้ในขั้นตอนของเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม ซึ่งในส่วนนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์ของตัวเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงทำให้เกิดพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าขึ้น 6 ตัว คือ ตำแหน่งการหมุน α, β และ γ และจุดกำเนิดของเฟรมใหม่ $x_{0Origin}, y_{0Origin}$ และ $z_{0Origin}$

(3) วัดระยะห่างโดยประมาณระหว่างเฟรมที่ 0 ของเครื่องกับตำแหน่งเริ่มต้นของชิ้นงานสอบเทียบทั้งแนวแกน x, y และ z โดยเทียบกับเฟรม 0 ของเครื่อง ดังรูปที่ 7.6 ซึ่งจะได้ค่าเริ่มต้นในการทำการถอดแบบไม่เป็นเชิงเส้นของค่า $x_{0Origin}$, $y_{0Origin}$ และ $z_{0Origin}$



รูปที่ 7.6 ระยะห่างโดยประมาณระหว่าง เฟรม 0 ของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม กับเฟรมอ้างอิงของชิ้นงาน

(4) ทำการเลือกตำแหน่งของหลุมที่จะทำการวัด โดยเทียบจะต้องมีจำนวนข้อมูลของตำแหน่งที่จะทำการวัด มากกว่าหรือเท่ากับจำนวนค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นเนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า 28 ตัว ดังนั้นจะต้องทำการทดลองวัดตำแหน่งอย่างน้อย 28 ตำแหน่ง จึงจะเพียงพอต่อการคำนวณ ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการวัดตามตำแหน่งต่างๆ ทั้งหมด 12 จุด โดยวัดจุดละ 10 ครั้ง รวมมีชุดข้อมูลทั้งหมด 120 จุด โดยกำหนดตำแหน่งดังรูปที่ 7.7 และทำการวัดตำแหน่งโดยเรียงลำดับตำแหน่งดังนี้ ตำแหน่งที่ 1, 22, 126, 106, 33, 34, 98, 97, 45, 69, 87 และ 70 ตามลำดับ สาเหตุที่เลือกวัดตำแหน่งและลำดับที่ทำการวัดดังที่ได้กล่าวไว้คือ ต้องการให้ตำแหน่งที่จะทำการวัดมีความหลากหลายของระยะทั้งในแนวแกน x, y และ z จากนั้นทำการวัดโดยการเอาปลายหัววัดทรงกลม $\phi 4$ มิลลิเมตร วางไว้บนปากหลุมแล้วกดบันทึกจนกระทั่งครบตามข้อมูลที่ต้องการ



รูปที่ 7.7 การระบุตำแหน่งบนชิ้นงานสอบเทียบ

(5) เก็บค่าตำแหน่งที่วัดได้ทั้งหมด แล้วทำการกดปุ่มบันทึกค่า

(6) นำข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดมาทำการถอดรอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยจะมีข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ซาร์ปซีเอ็มเอ็ม 3 ตัวคือ ตำแหน่ง x , y และ z ของหลุมที่วัดได้เทียบกับเฟรมเริ่มต้นของชิ้นงานสอบเทียบที่ได้กำหนดไว้ ในหน่วยของมิลลิเมตร และข้อมูลของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม 6 ตัว คือ ค่ามุมที่วัดได้จากเอนโคเดอร์ทั้ง 6 ตัวในหน่วยของเรเดียน

(7) ในส่วนของการกำหนดค่าเริ่มต้นที่จะใช้ในการทำการถอดรอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับค่า $a_1, a_2, a_3, a_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, d_2, d_3, d_4, d_5, x_p, y_p, z_p, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ จะใช้ข้อมูลจากการตั้งแกนตามตารางดีเอชพารามิเตอร์และค่าความยาวต่างๆตามที่ได้ออกแบบไว้ใน CAD (ซึ่งในความเป็นจริงไม่สามารถสร้างได้ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้) และสำหรับค่า $x_{0Origin}, y_{0Origin}, z_{0Origin}$ จะได้จากการวัดตามขั้นตอนที่ (3) ส่วนค่ามุม α, β, γ จะมีค่าเป็น 0

เนื่องจากการวางตัวของค่ามุมจะเป็นไปตามวิธี Z-X-Z ออยเลอร์เองเกิด [13] ซึ่งทำการหาได้ยาก จึงทำการกำหนดให้มีค่าเป็น 0

(8) นำข้อมูลทั้งหมดมาทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าผ่านทางโปรแกรมแมทแลป (Matlab) โดยใช้ฟังก์ชัน lsqcurvefit ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.4.2.4 โดยค่า xdata เป็นค่าของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม และค่า ydata เป็นค่าของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องบราวน์ แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในข้อ (6) และค่า x_0 เป็นค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการทำซ้ำ ซึ่งคือค่าที่ได้จากหัวข้อ (7)

ในการทำการทำการทดลองแบบไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าการประมาณมีค่าเข้าสู่ค่าที่ประมาณได้โดยการซ้ำเพียง 26 ครั้ง ซึ่งค่าการทำซ้ำที่ตั้งไว้มากที่สุด คือ 5000 ครั้ง ดังนั้นการประมาณสิ้นสุดลงก่อนค่าที่กำหนดไว้ จึงเป็นค่าประมาณที่ใช้ได้ โดยผลการประมาณจะเป็นดังตารางที่ 7.1 ซึ่งค่าที่ได้จากการประมาณได้แสดงเลขจุดทศนิยม 3 ตำแหน่ง แต่ในการนำค่าที่ประมาณได้ไปใช้จริงจะนำค่าจากการคำนวณจริงซึ่งมีจุดทศนิยม 15 ตำแหน่งมาใช้งาน ตารางที่ 7.1 ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 28 ตัว ที่ได้จากการสอบเทียบ

พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น	ค่าที่ประมาณได้
a_1	0.000	1.388
a_2	0.000	-2.259
a_3	0.000	-1.536
a_4	0.000	1.793
α_1	1.571	1.576
α_2	4.712	4.712
α_3	1.571	1.565
α_4	1.571	1.561
α_5	4.712	4.721
d_2	135.000	135.780
d_3	419.272	419.336
d_4	117.250	116.803
d_5	-433.670	-433.462
x_p	156.221	156.428
y_p	-0.185	-0.185
z_p	-0.306	0.425

พารามิเตอร์	ค่าเริ่มต้น	ค่าที่ประมาณได้
θ_1	0.000	-0.003
θ_2	4.712	4.724
θ_3	3.142	3.124
θ_4	0.000	-0.025
θ_5	3.142	3.111
θ_6	1.571	1.532
$x_{0Origin}$	183.000	183.717
$y_{0Origin}$	-173.000	-173.681
$z_{0Origin}$	-253.000	-253.324
α	0.000	0.503
β	0.000	-0.004
γ	0.000	-0.514

7.2 การทดลองวัดตำแหน่งเพื่อหาค่าความถูกต้องของเครื่องวัดพิกต์ 3 มิติ ซียู - ซีเอ็มเอ็ม

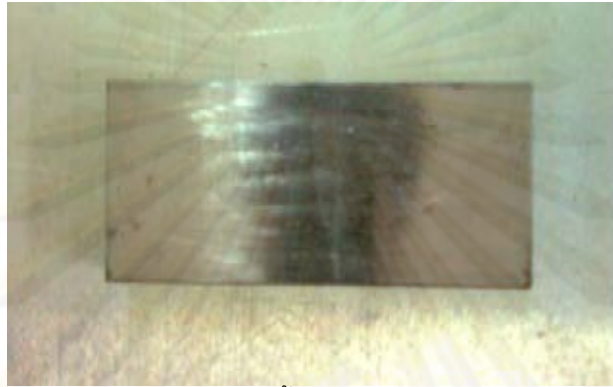
7.2.1 **ชิ้นงานสอบเทียบ** ทำได้โดยการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างสองตำแหน่งของชิ้นงานสอบเทียบที่วัดด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มและเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม โดยทำการสุ่มวัดระยะจากตำแหน่ง 2 ตำแหน่ง ที่มีระยะห่างแตกต่างกันไปบนชิ้นงานสอบเทียบ ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 ระยะทางระหว่างสองตำแหน่งที่ทำกรวัดด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มและค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อเทียบกับระยะระหว่างตำแหน่งที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม (มม.)

ตำแหน่ง	ระยะจากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม	ระยะจากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม	ค่าความผิดพลาด
4 และ 123	220.260	220.336	-0.076
7 และ 120	185.162	185.107	0.055
8 และ 120	183.714	183.744	-0.030
8 และ 119	182.597	182.562	0.035
12 และ 115	165.735	165.773	-0.038
22 และ 105	148.143	148.106	0.037
28 และ 100	130.940	130.960	-0.020
35 และ 92	122.040	121.960	0.080
36 และ 92	128.180	128.219	-0.038
42 และ 86	53.932	54.012	-0.079
46 และ 81	114.776	114.693	0.082
51 และ 76	37.943	37.886	0.057
52 และ 76	36.219	36.221	-0.002
61 และ 67	51.591	51.622	-0.031
61 และ 66	42.857	42.769	0.088
127 และ 128	9.371	9.3210	0.050
128 และ 129	8.588	8.562	0.025
132 และ 133	9.526	9.532	-0.074
135 และ 136	8.940	8.866	-0.086
140 และ 141	16.209	16.137	-0.015

จากการทดลองเปรียบเทียบค่าตำแหน่งที่วัดได้จากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มและเครื่องบราวน์ แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม จะได้ว่าเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มมีค่าความผิดพลาดของทุกตำแหน่งน้อยกว่า +/- 100 ไมโครเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ 88 ไมโครเมตร และมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของทุกตำแหน่งจะมีค่าประมาณ 50 ไมโครเมตร

7.2.2 ชิ้นงานขนาดเล็ก โดยจะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 ชิ้นงานขนาดเล็ก

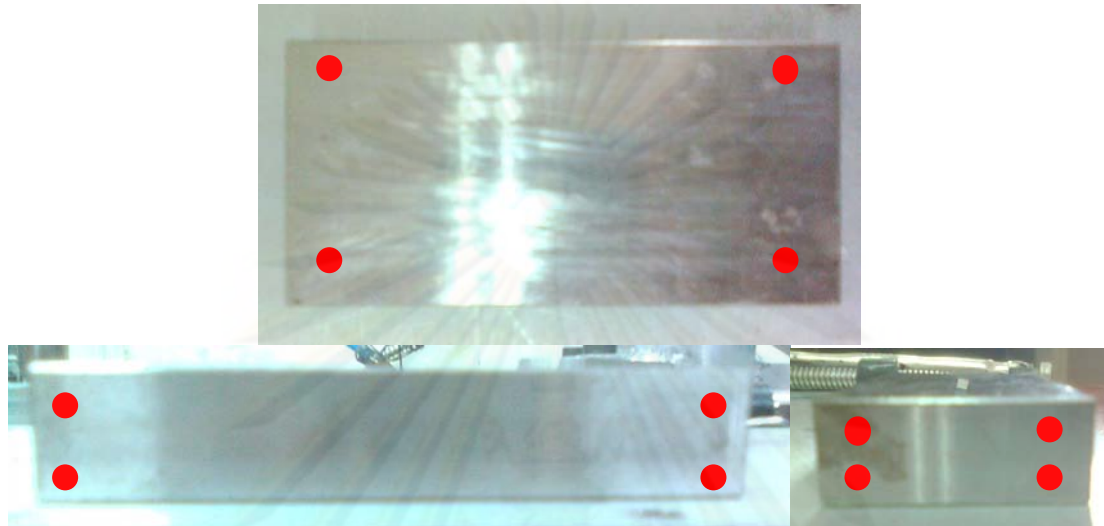
โดยจะทำการจับยึด 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 7.9 และใช้ตัวลู่ก้นำทำการตั้งให้ชิ้นงานมีระนาบเดียวกันกับ เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม



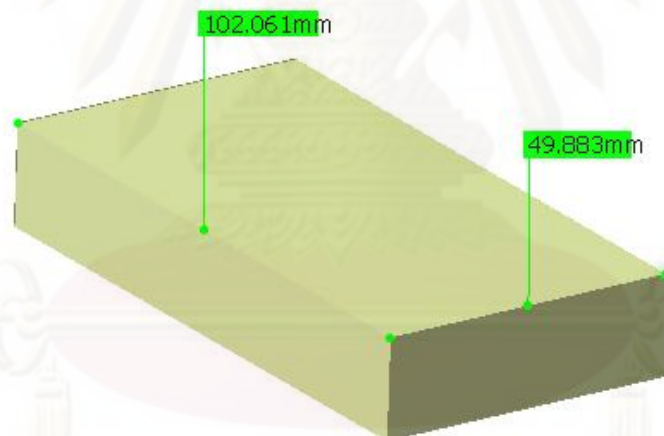
รูปที่ 7.9 รูปแบบการจับยึด 2 รูปแบบของชิ้นงานขนาดเล็ก

เนื่องจากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถล็อกให้เครื่องมีการเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน x, y หรือ z ได้เหมือนกับเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม ทำให้จะต้องใช้วิธีวัดโดยการเก็บค่าด้านแต่ละด้านของชิ้นงานซึ่งมีความเรียบ โดยการเก็บค่าด้านละ 4 จุด ทำการวัด

ทั้งหมด 5 ด้าน คือด้านบนและด้านข้างทั้ง 4 ด้าน (ไม่ต้องใช้ด้านล่างเนื่องจากต้องการทดลองเฉพาะด้านกว้างและด้านยาว) ดังนั้นจะต้องทำการวัดทั้งหมด 20 จุด ดังรูปที่ 7.10 เพื่อใช้ในการสร้างระนาบในโปรแกรมคาเทีย แล้วนำมาหาค่าระยะอีกทีหนึ่ง ดังรูปที่ 7.11 ซึ่งแต่ละแบบจะทำการวัดทั้งหมด 10 ครั้ง แล้วนำค่าที่วัดได้มาเฉลี่ยจะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7.3



รูปที่ 7.10 ตัวอย่างการวัดเก็บค่าจุดด้านละ 4 จุด



รูปที่ 7.11 ระนาบที่สร้างจากจุดที่วัดได้ในโปรแกรมคาเทีย

ตารางที่ 7.3 ผลการทดลองวัดชิ้นงานขนาดเล็ก

การจับยึด	ระยะด้านกว้าง(มม.)			ระยะด้านยาว(มม.)		
	B&S	CU-CMM	ค่าความผิดพลาด	B&S	CU-CMM	ค่าความผิดพลาด
แบบที่ 1	49.886	49.911	0.025	101.912	101.99	0.078
แบบที่ 2	49.87	49.891	0.021	101.915	101.968	0.053

หมายเหตุ B&S หมายถึง เครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

CU-CMM หมายถึง เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม

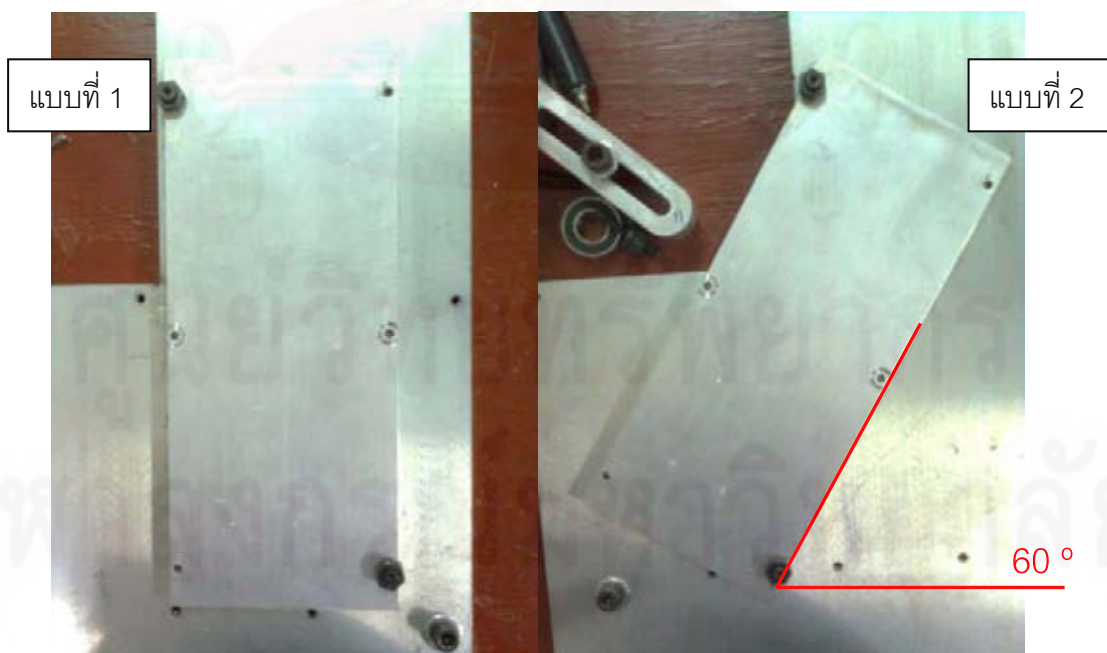
จากตารางที่ 7.3 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมด 10 ครั้ง มีค่าน้อยกว่า ± 100 ไมโครเมตร โดยมีค่ามากที่สุดประมาณ 78 ไมโครเมตร

7.2.3 ชิ้นงานขนาดใหญ่ โดยจะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 ชิ้นงานขนาดใหญ่

โดยจะทำการจับยึด 2 รูปแบบ ดังรูปที่ 7.13 และใช้ตัวลู่ก้นำทำการตั้งให้ชิ้นงานมีระนาบเดียวกันกับเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม



รูปที่ 7.13 รูปแบบการจับยึด 2 รูปแบบของชิ้นงานขนาดใหญ่

วิธีการวัดจะทำเช่นเดียวกับหัวข้อ 7.2.2 จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7.4
ตารางที่ 7.4 ผลการทดลองวัดชิ้นงานขนาดใหญ่

การจับยึด	ระยะด้านกว้าง(มม.)			ระยะด้านยาว(มม.)		
	B&S	CU-CMM	ค่าความผิดพลาด	B&S	CU-CMM	ค่าความผิดพลาด
แบบที่ 1	147.518	147.595	0.077	349.464	349.375	-0.089
แบบที่ 2	147.502	147.474	0.028	349.467	349.56	0.093

หมายเหตุ B&S หมายถึง เครื่องบราวน์แอนด์ซาร์ปซีเอ็มเอ็ม

CU-CMM หมายถึง เครื่องวัดพิกัด 3 มิติซียู-ซีเอ็มเอ็ม

จากตารางที่ 7.4 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมด 10 ครั้ง มีค่าน้อยกว่า +/- 100 ไมโครเมตร โดยมีค่ามากที่สุดประมาณ 93 ไมโครเมตร

7.3 การทดลองใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ในการวัดชิ้นงานตามฟังก์ชันของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม

7.3.1 ฟังก์ชันเครื่องมือวัด (Measurement)

ในที่นี้จะทดลองทำการวัดโดยใช้ชิ้นงาน 2 รูปแบบคือ ทรงกระบอก (ดังรูปที่ 7.14) และ ทรงกลม (ดังรูปที่ 7.15) โดยจะใช้ตัวลูกน้ำในการตั้งให้ระนาบของชิ้นงานมีระนาบเดียวกับของตัวเครื่อง เนื่องจากการวัดวงกลมสามารถวัดได้จากชิ้นงานรูปทรงกระบอก ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 7.14 ชิ้นงานทรงกระบอก



รูปที่ 7.15 ชิ้นงานรูปทรงกลม

รูปทรงกระบอก ทำการทดลองวัดเฉพาะส่วนด้านบนดังรูปที่ 7.16 ซึ่งจะทำการวัดทั้งหมด 5 จุด โดย 3 จุดแรกจะเป็นการวัดวงกลมรอบทรงกระบอกโดยตัวโปรแกรมกำหนดให้การวัด 3 จุดนี้เป็นการวัดในระนาบ X-Y เท่านั้น ดังนั้นจะไม่มีค่าจากแนวแกน z เข้ามาเกี่ยวข้องจึงทำให้สามารถคำนวณค่าวงกลมได้ ส่วน 2 จุดสุดท้ายจะทำการวัดด้านบนและด้านล่างของทรงกระบอก โดยโปรแกรมจะนำเฉพาะค่าในแนวแกน z มาคำนวณเท่านั้น ดังรูปที่ 7.17 ทำการวัดเป็นจำนวน 10 ครั้ง โปรแกรมจะแสดงผลเป็นค่ารัศมี และความสูงของทรงกระบอก จากนั้นนำค่ารัศมีและความสูงมาทำการหารเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม ได้ผลการวัดดังตารางที่ 7.5



รูปที่ 7.16 ส่วนของทรงกระบอกที่จะทำการทดลองกัด



รูปที่ 7.17 การทดลองทำการกัดทรงกระบอก

ตารางที่ 7.5 รัศมีและความสูงของทรงกระบอกที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

ค่าที่วัดได้จากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ครั้งที่	รัศมี (มม.)	ค่าความผิดพลาด (มม.)	ความสูง(มม.)	ค่าความผิดพลาด (มม.)
1	36.949	0.060	24.121	0.015
2	37.045	-0.036	24.135	0.000
3	36.975	0.034	24.128	0.008
4	36.981	0.028	24.124	0.012
5	37.012	-0.003	24.131	0.005
6	36.965	0.044	24.129	0.006
7	36.972	0.037	24.136	0.000
8	37.035	-0.026	24.130	0.006
9	36.958	0.051	24.123	0.012
10	37.004	0.005	24.134	0.002
เฉลี่ย	36.990	0.019	24.129	0.006

ค่าที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

รัศมี (มม.)	ความสูง(มม.)
37.009	24.136

จากตารางที่ 7.5 จะเห็นได้ว่า เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยเทียบจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า +/-100 ไมโครเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดของรัศมีประมาณ 19 ไมโครเมตร และเมื่อทำการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง จะมีค่าความผิดพลาดของรัศมีมากที่สุดประมาณ 60 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของรัศมีของการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง ประมาณ 32 ไมโครเมตร และมีค่าความผิดพลาดของความสูงประมาณ 6 ไมโครเมตร และเมื่อทำการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง จะมีค่าความผิดพลาดของความสูงมากที่สุดประมาณ 15 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของความสูงของการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง ประมาณ 6 ไมโครเมตร

รูปทรงกลม โดยทำการทดลองวัดดังรูปที่ 7.18 ซึ่งจะทำการวัดทั้งหมด 4 จุด เป็นจำนวน 10 ครั้ง โปรแกรมจะแสดงผลค่ารัศมีของทรงกลม แล้วนำค่ารัศมีมาทำการหารเฉลี่ย เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม ได้ผลการวัดดังตารางที่ 7.5



รูปที่ 7.18 การทดลองทำการวัดทรงกลม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.6 รัศมีทรงกลมที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

ค่าที่วัดได้จากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ครั้งที่	รัศมี (มม.)	ค่าความผิดพลาด (มม.)
1	9.607	-0.086
2	9.519	0.002
3	9.583	-0.062
4	9.575	-0.054
5	9.612	-0.091
6	9.524	-0.003
7	9.579	-0.058
8	9.591	-0.070
9	9.584	-0.063
10	9.520	0.001
เฉลี่ย	9.569	-0.049

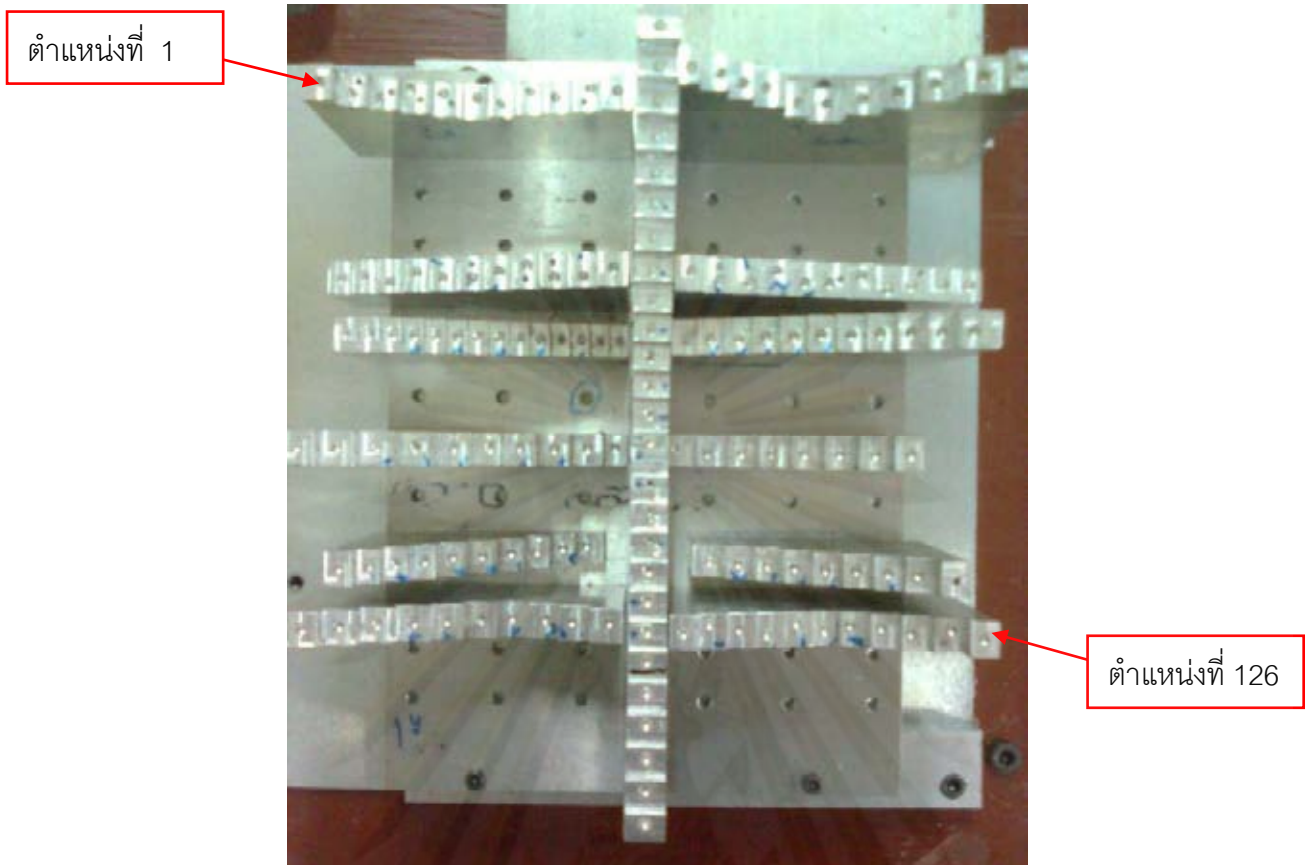
ค่าที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

รัศมี (มม.)
9.521

จากตารางที่ 7.6 จะเห็นได้ว่า เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยเทียบจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า ± 100 ไมโครเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดประมาณ -49 ไมโครเมตร และเมื่อทำการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง จะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ -92 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง ประมาณ 49 ไมโครเมตร

7.3.2 ฟังก์ชันวัดระยะในระนาบ 2 มิติ

จะทดลองโดยการวัดชิ้นงานสอบเทียบ เนื่องจากชิ้นงานสอบเทียบมีตำแหน่งที่ค่อนข้างแน่นอน และสามารถวัดระยะเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มได้ง่าย โดยจะทำการวัดเทียบกับระนาบทั้ง 3 คือ ระนาบ X-Y, Y-Z และ X-Z และทำการวัดตำแหน่งที่ 1 ของชิ้นงานสอบเทียบ เทียบกับตำแหน่งที่ 126 ของชิ้นงานสอบเทียบ เป็นจำนวนทั้งสิ้น 10 ครั้ง ดังรูปที่ 7.19 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7.7



รูปที่ 7.19 ชิ้นงานสอบเทียบและตำแหน่งที่ใช้ในการทดลองวัดระยะในระนาบ 2 มิติ และ 3 มิติ ตารางที่ 7.7 ค่าระยะในระนาบ 2 มิติ ที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

ครั้งที่	ระยะในแนวแกน X-Y (มม.)	ค่าความผิดพลาด (มม.)	ระยะในแนวแกน Y-Z (มม.)	ค่าความผิดพลาด (มม.)
1	257.615	-0.031	160.357	-0.072
2	257.648	-0.064	160.276	0.009
3	257.582	0.002	160.292	-0.007
4	257.602	-0.017	160.361	-0.076
5	257.591	-0.007	160.334	-0.049
6	257.633	-0.048	160.338	-0.053
7	257.624	-0.040	160.379	-0.094
8	257.589	-0.005	160.344	-0.059
9	257.680	-0.096	160.287	-0.002
10	257.614	-0.029	160.305	-0.020
เฉลี่ย	257.618	-0.033	160.327	-0.043

ตารางที่ 7.7 (ต่อ)

ครั้งที่	ระยะในแนวแกน X-Z (มม.)	ค่าความผิดพลาด (มม.)
1	201.589	0.072
2	201.564	0.097
3	201.597	0.064
4	201.612	0.049
5	201.582	0.079
6	201.624	0.037
7	201.569	0.092
8	201.638	0.023
9	201.620	0.041
10	201.657	0.004
เฉลี่ย	201.605	0.055

ค่าที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

ระยะในแนวแกน X-Y (มม.)	257.585
ระยะในแนวแกน Y-Z (มม.)	160.285
ระยะในแนวแกน X-Z (มม.)	201.661

จากตารางที่ 7.7 จะเห็นได้ว่า เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยเทียบจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า +/-100 ไมโครเมตร โดยสำหรับระนาบ X-Y มีค่าความผิดพลาดประมาณ -33 ไมโครเมตร สำหรับระนาบ Y-Z มีค่าความผิดพลาดประมาณ -43 ไมโครเมตรและสำหรับระนาบ X-Z มีค่าความผิดพลาดประมาณ 55 ไมโครเมตร และเมื่อทำการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง สำหรับระนาบ X-Y จะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ -96 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง ประมาณ 34 ไมโครเมตร สำหรับระนาบ Y-Z จะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ -94 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง ประมาณ 44 ไมโครเมตร และสำหรับระนาบ X-Z จะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ 97 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง ประมาณ 55 ไมโครเมตร

7.3.3 ฟังก์ชันวัดระยะใน 3 มิติ

จะทดลองโดยการวัดชิ้นงานงานสอบเทียบ เนื่องจากชิ้นงานสอบเทียบมีตำแหน่งที่ค่อนข้างแน่นอน และสามารถวัดระยะเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มได้ง่าย โดยจะทำการวัดตำแหน่งที่ 1 ของชิ้นงานสอบเทียบ เทียบกับตำแหน่งที่ 126 ของชิ้นงานสอบเทียบ ดังรูปที่ 7.19 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 ค่าระยะในระบบ 3 มิติ ที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

ค่าที่วัดได้จากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ค่าที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

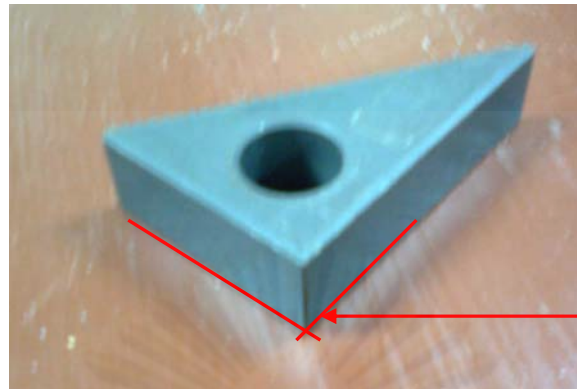
ครั้งที่	ระยะ (มม.)	ค่าความผิดพลาด (มม.)
1	257.628	-0.027
2	257.573	0.028
3	257.536	0.065
4	257.559	0.042
5	257.597	0.004
6	257.610	-0.009
7	257.572	0.029
8	257.530	0.071
9	257.588	0.013
10	257.611	-0.010
เฉลี่ย	257.580	0.020

ระยะ (มม.)
257.601

จากตารางที่ 7.8 จะเห็นได้ว่า เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยเทียบจากค่าเฉลี่ยน้อยกว่า ± 100 ไมโครเมตร โดยมีค่าความผิดพลาดประมาณ 20 ไมโครเมตร และเมื่อทำการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง จะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดประมาณ 71 ไมโครเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง ประมาณ 30 ไมโครเมตร

7.3.4 ฟังก์ชันวัดมุม

จะทดลองโดยการวัดชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 7.20 โดยจะใช้ตัวลูกน้ำในการตั้งระนาบของชิ้นงานให้ตรงกับระนาบของเครื่องก่อน แล้วจึงทำการทดลองวัดในระนาบ X-Y เท่านั้น จะไม่มีนำค่า z มาใช้ในการคำนวณ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7.9



มุมที่ทำการวัด

รูปที่ 7.20 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองวัดมุม

ตารางที่ 7.9 ค่ามุมที่วัดได้ด้วยเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มเปรียบเทียบกับผลที่วัดได้ด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม บราวน์แอนด์ชาร์ป

ค่าที่วัดได้จากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม

ครั้งที่	มุม (องศา)	ค่าความผิดพลาด (องศา)
1	89.96	0.03
2	89.96	0.02
3	89.95	0.04
4	89.97	0.02
5	89.97	0.01
6	90.00	-0.02
7	89.98	0.01
8	90.00	-0.02
9	90.01	-0.03
10	89.94	0.04
เฉลี่ย	89.97	0.01

ค่าที่วัดได้จากเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

มุม (องศา)
89.98

จากตารางที่ 7.9 จะเห็นได้ว่า เครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มมีค่าความผิดพลาดของการวัดมุมโดยเทียบกับค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.01 องศา และเมื่อทำการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง จะมีค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 0.04 องศา โดยมีค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความผิดพลาดของการเทียบกับการวัดแต่ละครั้ง เท่ากับ 0.02 องศา

7.4 การทดลองใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ในการถอดแบบ

การทดลองในส่วนนี้จะใช้ฟังก์ชันสแกนออบเจกต์ (Scan Object) ในการเก็บค่าจุดต่างๆ เพื่อใช้ในการถอดแบบและนำค่าจุดต่างๆที่บันทึกได้มาสร้างเป็นแบบด้วยโปรแกรมคาเทียต่อไป โดยในการถอดแบบมีขั้นตอนดังนี้ (จะขอกล่าวพร้อมๆกับตัวอย่างที่ 1)

7.4.1 ตัวอย่างที่ 1

(1) เตรียมชิ้นงานที่ต้องการทำการถอดแบบ ซึ่งในตัวอย่างที่ 1 จะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 7.21 ในการถอดแบบ



รูปที่ 7.21 ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบ ตัวอย่างที่ 1

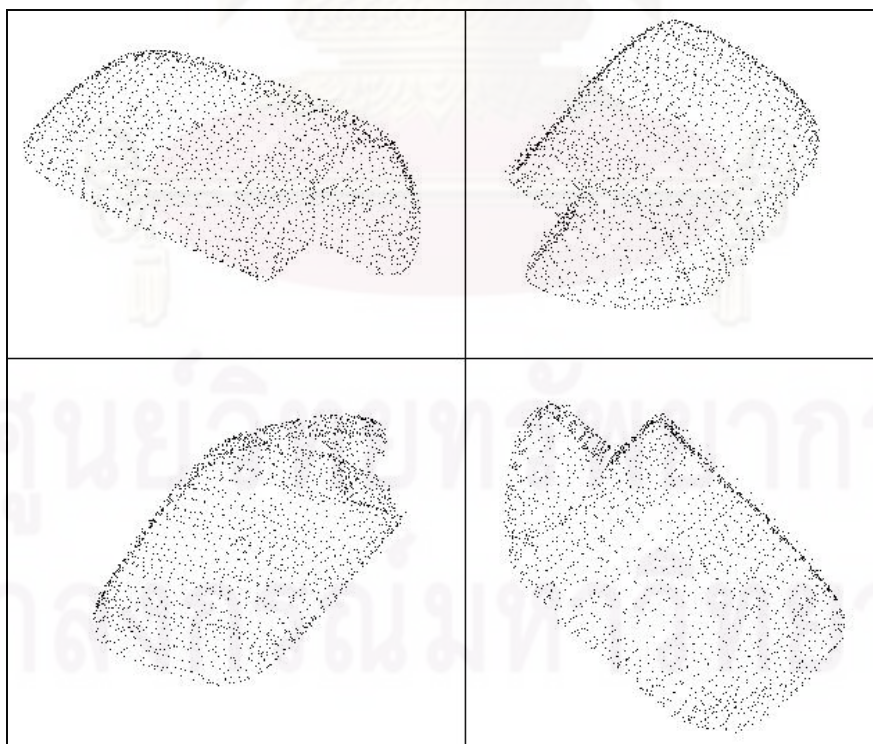
- (2) ทำการยึดชิ้นงานเข้ากับโต๊ะของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม
- (3) ใช้ฟังก์ชันอะไลน์เมนต์ (Alignment) เพื่อตั้งตำแหน่งอ้างอิงให้กับชิ้นงาน
- (4) เลือกรูปแบบการวัด เป็นแบบเก็บค่าเมื่อกดสวิทช์ (push the switch) หรือแบบกดสวิทช์ค้าง (continue scan) และทำการวัดตำแหน่งของชิ้นงาน โดยในที่นี้จะเลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ push the switch และใช้หัววัดแบบเข็มในการวัด (รูปที่ 7.22) เนื่องจากจะชิ้นงานมีขนาดไม่ใหญ่ และจะได้ค่าที่แม่นยำกว่าหัววัดแบบทรงกลม



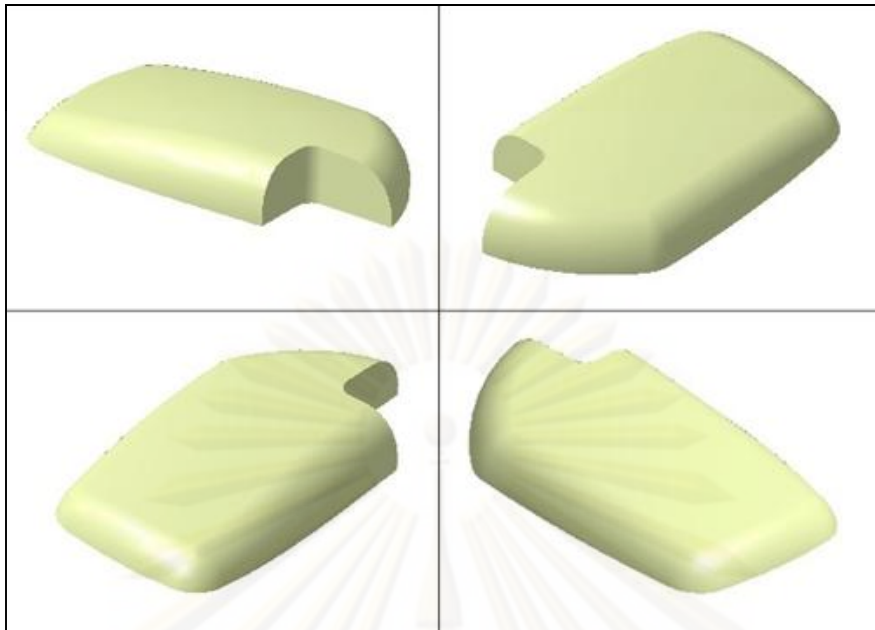
รูปที่ 7.22 หัววัดแบบเข็ม ตัวอย่างที่ 1

(5) บันทึกค่าตำแหน่งที่วัดได้โดยบันทึกให้อยู่ในรูปแบบไฟล์นามสกุล.CGO_ASCII ซึ่งเป็นรูปแบบไฟล์นามสกุลรูปแบบหนึ่งที่โปรแกรมคาคีเยรองรับ

(6) ส่งข้อมูลนี้ไปยังโปรแกรมคาคีเย โดยข้อมูลที่ส่งเข้าไปในโปรแกรมคาคีเยจะแสดงผลออกเป็นกลุ่มก้อนของจุด (point cloud) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7.23 และจากกลุ่มก้อนของจุดที่นำเข้ามาสามารถใช้โปรแกรมคาคีเยสร้างพื้นผิวซึ่งแสดงในรูปที่ 7.24 โดยในที่นี้เป็นพื้นผิวที่ได้ทำการปรับแต่งให้เรียบแล้ว



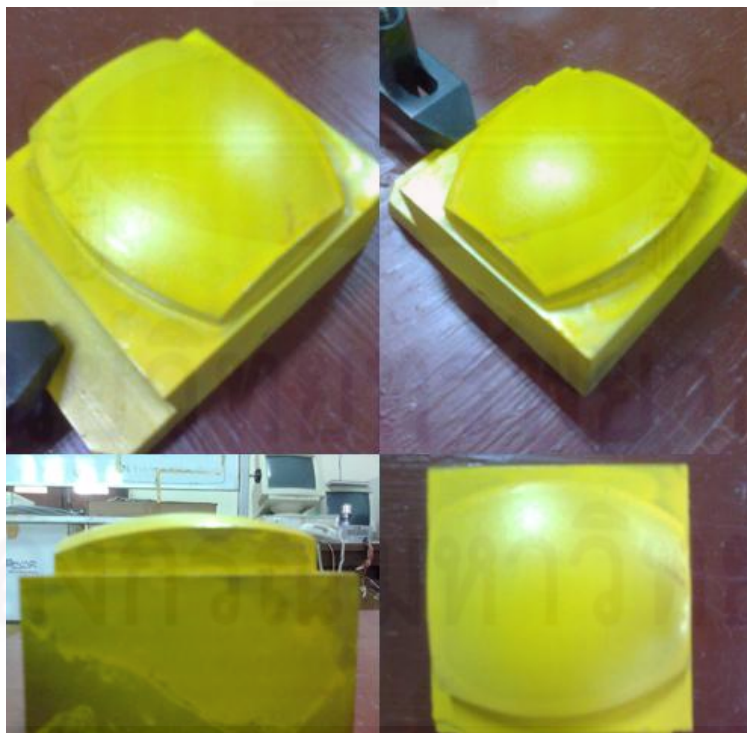
รูปที่ 7.23 กลุ่มก้อนของจุด ตัวอย่างที่ 1



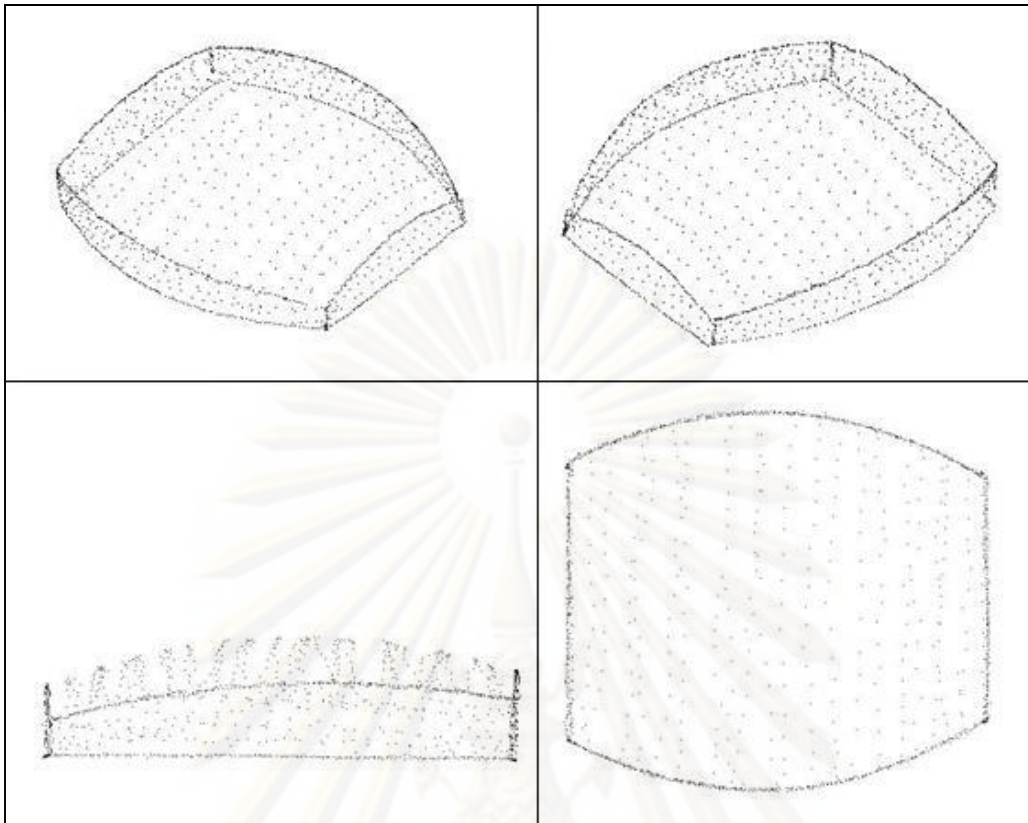
รูปที่ 7.24 การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 1

7.4.2 ตัวอย่างที่ 2

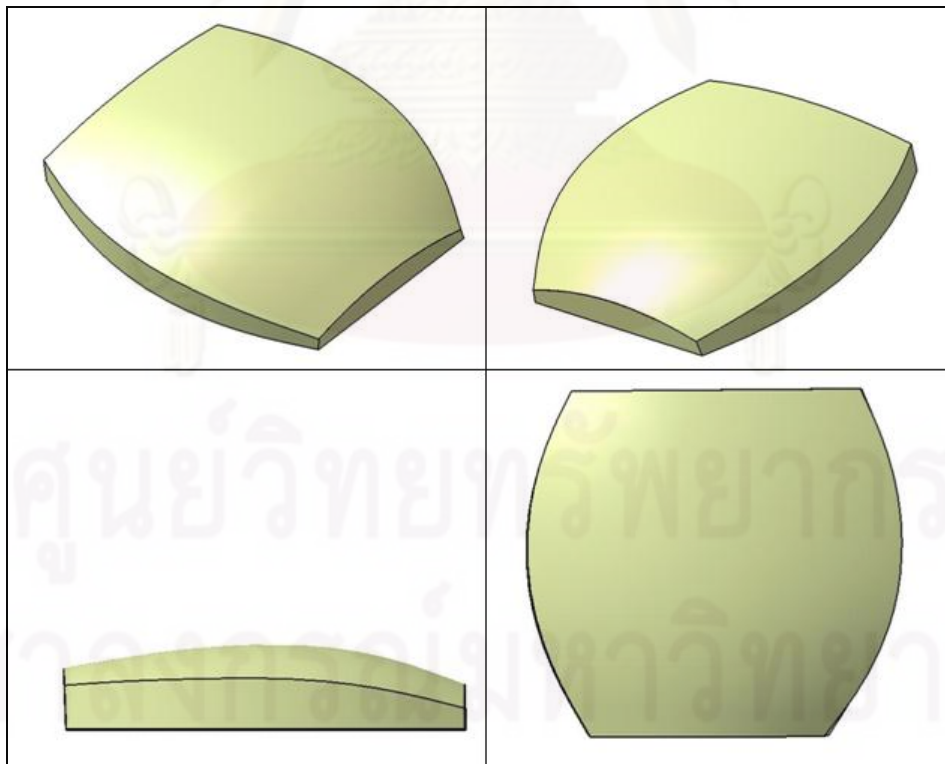
ในตัวอย่างนี้จะแสดงถึงความสามารถของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม ที่สามารถเก็บค่าจุดบนขอบของชิ้นงานได้ ดังนั้นในตัวอย่างนี้จึงจะเน้นการเก็บจุดบนขอบของชิ้นงาน ซึ่งจะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 7.25 และจะได้กลุ่มก้อนของจุดดังรูปที่ 7.26 และจะได้พื้นผิวดังรูปที่ 7.27 โดยในที่นี้เป็นพื้นที่ผิวที่ได้ทำการปรับแต่งให้เรียบแล้ว



รูปที่ 7.25 ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบ ตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 7.26 กลุ่มก้อนของจุด ตัวอย่างที่ 2



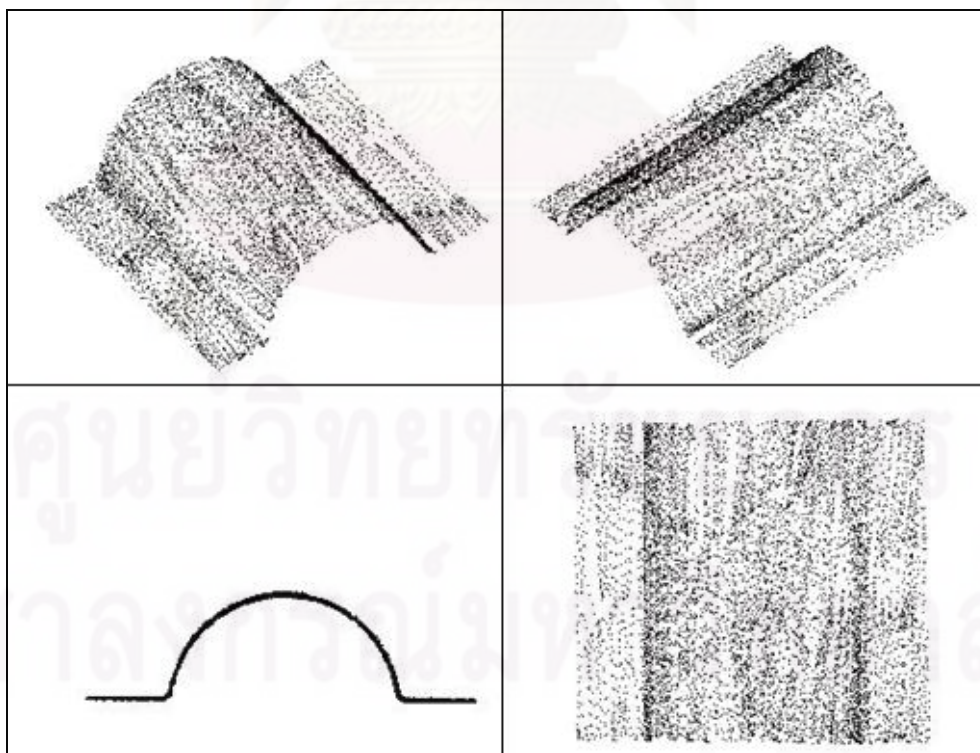
รูปที่ 7.27 การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 2

7.4.3 ตัวอย่างที่ 3

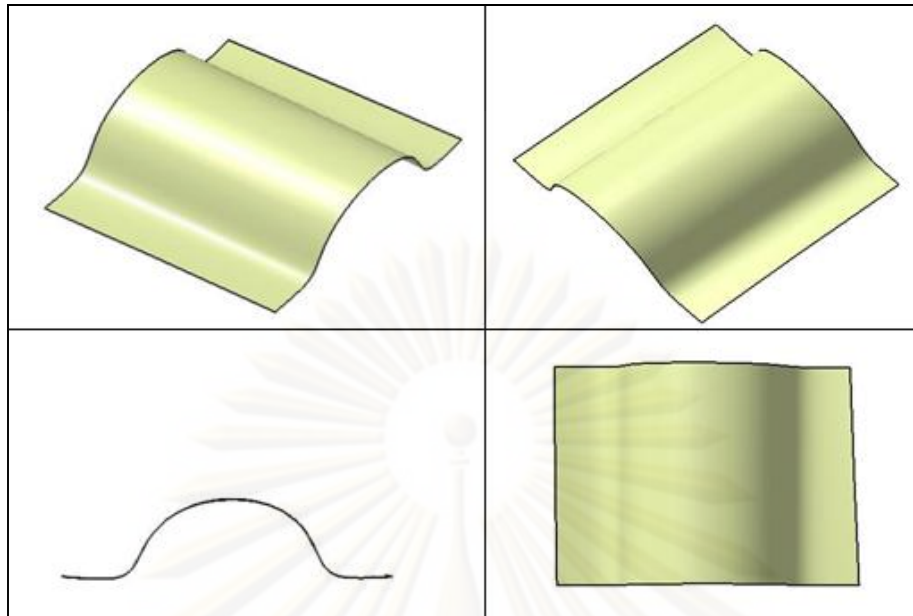
ในตัวอย่างนี้จะแสดงถึงการเก็บจุดของรูปทรงระบอก โดยจะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 7.28 และจะได้กลุ่มก้อนของจุดดังรูปที่ 7.29 และจะได้พื้นผิวดังรูปที่ 7.30 โดยในที่นี้เป็นพื้นที่ผิวที่ได้ทำการปรับแต่งให้เรียบแล้ว



รูปที่ 7.28 ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบ ตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 7.29 กลุ่มก้อนของจุด ตัวอย่างที่ 3



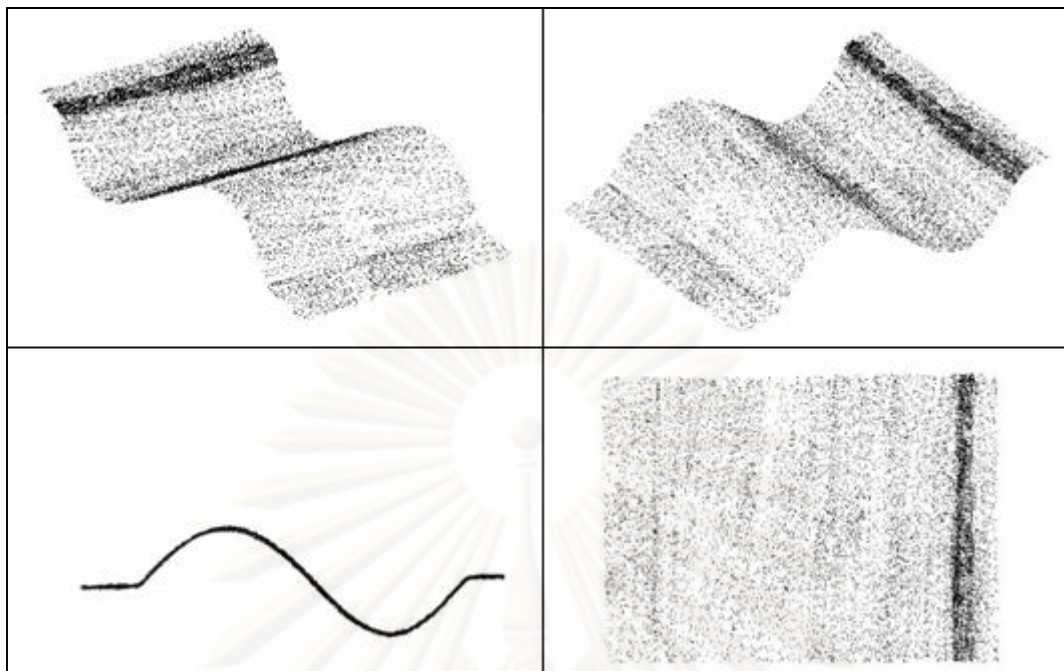
รูปที่ 7.30 การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 3

7.4.4 ตัวอย่างที่ 4

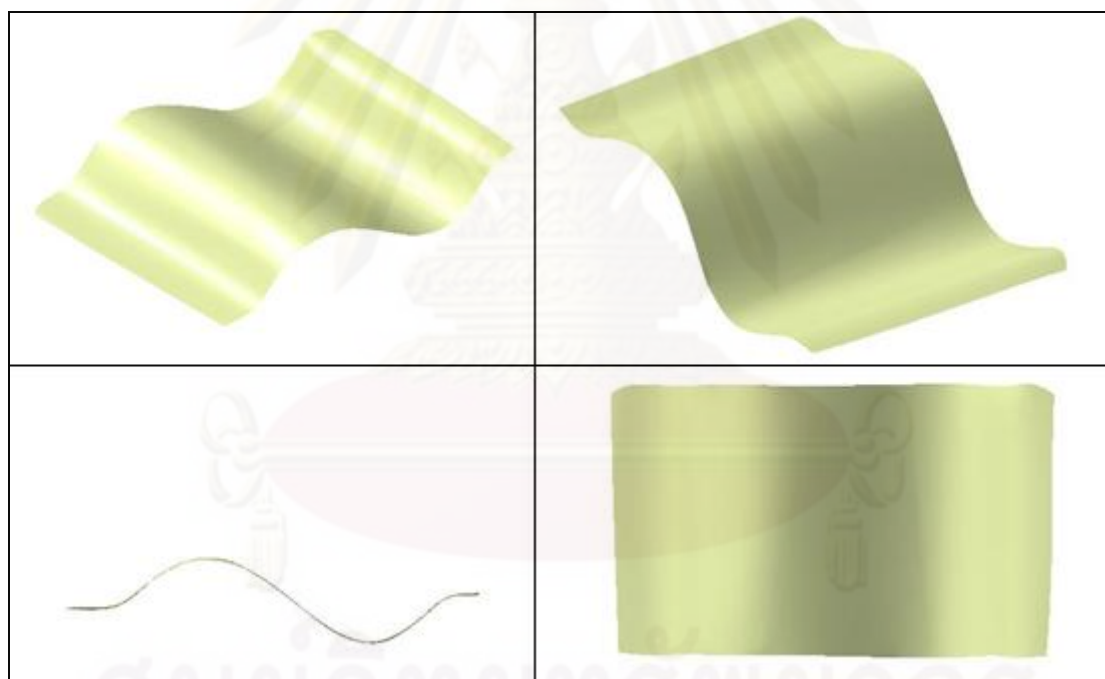
ในตัวอย่างนี้จะแสดงถึงการเก็บจุดของรูปทรงโค้งทั่วไป โดยจะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 7. 31 และจะได้กลุ่มก้อนของจุดดังรูปที่ 7.32 และจะได้พื้นผิวดังรูปที่ 7.33 โดยในที่นี้เป็นพื้นผิวที่ได้ทำการปรับแต่งให้เรียบแล้ว



รูปที่ 7.31 ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบ ตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 7.32 กลุ่มก้อนของจุด ตัวอย่างที่ 4



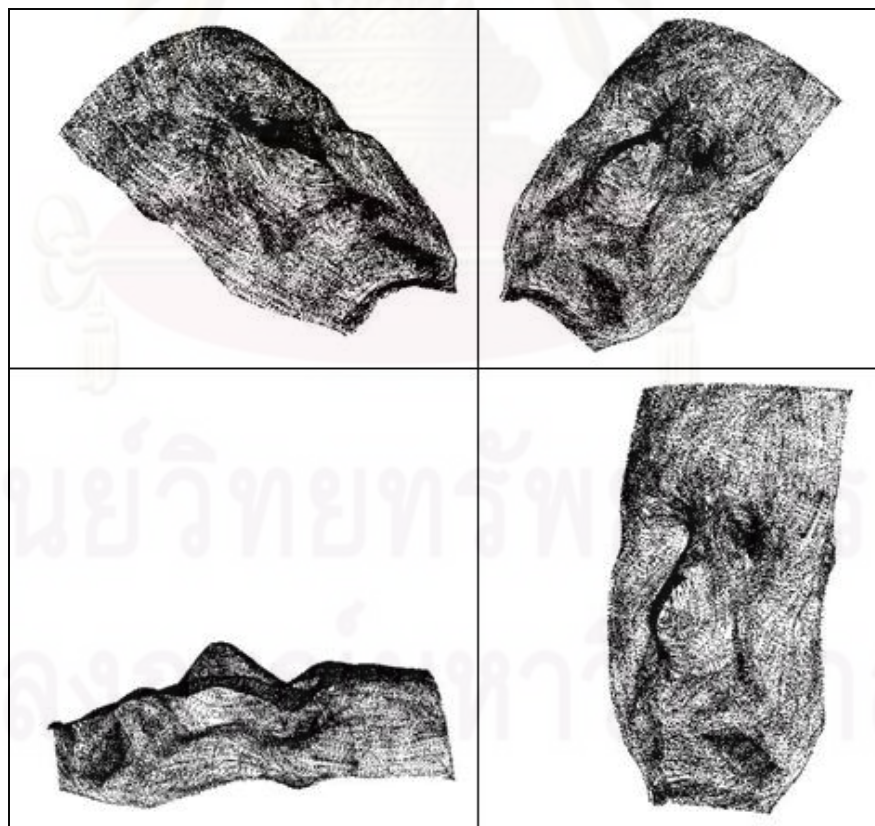
รูปที่ 7.33 การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 4

7.4.5 ตัวอย่างที่ 5

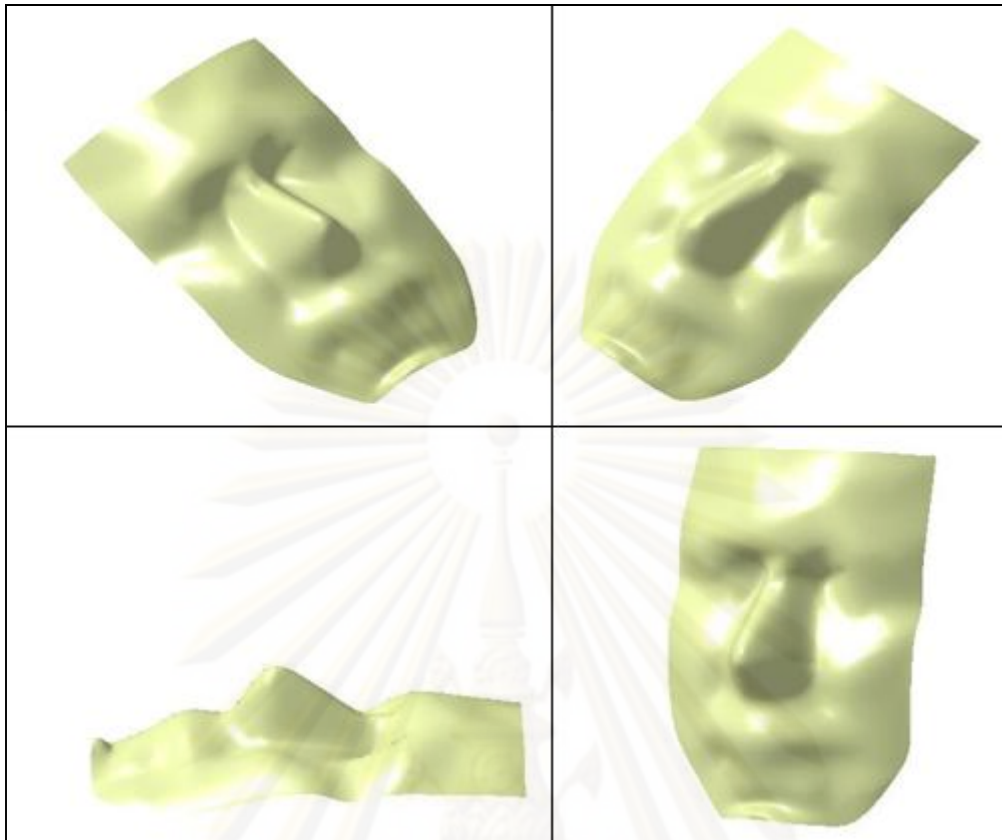
ในตัวอย่างนี้จะแสดงถึงการเก็บจุดรูปหน้าคนที่มีความซับซ้อนมาก โดยจะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 7.34 และจะได้กลุ่มก้อนของจุดดังรูปที่ 7.35 และจะได้พื้นผิวดังรูปที่ 7.36 โดยในที่นี้เป็นพื้นผิวที่ได้ทำการปรับแต่งให้เรียบแล้ว



รูปที่ 7.34 ชิ้นงานที่นำมาถอดแบบ ตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 7.35 กลุ่มก้อนของจุด ตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 7.36 การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 5

7.5 การทดลองใช้งานเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่เกินกว่าพื้นที่ทำงาน (Workspace)

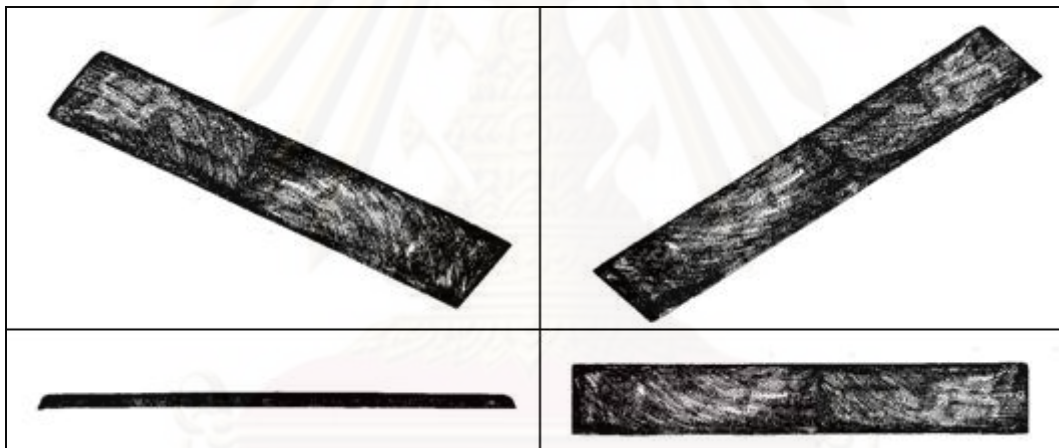
การทดลองในส่วนนี้จะใช้ฟังก์ชันฮิวจ์โปรเจค (Huge Project) ในการเก็บค่าจุดต่างๆ และมีส่วนของการตั้งค่าอ้างอิงเพื่อใช้อ้างอิงในการวัดหลังจากที่ทำการเคลื่อนที่ตัวเครื่องแล้ว โดยค่าจุดต่างๆที่บันทึกได้ ก็นำมาสร้างเป็นแบบด้วยโปรแกรมคาเทียต่อไป ในส่วนนี้มีขั้นตอนดังนี้ (จะขอกล่าวพร้อมตัวอย่างที่ 1)

7.5.1 ตัวอย่างที่ 1

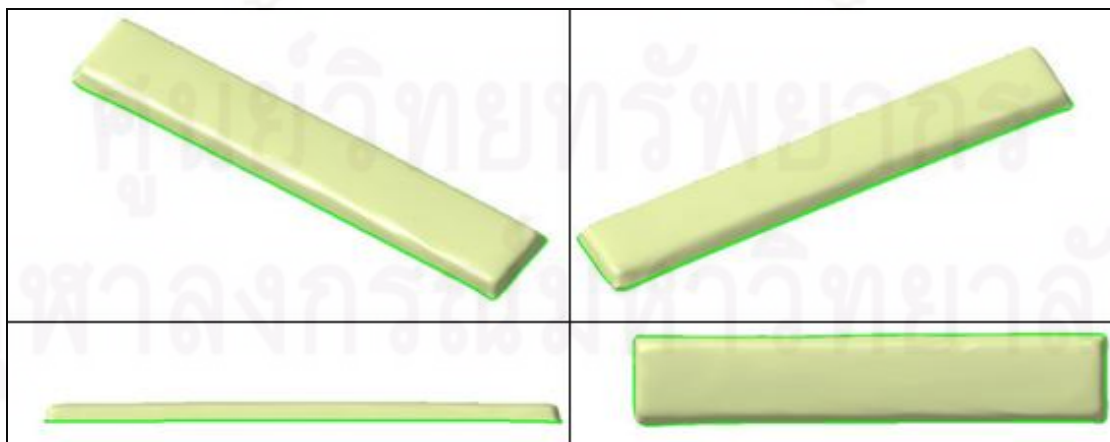
ในตัวอย่างนี้จะแสดงการทำการวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ที่ต้องทำการเลื่อนตัวแขนกลเพื่อทำการวัด โดยจะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 7.37 ซึ่งเป็นชิ้นงานเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 6 ดังนั้นจึงไม่ขออธิบายวิธีการวัดอีก ซึ่งจะได้ผลการวัดเป็นกลุ่มก้อนของจุด ดังรูปที่ 7.38 และจากกลุ่มก้อนของจุดที่นำเข้ามา สามารถใช้โปรแกรมคาเทียสร้างพื้นผิวและแบบจากกลุ่มก้อนของจุดเหล่านี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 7.39



รูปที่ 7.37 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชัน Huge Project ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 7.38 กลุ่มก้อนของจุดที่วัดได้ ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 7.39 การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 1

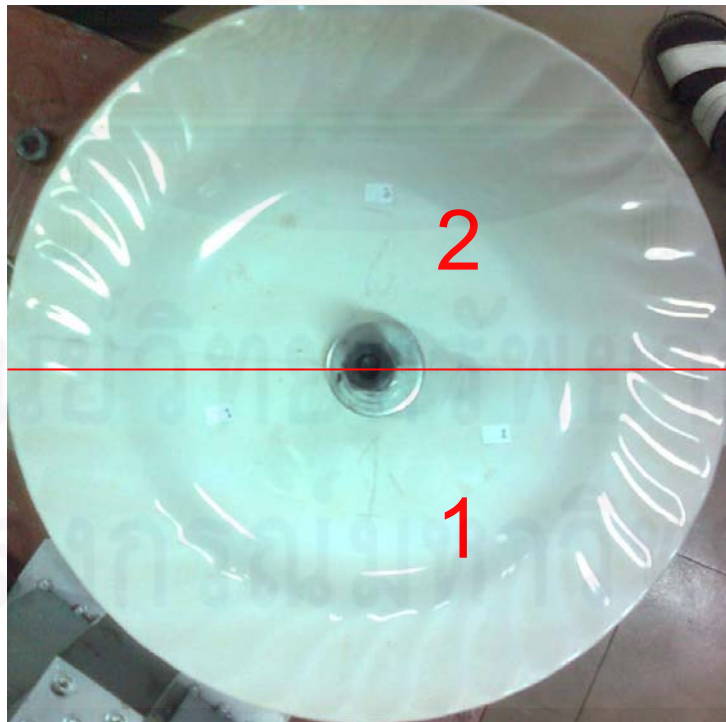
จากตัวอย่างที่ 1 นี้ สรุปได้ว่าเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มสามารถเคลื่อนย้ายตัวเครื่องเพื่อใช้วัดชิ้นงานขนาดใหญ่ได้

7.5.2 ตัวอย่างที่ 2

ในตัวอย่างนี้จะแสดงการทำการวัดชิ้นงานที่มีพื้นผิวทั้งด้านบนและด้านใต้ของชิ้นงาน ที่ต้องทำการเลื่อนตัวชิ้นงานเพื่อทำการวัด โดยใช้จานเซรามิคเป็นชิ้นงานดังรูปที่ 7.40



รูปที่ 7.40 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบฟังก์ชัน Huge Project ตัวอย่างที่ 2 จะทำการวัดชิ้นงานโดยแบ่งพื้นที่ ที่จะทำการวัดออกเป็น 2 พื้นที่ และทำการติดจุดอ้างอิง 3 จุด ซึ่งจะต้องติดอยู่บนตัวชิ้นงานเท่านั้น โดยจะกำหนดไว้เป็นจุดสีขาว เนื่องจากในการวัดจะใช้ปลายหัววัดแบบหัวแหลมซึ่งในการวัดจะทำให้เกิดจุดลงบนจุดอ้างอิงทำให้สามารถมองเห็นได้ง่าย เพื่อใช้ในการเลื่อนจุด ดังรูปที่ 7.41



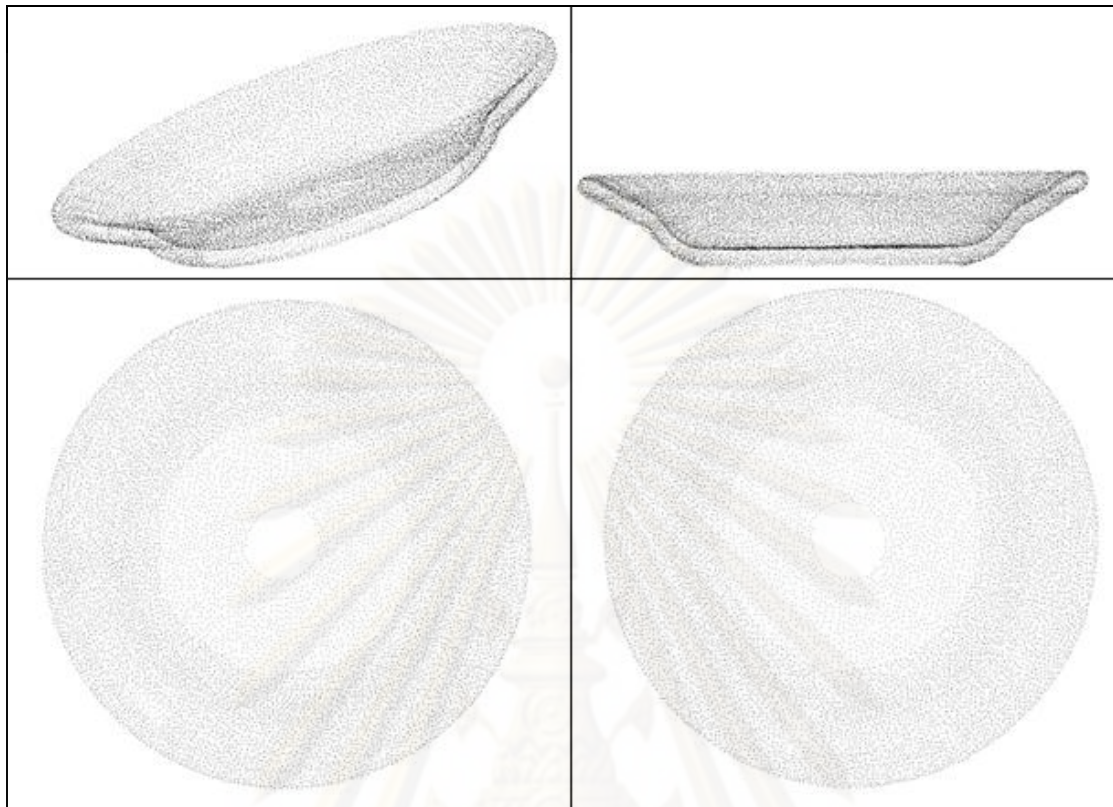
รูปที่ 7.41 การแบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วนและการติดจุดอ้างอิง 3 จุด ตัวอย่างที่ 2

จากนั้นทำการวัดพื้นที่ในส่วนที่ 1 ก่อน ทั้งด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน ดังรูปที่ 7.42

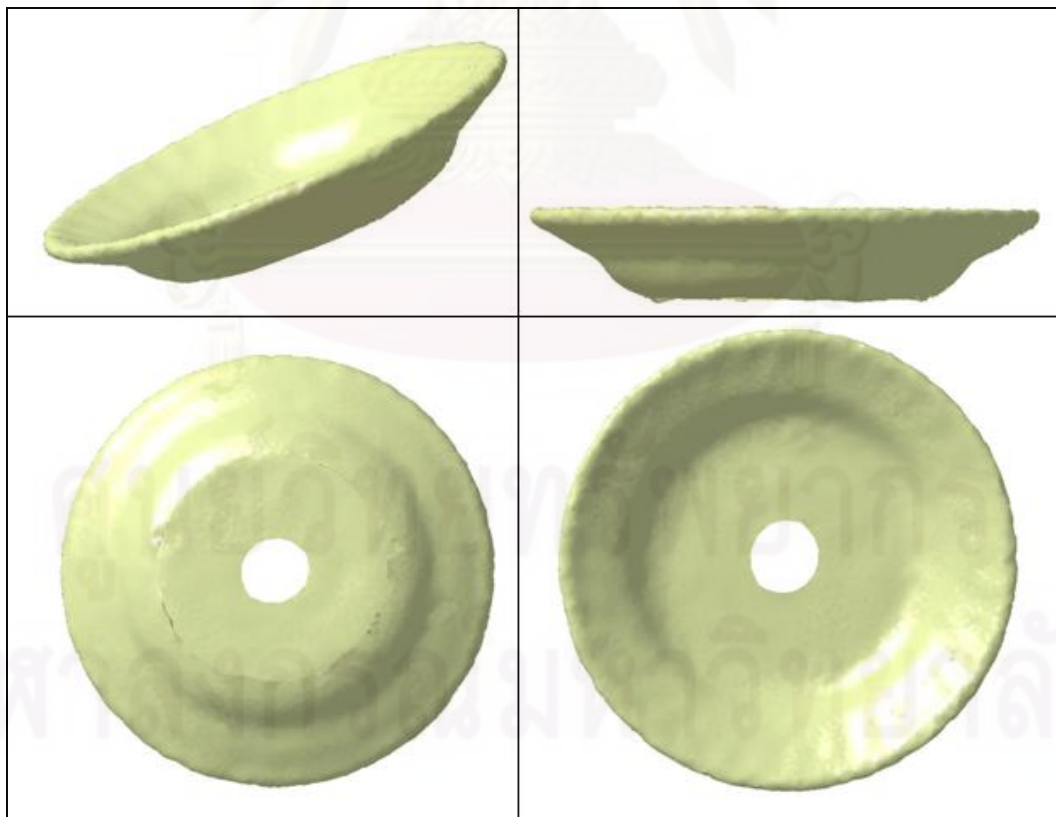


รูปที่ 7.42 การวัดพื้นผิวทั้งด้านบนและด้านล่างของชิ้นงาน ตัวอย่างที่ 2

เมื่อวัดเสร็จแล้วจึงทำการตั้งจุดอ้างอิงตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในตัวอย่างที่ 1 แต่ในตัวอย่างนี้เปลี่ยนจากการที่ต้องเลื่อนตัวแขนกลเพื่อทำการวัดในจุดที่ไม่ถึงเป็นการเลื่อนตัวชิ้นงานแทน โดยเลื่อนให้พื้นที่ ที่ 2 ของชิ้นงานมาอยู่แทนที่ในพื้นที่ ที่ 1 ของชิ้นงาน แล้วทำการวัดต่อไปจนเสร็จ จะได้กลุ่มก้อนของจุดดังรูปที่ 7.43 และได้พื้นผิวของชิ้นงานดังรูปที่ 7.44 โดยในที่นี้เป็นพื้นที่ผิวที่ยังไม่ได้ทำการปรับแต่งให้เรียบ เป็นพื้นที่ผิวที่ได้จากการต่อจุด 3 จุดที่ใกล้ที่สุดเท่านั้น



รูปที่ 7.43 กลุ่มก้อนของจุดที่วัดได้ ตัวอย่างที่ 2

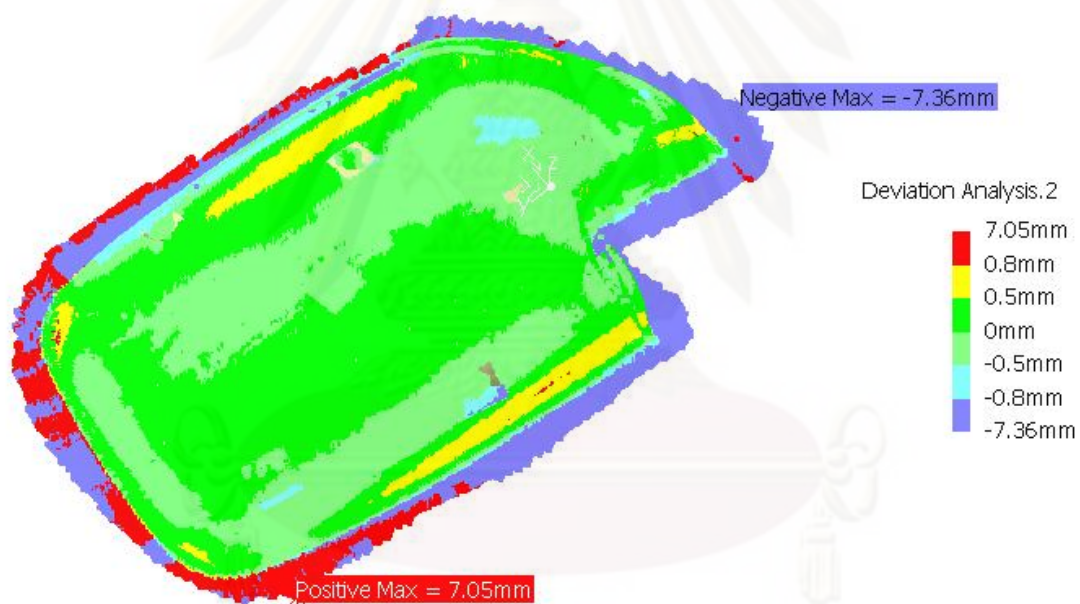


รูปที่ 7.44 การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มก้อน ตัวอย่างที่ 2

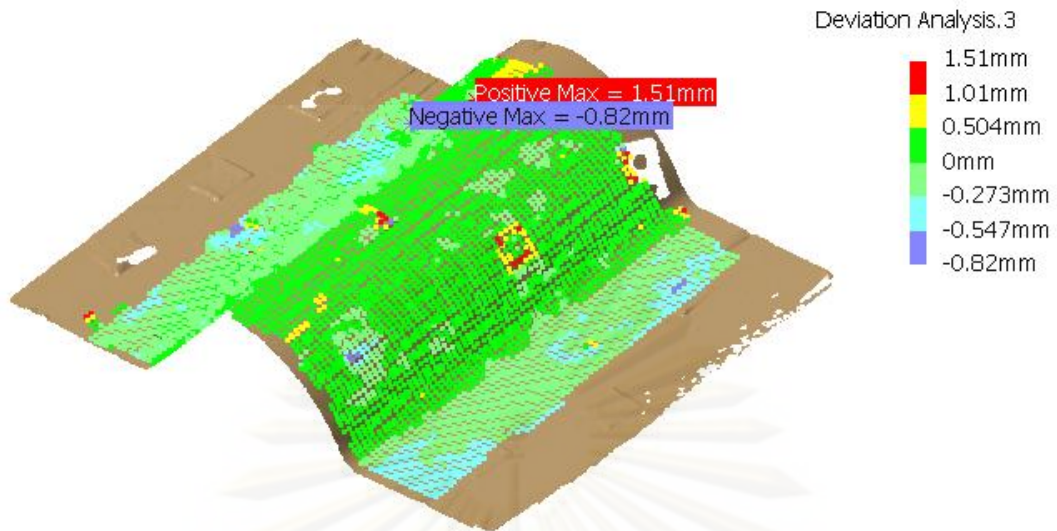
7.6 การทดลองเปรียบเทียบพื้นผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็มกับพื้นผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดพื้นผิว 3 มิติ (3D Scan GOM)

เครื่อง GOM (ภาคผนวก ก) เป็นเครื่องวัดพื้นผิว 3 มิติ ที่ใช้หลักการจับภาพด้วยกล้อง 2 ตัว แล้วตัวโปรแกรมสามารถทำการคำนวณและสร้างเป็นพื้นผิวได้ (รายละเอียดวิธีการใช้ไม่ขอกล่าวในที่นี้)

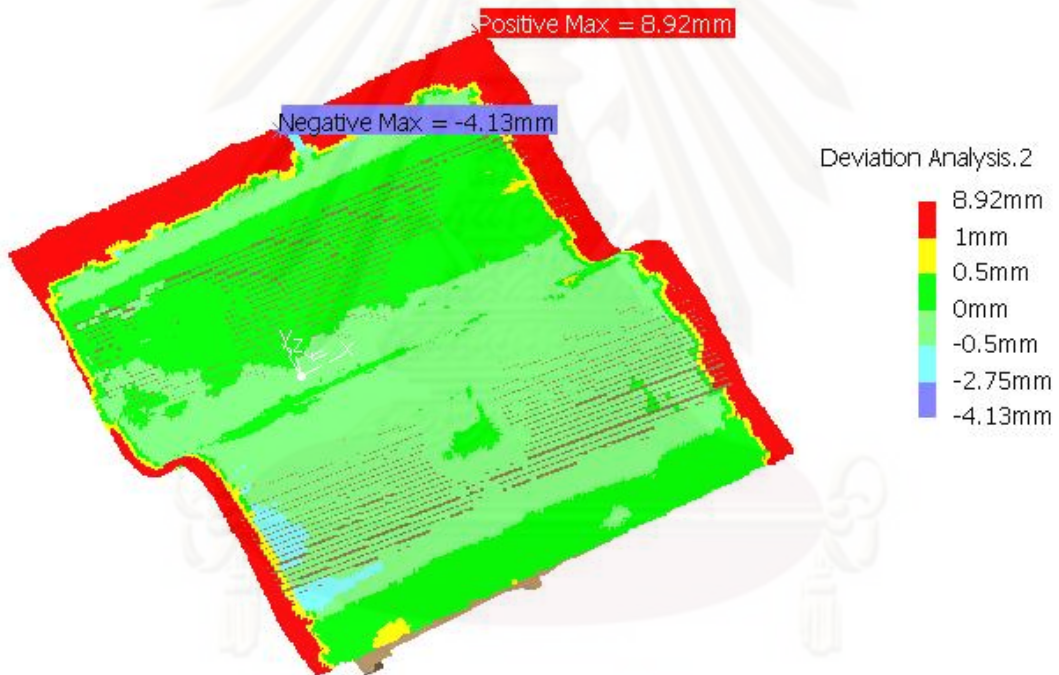
โดยจะทำการเปรียบเทียบโดยใช้พื้นผิวที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมค่าเทียบของค่ากลุ่มก้อนของจุดที่วัดได้จากเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มกับพื้นผิวที่ได้จากการขึ้นรูปด้วยโปรแกรมค่าเทียบของค่ากลุ่มก้อนของจุดที่วัดได้จากเครื่อง GOM โดยนำพื้นผิว 2 พื้นผิวที่ได้มาทำการซ้อนกันโดยใช้วิธีระยะห่างระหว่างพื้นผิวเฉลี่ยกำลังสองที่น้อยที่สุด ในการเปรียบเทียบ ซึ่งขอแสดงการเปรียบเทียบเฉพาะชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.1 ได้ดังรูปที่ 7.45, หัวข้อที่ 7.4.3 ได้ดังรูปที่ 7.46, หัวข้อที่ 7.4.4 ได้ดังรูปที่ 7.47 และหัวข้อที่ 7.4.5 ได้ดังรูปที่ 7.48



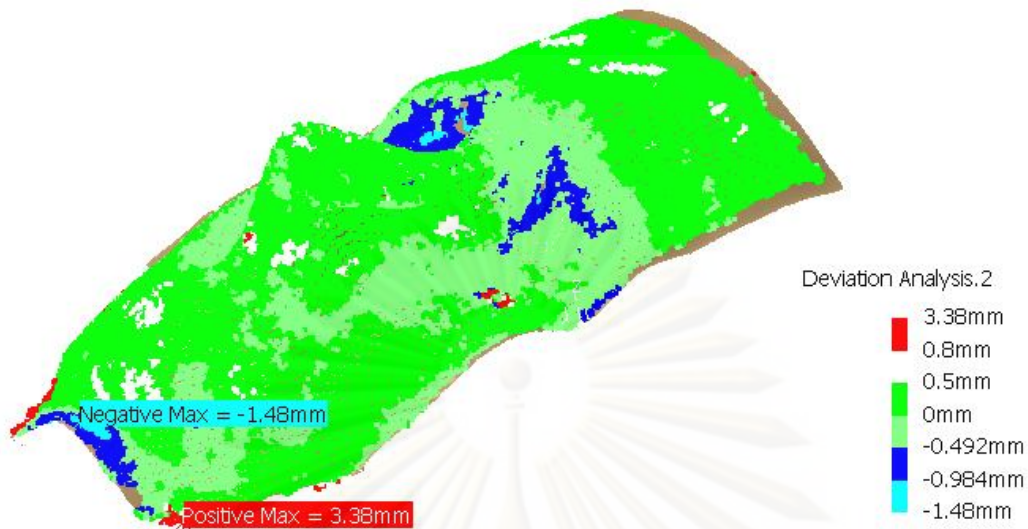
รูปที่ 7.45 การเปรียบเทียบชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.1



รูปที่ 7.46 การเปรียบเทียบชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.3



รูปที่ 7.47 การเปรียบเทียบชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.4



รูปที่ 7.48 การเปรียบเทียบชิ้นงานในหัวข้อที่ 7.4.5

จากรูปที่ 7.45 - 7.48 สามารถสรุปได้ว่าพื้นผิวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม มีความสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวอยู่ในช่วงประมาณ +/- 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถทำการปรับระยะได้ในโปรแกรมขึ้นรูปต่อไป

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการปรับปรุงและพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ซียู-ซีเอ็มเอ็ม ทั้งในส่วนของตัวเครื่องและส่วนของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม ให้มีความสะดวกและหลากหลายในการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยจากการทดลองพบว่า

- (1) มีค่าความถูกต้องน้อยกว่า +/- 100 ไมโครเมตร
- (2) มีพื้นที่ทำงาน (Working space) 300x300x200 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และสามารถเพิ่มพื้นที่การทำงานของเครื่องโดยการย้ายตัวเครื่องได้
- (3) อุปกรณ์ที่ช่วยในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้นมีความสะดวกในการใช้งานและมีความแม่นยำเพียงพอในการใช้งานตามขอบเขตที่ได้กำหนดไว้
- (4) เครื่องมีน้ำหนักเบา สามารถใช้งานได้ด้วยมือเดียว
- (5) โปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็มมีฟังก์ชันที่หลากหลายและได้โปรแกรม/วิธีการในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่า Working space หรืองานที่จำเป็นต้องเคลื่อนย้ายอุปกรณ์วัด

8.2 ปัญหาและอุปสรรคของการทำการวิจัย

8.2.1 ปัญหาของตัวเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม

- (1) ฮาร์ดไดรฟ์มีน้ำหนักมาก ทำให้ตัวแขนกลมีน้ำหนักมากขึ้นตามไปด้วย
- (2) โครงสร้างของตัวแขนกล ทำการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูงได้ยาก ทำให้ต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย ดังนั้นจึงอาจเกิดความผิดพลาดจากการคำนวณได้
- (3) หัววัดแบบเข็มอาจทำให้เกิดรอยบนชิ้นงานได้ เนื่องจากมีความแหลมคมมาก
- (4) ในการใช้งานหัววัดแบบเข็ม ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่าหัวกลม วัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ มีความลำบากในการวัดเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถวัดได้ที่ละจุดเท่านั้น
- (5) หัววัดแบบหัวกลมมีความแข็งแรงมาก จึงอาจเกิดการหักของหัววัดได้ ทำให้การใช้งานต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างสูง
- (6) สฐานของตัวเครื่องไม่สามารถยึดได้ทุกสถานที่ เนื่องจากมีการยึดแบบขันเกลียวเท่านั้น

8.2.2 ปัญหาของการสอบเทียบ

- (1) หัววัดที่ใช้ในการสอบเทียบไม่ใช่ระบบสัมผัส ดังนั้นอาจเกิดความผิดพลาดจากแรงของมนุษย์ได้

(2) ในการสอบเทียบใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการทำการถดถอย ซึ่งไม่ใช่ค่าจริงที่สามารถวัดได้ จึงทำให้มีความผิดพลาดจากการคำนวณเกิดขึ้น

(3) สมการที่ใช้ในการคำนวณ มีความซับซ้อนมาก ทำให้เสียเวลาในทำความเข้าใจและการเขียนโปรแกรมเป็นอย่างมาก

8.2.3 ปัญหาของโปรแกรมซียู-ซีเอ็มเอ็ม

(1) การใช้งานของโปรแกรมโดยรวมแล้ว ทำความเข้าใจและใช้งานค่อนข้างง่าย แต่ยังมีบางฟังก์ชันที่ใช้งานได้ยากอยู่บ้าง จึงต้องทำการแก้ไขปรับปรุงต่อไป

(2) ในการใช้งานฟังก์ชันต่างๆของโปรแกรม จำเป็นต้องเปิดหน้า Encoder position และ probe tip position ไว้ตลอดเวลา ดังนั้นจึงอาจทำให้เกิดความรำคาญของผู้ใช้งานได้

8.3 ข้อเสนอแนะ

8.3.1 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของเครื่องได้มาจากการทำการสอบเทียบ โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณ ทำให้อาจจะเกิดความผิดพลาดทั้งทางด้านการคำนวณและการทดลองได้ ทำให้ค่าตำแหน่งปลายหัววัดที่ได้จากการคำนวณผ่านทางเมตริกซ์การแปลง มีความผิดพลาดเกิดขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อการพัฒนาให้ค่าความถูกต้องในการวัดมากขึ้นจึงอาจจะกระทำดังต่อไปนี้

(1) ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องจากการวัดโดยตรงด้วยเครื่องมือที่แม่นยำ

(2) พัฒนาแนวทางการสอบเทียบหรือแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ในแบบอื่นๆ ที่มีความแม่นยำมากขึ้น

(3) ในการสอบเทียบชิ้นงานสอบเทียบอาจเกิดการผิดพลาดจากแรงของมนุษย์ เนื่องจากการทำชิ้นงานสอบเทียบลักษณะนี้ไม่สามารถใช้หัววัดแบบเก็บค่าเมื่อสัมผัสได้ ดังนั้นค่าที่วัดได้จากทั้งเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มและเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มจะยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง ดังนั้นถ้าสามารถออกแบบชิ้นงานสอบเทียบให้สามารถใช้หัววัดแบบสัมผัสมาทำการวัดได้จะทำให้การสอบเทียบมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

8.3.2 ถึงแม้ว่าการติดตั้งตัวถ่วงน้ำหนักจะทำให้ตัวแขนกลมีน้ำหนักเบาลงอย่างมาก แต่ยังสามารถที่จะลดในส่วนชั่งน้ำหนักตัวแขนลงได้อีก โดยอาจจะเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำตัวแขนกลให้มีน้ำหนักเบาลง หรือเนื่องจากฮาร์โมนิคไดรฟ์ มีน้ำหนักค่อนข้างมากจึงอาจจะเลือกใช้อินโค้ดเดอร์ที่มีความละเอียดสูงมากๆ เพื่อลดน้ำหนักในส่วนชั่ง ฮาร์โมนิคไดรฟ์ลง จะทำให้ตัวแขนกลมีน้ำหนักลดลงได้อย่างมาก จึงมีความสะดวกในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

8.3.3 เนื่องจากหัววัดแบบเข็มและแบบหัวกลมจะทำการเก็บค่าได้ที่ละจุดจึงทำให้เสียเวลาและแรงงานที่ผู้จะใช้ใช้ในการวัด ถ้าสามารถเปลี่ยนหัววัดเป็นแบบแถบแสงที่สามารถเก็บค่า

จุดได้เป็นเส้น จะทำให้ช่วยประหยัดเวลาและแรงงานของผู้ใช้ลงไปได้อย่างมาก อีกทั้งยังสามารถช่วยป้องกันไม่ให้พื้นผิวของชิ้นงานเป็นรอยได้อีกด้วย

8.3.4 อาจจะมีฐานยึดแบบสุญญากาศหรือแบบแม่เหล็ก เพื่อให้สามารถทำการยึดฐานได้หลากหลายสถานที่มากยิ่งขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Faro Distribution. Faro Arm Fusion [Online]. 2009. Available from :
<http://www.faro.com/FaroArm/Home.htm>, [2009,December 24]
- [2] กิตติศักดิ์ บุญยังคุณ. เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบข้อต่อ 6 แกน. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย,2545.
- [3] Ogura Industrial Corp. OPC Electromagnetic Mag-Particle Clutch [Online]. 2008.
Available from : [http://www.ogura-clutch.com/products.html?category=2&
product=89](http://www.ogura-clutch.com/products.html?category=2&product=89), [2009,December 24]
- [4] John J. Craig. Introduction to Robotics, Mechanics and Control. 2nd edition, Addison-
Wesley Publishin, 1955.
- [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.
- [11] Sherman K.Stein and Anthony Borcellos. Calculus and Analytic Geometry. 5th edition, McGRAW-HILL, INC., 1992: 690.
- [12] Louis Leithold. The Calculus with Analytic Geometry. 3rd edition, Harper & Row, Publishers, 1976: 834.
- [13] H.Asada and J.-J. E.Slotine. Robot Analysis and Control. A Wiley-Interscience Publication, 1986: 22-25.
- [14] Sherman K.Stein and Anthony Borcellos. Calculus and Analytic Geometry. 5th edition, McGRAW-HILL, INC., 1992: 698.
- [15] Murrey H.Protter and Charles B.Morrey, JR. College Calculus with Analytic Geometry. 2nd edition, Addison Wesley Publishing Company, 1970: APP-15.
- [16] Murrey H.Protter and Charles B.Morrey, JR. College Calculus with Analytic Geometry. 2nd edition, Addison Wesley Publishing Company, 1970: 576.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

เครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มและเครื่อง GOM

เครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มเป็นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบ 3 ซ้อนต่อ มีลักษณะดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 บราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็ม

โดยที่ข้อต่อแต่ละข้อต่อจะเป็นข้อต่อแบบเลื่อน ใช้การอัดอากาศในการเลื่อนข้อต่อ ซึ่งการเลื่อนแบบอัดอากาศนี้มีประโยชน์ในการลดความผิดพลาดที่เกิดจากความเสียดทาน จะช่วยให้เครื่องมีความแม่นยำมากขึ้น สำหรับเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มของทางห้องปฏิบัติการ จะมีการทำการสอบเทียบทุกๆ 6 เดือน เพื่อช่วยปรับความแม่นยำของเครื่องให้มีความสม่ำเสมอ โดยมีค่าความถูกต้องอยู่ที่น้อยกว่า ± 10 ไมโครเมตร เครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มมีหัววัดแบบทรงกลมหลากหลายขนาดเพื่อใช้ให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการวัด และมีหัววัดทั้งแบบเก็บค่าอัตโนมัติเมื่อหัววัดแตะกับชิ้นงาน เนื่องจากมีเซนเซอร์รับแรง (force sensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ และมีหัววัดแบบแข็ง (หัววัดตามปกติ ไม่สามารถเก็บค่าที่จะทำการวัดเองได้) เพื่อเป็นทางเลือกใช้ให้เหมาะกับงานแต่ละประเภท

ข้อจำกัดของเครื่องบราวน์แอนด์ชาร์ปซีเอ็มเอ็มคือ ไม่สามารถวัดด้านใต้ชิ้นงาน และใน ส่วนที่หัววัดไม่สามารถเข้าถึงได้ในแนวตั้งฉากกับชิ้นงาน

เครื่อง GOM มีลักษณะดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 เครื่อง GOM

เครื่อง GOM เป็นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่ใช้หลักการจับภาพด้วยกล้อง 2 ตัว เพื่อหาค่าตำแหน่งใน 3 มิติ แล้วเก็บค่าจุดตำแหน่งดังกล่าวโดยมีความละเอียดในการเก็บค่าตำแหน่งสูงมาก จนสามารถเห็นเหมือนกับเป็นพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งตัวโปรแกรมสามารถแสดงค่าจุดที่ทำการเก็บค่าได้ใน 3 มิติ และสามารถทำการคำนวณและสร้างเป็นพื้นผิวได้ ซึ่งเครื่อง GOM ของทางห้องปฏิบัติการมีค่าความถูกต้องประมาณ 100-200 ไมโครเมตร

ข้อจำกัดของเครื่อง GOM คือ จะต้องมีส่วนสว่างเพียงพอจึงจะสามารถทำการวัดได้ และตัวชิ้นงานที่จะทำการวัดจะต้องไม่มีลักษณะสะท้อนแสง ดังนั้นในการวัดชิ้นงานบางประเภท อาจจะต้องมีการพ่นผงแป้ง เพื่อลดการสะท้อนแสงของชิ้นงานลง ทำให้เกิดเป็นความยุ่งยากในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การหาฟังก์ชันที่ใช้ในการคำนวณ ด้วยฟังก์ชัน lsqcurvefit ของโปรแกรม แมทแล็บ

จุด (x, y, z) สามารถหาได้ผ่านทางเมตริกการแปลง โดยตัวแปรต้นเป็นตัวที่หาได้จาก
การวัดด้วยเอนโค้ดเดอร์ ซึ่งก็คือ $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)$

โดยที่ θ_i คือ ค่ามุมของข้อต่อ i

แทนค่ามุมดังกล่าวลงในสมการ ข.1-ข.13

$${}^0T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (ข.1)$$

เมื่อ

$$r_{11} = c_1 [c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] + s_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \quad (ข.2)$$

$$r_{12} = c_1 [c_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + s_{23} s_5 s_6] + s_1 (c_4 c_6 - s_4 c_5 s_6) \quad (ข.3)$$

$$r_{13} = -c_1 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) - s_1 s_4 s_5 \quad (ข.4)$$

$$r_{21} = s_1 [c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] - c_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \quad (ข.5)$$

$$r_{22} = s_1 [c_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) + s_{23} s_5 s_6] - c_1 (c_4 c_6 - s_4 c_5 s_6) \quad (ข.6)$$

$$r_{23} = -s_1 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5) + c_1 s_4 s_5 \quad (ข.7)$$

$$r_{31} = -s_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - c_{23} s_5 c_6 \quad (ข.8)$$

$$r_{32} = -s_{23} (-c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6) - c_{23} s_5 s_6 \quad (ข.9)$$

$$r_{33} = s_{23} c_4 s_5 - c_{23} c_5 \quad (ข.10)$$

$$p_x = c_1 [a_2 c_2 + a_3 c_{23} - d_4 s_{23}] - d_3 s_1 \quad (ข.11)$$

$$p_y = s_1 [a_2 c_2 + a_3 c_{23} - d_4 s_{23}] + d_3 c_1 \quad (ข.12)$$

$$p_z = -a_3 s_{23} - a_2 s_2 - d_4 c_{23} \quad (ข.13)$$

โดยที่

p_x, p_y, p_z แทนตำแหน่งของปลายแขนที่อยู่ห่างจากเฟรมที่ 0 ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \text{ เป็น เมตริกการหมุน (Rotation Matrix) ของปลายแขนกล เทียบกับเฟรมที่ 0}$$

$$c_i = \cos \theta_i, s_i = \sin \theta_i$$

และ $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$

$$s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$$

จากนั้นทำการหาจุดปลายของหัววัด โดยอ้างอิงจากเฟรมที่ 0 จากสมการ ${}^0P = {}^0T^6P$ ก็จะได้ค่าจุดปลาย (x, y, z) ที่อ้างอิงจากเฟรม 0 ซึ่งติดอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า 22 ตัว ได้แก่ $a_1, a_2, a_3, a_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, d_2, d_3, d_4, d_5, x_p, y_p, z_p, \Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5$ และ $\Delta\theta_6$

สำหรับการสอบเทียบจะต้องมีการย้ายเฟรม 0 ไปอยู่ ณ ตำแหน่งอ้างอิงของชิ้นงานสอบเทียบด้วย ดังนั้นจึงทำให้เกิดพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าอีก 6 ตัว คือ $\alpha, \beta, \gamma, x_{0Origin}, y_{0Origin}$ และ $z_{0Origin}$ ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

จาก ออยเลอร์ แองเกิล (Euler angle rotational matrix) Z-X-Z [13]

$$R_{ZXZ} = \begin{bmatrix} ca * cg - sa * cb * sg & -ca * sg - sa * cb * cg & sa * sb \\ sa * cg + ca * cb * sg & -sa * sg + ca * cb * cg & -sb * ca \\ sb * sg & sb * cg & cb \end{bmatrix} \quad (ข.14)$$

โดยที่ $ca = \cos(\alpha),$

$$cb = \cos(\beta),$$

$$cg = \cos(\gamma),$$

$$sa = \sin(\alpha),$$

$$sb = \sin(\beta),$$

$$sg = \sin(\gamma)$$

และมีทรานฟอร์มเวกเตอร์ (Transform vector) คือ

$$P_{Origin} = \begin{bmatrix} x_{0Origin} \\ y_{0Origin} \\ z_{0Origin} \end{bmatrix} \quad (ข.15)$$

โดยที่ $x_{0Origin}$ คือ ระยะห่างในแนวแกน x ระหว่างเฟรม 0 และเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงาน
สอบเทียบ

$y_{0Origin}$ คือ ระยะห่างในแนวแกน y ระหว่างเฟรม 0 และเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงาน
สอบเทียบ

$z_{0Origin}$ คือ ระยะห่างในแนวแกน z ระหว่างเฟรม 0 และเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงาน
สอบเทียบ

กำหนดให้ 0_sT คือ เมตริกซ์การแปลงระหว่างเฟรม 0 เทียบกับเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานสอบ
เทียบ ดังนั้น

$${}^0_sT = \begin{bmatrix} R_{ZZZ} & P_{Origin} \\ 0 & I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ca * cg - sa * cb * sg & -ca * sg - sa * cb * cg & sa * sb & x_{0Origin} \\ sa * cg + ca * cb * sg & -sa * sg + ca * cb * cg & -sb * ca & y_{0Origin} \\ sb * sg & sb * cg & cb & z_{0Origin} \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (ข.16)$$

แต่ที่ต้องการคือ การแปลงระหว่างเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานสอบเทียบ เทียบกับเฟรม 0 (s_0T) ดังนั้น

$${}^s_0T = {}^0_sT^{-1}$$

ดังนั้นจุดปลายของหัววัดโดยอ้างอิงจากเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานสอบเทียบ จากสมการ
 ${}^sP = {}^s_0T {}^0P$ ก็จะได้ค่า (x, y, z) ที่อ้างอิงจากเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานสอบเทียบ ซึ่งติดอยู่ในรูป
ของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า 28 ตัว ได้แก่ $a_1, a_2, a_3, a_4, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, d_2, d_3, d_4, d_5$
, $x_p, y_p, z_p, \Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5, \Delta\theta_6, \alpha, \beta, \gamma, x_{0Origin}, y_{0Origin}$ และ $z_{0Origin}$

ภาคผนวก ค

การคำนวณในส่วนของฟังก์ชัน Alignments

ฟังก์ชันนี้ใช้ในการย้ายระบบแกนอ้างอิงจากเฟรม 0 ของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม มาอยู่บนชิ้นงาน ซึ่งในการย้ายแกนจะมีตัวที่ต้องการทราบค่า 6 ตัว คือ $x_s, y_s, z_s, \alpha_s, \beta_s$ และ γ_s ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะขอยกตัวอย่างการคำนวณในส่วนของปลายหัววัดแบบแหลมเท่านั้น โดยที่

x_s คือ ระยะในแนวแกน X จากเฟรม 0 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

y_s คือ ระยะในแนวแกน Y จากเฟรม 0 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

z_s คือ ระยะในแนวแกน Z จากเฟรม 0 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

α_s คือ มุมระหว่างแกน X0 (แกน X บนเฟรม 0) และ ไลน์ออฟโหนด(The line of nodes)

β_s คือ มุมระหว่างแกน Z0 (แกน Z บนเฟรม 0) และ แกน Z บนเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

α_s คือ มุมระหว่างไลน์ออฟโหนด และ แกน X บนเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

ไลน์ออฟโหนด (The line of nodes) คือ เวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการตัดกันของระนาบ X0-Y0 และ ระนาบ XS-YS บนชิ้นงานที่ต้องการวัด

หา x_s, y_s, z_s

จากหัวข้อ 5.4 จะได้จุดทั้งหมด 7 จุด

3 จุดแรกใช้หาระนาบบนชิ้นงานและเวกเตอร์นอร์มอลของระนาบบนชิ้นงานให้

$$\text{ดังนั้น } P_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad P_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}$$

$$P_{12} = P_2 - P_1 \quad \text{และ} \quad P_{23} = P_3 - P_2 \quad (\text{ค.1})$$

หาเวกเตอร์นอร์มอลของระนาบบนชิ้นงานได้จาก

$$N_s = P_{23} \times P_{12} \quad (\text{ค.2})$$

เวกเตอร์นอร์มอลหนึ่งหน่วยของระนาบบนชิ้นงาน คือ

$$n_s = \frac{N_s}{|N_s|} \quad (\text{ค.3})$$

จุดที่ 4 และ 5 ใช้สำหรับหาทิศทางของแกน Xs

ให้

$$P_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad P_5 = \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$P_{45} = P_5 - P_4 \quad (\text{ค.4})$$

ซึ่ง P_{45} นี้เป็นเวกเตอร์ที่อยู่ในระบบแกนของเฟรม 0 ดังนั้นจึงต้องไปแจกเวกเตอร์ให้อยู่บนระนาบ Xs-Ys ดังนี้ จาก [11]

$$d_1 = P_{45} \times n_s \quad (\text{ค.5})$$

$$P_{45p} = P_{45} - d_1 * n_s \quad (\text{ค.6})$$

จะได้ว่า P_{45p} นี้คือเวกเตอร์ของจุดที่ 4 และ 5 ที่อยู่บนระนาบ Xs-Ys

และ จุด P_4 ไปแจกลงบน ระนาบ Xs-Ys เพื่อใช้ในการหาสมการเส้นตรงของเวกเตอร์ P_{45p} ทำได้ ดังนี้

จาก [12] สมการระนาบ (P) $ax + by + cz + d = 0$ และจุด (u, v, w) จะได้ว่า

$$x_0 = u - a \frac{au + bv + cw + d}{a^2 + b^2 + c^2}$$

$$y_0 = v - b \frac{au + bv + cw + d}{a^2 + b^2 + c^2}$$

$$z_0 = w - c \frac{au + bv + cw + d}{a^2 + b^2 + c^2}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$P_{4xp} = P_{4x} - N_x \frac{(N_x * P_{4x}) + (N_y * P_{4y}) + (N_z * P_{4z}) + D}{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} \quad (\text{ค.7})$$

$$P_{4yp} = P_{4y} - N_y \frac{(N_x * P_{4x}) + (N_y * P_{4y}) + (N_z * P_{4z}) + D}{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} \quad (\text{ค.8})$$

$$P_{4zp} = P_{4z} - N_z \frac{(N_x * P_{4x}) + (N_y * P_{4y}) + (N_z * P_{4z}) + D}{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} \quad (\text{ค.9})$$

โดยที่

$$D = -(N_x * P_{1x}) - (N_y * P_{1y}) - (N_z * P_{1z}) \quad (\text{ค.10})$$

ดังนั้นจะได้จุดที่อยู่บนระนาบ Xs-Ys คือ $P_{4p} = \begin{bmatrix} P_{4xp} \\ P_{4yp} \\ P_{4zp} \end{bmatrix}$

จุดที่ 6 และ 7 ใช้สำหรับหาจุดอ้างอิง

ให้

$$P_6 = \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad P_7 = \begin{bmatrix} x_7 \\ y_7 \\ z_7 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$P_{67} = P_7 - P_6 \quad (\text{ค.11})$$

ซึ่ง P_{67} นี้เป็นเวกเตอร์ที่อยู่ในระบบแกนของเฟรม 0 ดังนั้นจึงต้องโปรเจกต์เวกเตอร์ให้อยู่บนระนาบ Xs-Ys ดังนี้

$$d_2 = P_{67} \cdot n_s \quad (\text{ค.12})$$

$$P_{67p} = P_{67} - d_2 \cdot n_s \quad (\text{ค.13})$$

จะได้ว่า P_{67p} นี้คือเวกเตอร์ของจุดที่ 6 และ 7 ที่อยู่บนระนาบ Xs-Ys

และ จุด P_6 โปรเจกต์ลงบน ระนาบ Xs-Ys เพื่อใช้ในการหาสมการเส้นตรงของเวกเตอร์ P_{67p} ทำได้ ดังนี้ [12]

$$P_{6xp} = P_{6x} - N_x \frac{(N_x \cdot p_{6x}) + (N_y \cdot p_{6y}) + (N_z \cdot p_{6z}) + D}{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} \quad (\text{ค.14})$$

$$P_{6yp} = P_{6y} - N_y \frac{(N_x \cdot p_{6x}) + (N_y \cdot p_{6y}) + (N_z \cdot p_{6z}) + D}{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} \quad (\text{ค.15})$$

$$P_{6zp} = P_{6z} - N_z \frac{(N_x \cdot p_{6x}) + (N_y \cdot p_{6y}) + (N_z \cdot p_{6z}) + D}{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} \quad (\text{ค.16})$$

โดยที่

$$D = - \begin{vmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{vmatrix} \quad (\text{ค.17})$$

ดังนั้นจะได้จุดที่อยู่บนระนาบ Xs-Ys คือ $P_{6p} = \begin{bmatrix} P_{6xp} \\ P_{6yp} \\ P_{6zp} \end{bmatrix}$

ดังนั้นสามารถหาจุดอ้างอิงได้จากจุดตัดของเส้นตรง P_{45p} และ P_{67p} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการเส้นตรง 2 สมการ ที่มีจุดร่วมกัน ดังนี้

จากสมการเส้นตรง $y = x + at$

จะได้ว่า $P_4 = P_{4p} + P_{45p}t_1$ และ $P_6 = P_{6p} + P_{67p}t_2$

จุดตัดคือ $P_4 = P_6 \rightarrow P_{4p} + P_{45p}t_1 = P_{6p} + P_{67p}t_2 \quad (\text{ค.18})$

ทำการจัดรูปจะได้ว่า

$$t_1 = (P_{6yp} - P_{4yp}) + \left(\frac{P_{67yp}}{P_{67xp}} \right) \left(\frac{P_{4xp} - P_{6xp}}{P_{45yp} \left(1 - \left(\frac{P_{67yp} P_{45xp}}{P_{67xp} P_{45yp}} \right) \right)} \right) \quad (ค.19)$$

ดังนั้นสามารถหาจุดอ้างอิงได้จาก

$$P_s = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = P_{4p} + P_{45p} t_1 \quad (ค.20)$$

หา $\alpha_s, \beta_s, \gamma_s$

ใช้วิธี Z-X-Z อออยเลอร์แองเกิล

หา The line of nodes จากเส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบทั้งสอง [13] ดังนั้น

$$\text{The line of nodes}(nod) = N_o \times N_s \quad (ค.21)$$

จะได้ว่า

$$\alpha_s = \arccos \left(\frac{N_{ox} \cdot nod}{|N_{ox}| |nod|} \right) \quad (ค.22)$$

$$\beta_s = \arccos \left(\frac{N_{oz} \cdot N_s}{|N_{oz}| |N_s|} \right) \quad (ค.23)$$

$$\gamma_s = \arccos \left(\frac{nod \cdot P_{45p}}{|nod| |P_{45p}|} \right) \quad (ค.24)$$

โดยที่

$$N_{ox} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, N_{oz} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad [14]$$

(โปรดระวัง เครื่องหมายของสมการ ค.22 - ค.24)

จากนั้น นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการ ค.16 จะได้ว่า

$${}^oT_s = \begin{bmatrix} ca * cg - sa * cb * sg & -ca * sg - sa * cb * cg & sa * sb & x_{0Origin} \\ sa * cg + ca * cb * sg & -sa * sg + ca * cb * cg & -sb * ca & y_{0Origin} \\ sb * sg & sb * cg & cb & z_{0Origin} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$ca = \cos(\alpha_S),$$

$$cb = \cos(\beta_S),$$

$$cg = \cos(\gamma_S),$$

$$sa = \sin(\alpha_S),$$

$$sb = \sin(\beta_S),$$

$$sg = \sin(\gamma_S)$$

$$x_{0Origin} = X_S$$

$$y_{0Origin} = Y_S$$

$$z_{0Origin} = Z_S$$

ดังนั้น ถ้าต้องการค่าตำแหน่งปลายหัววัดเทียบกับเฟรมอ้างอิง คือ

$${}^S P = {}^S T {}^0 T {}^6 P$$

จะได้ว่า

$${}^S P = {}^S T^{-1} {}^0 T {}^6 P$$

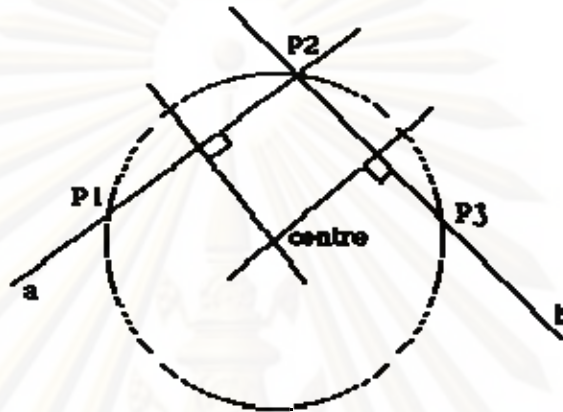
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

การคำนวณในส่วนของฟังก์ชัน Measurement

การคำนวณวงกลม [15]

หาจุดศูนย์กลางวงกลม (x_o, y_o)



รูปที่ ง.1 การหาจุดศูนย์กลางวงกลม [15]

จาก [15] จะได้ว่า

$$x_o = \frac{m_a m_b (y_1 - y_3) + m_b (x_1 + x_2) - m_a (x_2 + x_3)}{2(m_b - m_a)} \quad (\text{ง.1})$$

$$y_o = m_a (x_o - x_1) + y_1 \quad (\text{ง.2})$$

หารัศมีวงกลม (R)

$$R = \sqrt{(x_1 - x_o)^2 + (y_1 - y_o)^2} \quad (\text{ง.3})$$

การคำนวณทรงกระบอก

ต้องการข้อมูลทั้งหมด 5 จุด โดย

3 จุดแรก ใช้หารัศมีทรงกระบอก ซึ่งทำได้ตามสมการ (ง.1)-(ง.3)

จุดที่ 4 และ 5 ใช้เพื่อหาความยาวทรงกระบอก ซึ่งหาได้จาก $|z_4 - z_5|$ (ง.4)

การคำนวณทรงกลม [16]

ต้องการข้อมูลทั้งหมด 4 จุด

จาก [16] จะได้ว่าจาก

$$\begin{vmatrix} x^2 + y^2 + z^2 & x & y & z & 1 \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 & x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 & x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (ง.5)$$

สามารถหาจุดศูนย์กลางและรัศมีได้จาก

$$x_0 = 0.5M_{13} / M_{11} \quad (ง.6)$$

$$y_0 = -0.5M_{13} / M_{11} \quad (ง.7)$$

$$z_0 = 0.5M_{14} / M_{11} \quad (ง.8)$$

$$r^2 = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - M_{15} / M_{11} \quad (ง.9)$$

โดยที่ M_{ij} คือ ไมเนอร์ของแถวที่ i หลักที่ j

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การคำนวณในส่วนของฟังก์ชัน 2D distance และ 3D distance

การคำนวณหาระยะในระนาบ 2 มิติ

การหาระยะต้องการข้อมูล 2 จุด โดยจะขอยกตัวอย่างจากระนาบ X-Y

$$\text{ระยะ (s)} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (\text{จ.1})$$

การคำนวณหาระยะใน 3 มิติ

การหาระยะต้องการข้อมูล 2 จุด

$$\text{ระยะ (s)} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (\text{จ.2})$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การคำนวณในส่วนของฟังก์ชัน Angle

ในการคำนวณหาค่ามุมระหว่างเวกเตอร์ 2 เส้น ต้องการข้อมูลทั้งหมด 4 จุด สำหรับในระนาบ 2 มิติ [14]

จะขอยกตัวอย่างในระนาบ X-Y จาก

$$P_{12} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad P_{34} = \begin{bmatrix} x_4 - x_3 \\ y_4 - y_3 \end{bmatrix} \quad (\text{จ.1})$$

จะได้ว่า

$$Angle = \arccos \left(\frac{P_{12} \cdot P_{34}}{|P_{12}| |P_{34}|} \right) \quad (\text{จ.2})$$

สำหรับใน 3 มิติ [14]

จาก

$$P_{12} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ z_2 - z_1 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad P_{34} = \begin{bmatrix} x_4 - x_3 \\ y_4 - y_3 \\ z_4 - z_3 \end{bmatrix} \quad (\text{จ.3})$$

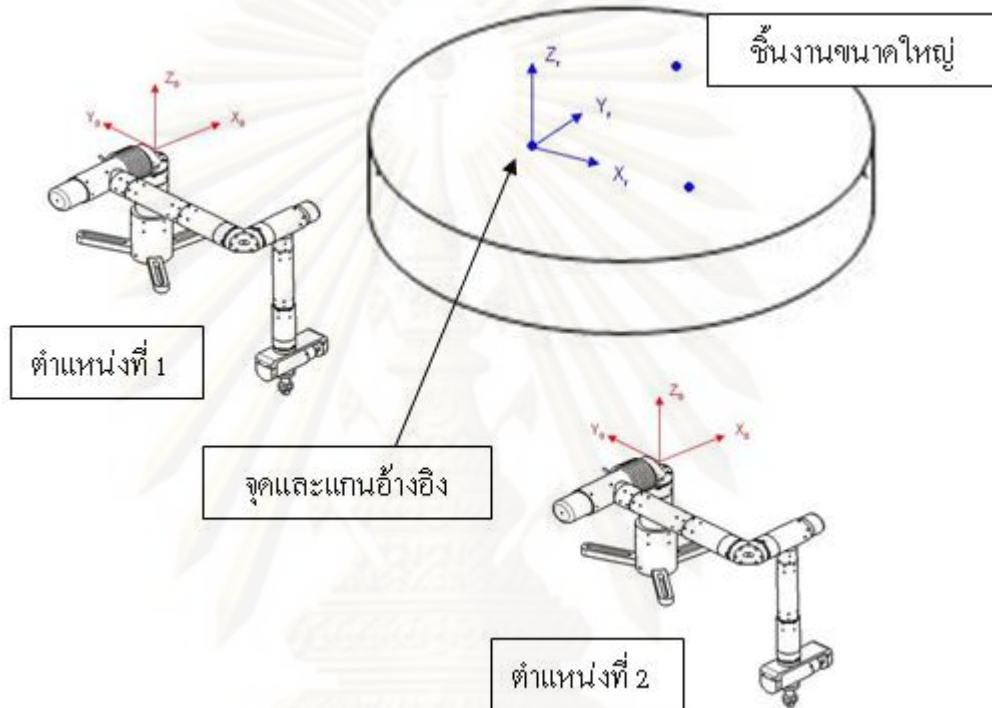
จะได้ว่า

$$Angle = \arccos \left(\frac{P_{12} \cdot P_{34}}{|P_{12}| |P_{34}|} \right) \quad (\text{จ.4})$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณการตั้งตำแหน่งอ้างอิงในส่วนของฟังก์ชัน Huge Project

ในส่วนนี้จะใช้ทฤษฎีจลศาสตร์การแปลง โดยมีแนวคิดการย้ายแกนเมื่อมีการเคลื่อนที่ตัวเครื่อง ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 แนวคิดการย้ายแกนเมื่อมีการเคลื่อนที่ตัวเครื่อง

จากรูปที่ ข.1 จะกำหนดจุด 3 จุดให้กับตัวโรงงานเพื่อใช้สำหรับเป็นจุดอ้างอิง โดยตำแหน่งที่ 1 ของเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็ม คือตำแหน่งที่เครื่องทำการวัดก่อนการเคลื่อนย้าย และตำแหน่งที่ 2 คือตำแหน่งที่เครื่องทำการวัดหลังการเคลื่อนย้าย

จากทฤษฎีจลศาสตร์การแปลง ตำแหน่งปลายหัววัดเทียบกับเฟรม 0 คือ

$${}^0P = {}^0T {}^6P \quad (\text{ข.1})$$

ดังนั้นจะกำหนดให้

เมตริกการแปลงของตำแหน่งที่ 1 คือ 0T_1

เมตริกการแปลงของตำแหน่งที่ 2 คือ 0T_2

ถ้าต้องการตำแหน่งปลายหัววัดเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงบนโรงงาน (r) จะได้ว่า

$${}^rP = {}^rT {}^0T {}^6P \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่ rT คือ เมตริกการแปลงของเฟรม 0 เทียบกับเฟรม r

ดังนั้นจากสมการ ข.2 จะสามารถหาจุดปลายหัววัดเทียบกับเฟรม r ของตำแหน่งที่ 1 ได้

$${}^r P_1 = {}^r T_1 {}^0 T_1 {}^0 P_1 \quad (\text{ข.3})$$

และจะสามารถหาจุดปลายหัววัดเทียบกับเฟรม r ของตำแหน่งที่ 2 ได้

$${}^r P_2 = {}^r T_2 {}^0 T_2 {}^0 P_2 \quad (\text{ข.4})$$

ซึ่งจุดปลายหัววัดเทียบกับเฟรม r ของทั้งตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 2 จะต้องมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$${}^r P_1 = {}^r P_2 \quad (\text{ข.5})$$

$${}^r T_1 {}^0 T_1 {}^0 P_1 = {}^r T_2 {}^0 T_2 {}^0 P_2 \quad (\text{ข.6})$$

หรือจากสมการ ข.1 จะได้ว่า

$${}^r T_1 {}^0 P_1 = {}^r T_2 {}^0 P_2 \quad (\text{ข.7})$$

ดังนั้น

$${}^0 P_1 = {}^r T_1^{-1} {}^r T_2 {}^0 P_2 \quad (\text{ข.8})$$

จากสมการ ข.8 จะได้ว่าหลังจากที่เลื่อนตำแหน่งเครื่องซียู-ซีเอ็มเอ็มจากตำแหน่งที่ 1 มาอยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 จะสามารถแปลงค่าตำแหน่งปลายหัววัดเมื่อเทียบกับเฟรมที่ 0 ที่วัดได้เมื่อเครื่องอยู่ ณ ตำแหน่งที่ 2 มาเป็นค่าตำแหน่งปลายหัววัดเมื่อเทียบกับเฟรมที่ 0 เมื่อเครื่องอยู่ ณ ตำแหน่งที่ 1 ได้ ผ่านทางเมตริกการแปลง ${}^r T_1^{-1} {}^r T_2$

หา ${}^r T_1^{-1}$

พิจารณา ณ ตำแหน่งที่ 1

ในการย้ายแกนจะมีตัวที่ต้องการทราบค่า 6 ตัว คือ $X_{1r}, Y_{1r}, Z_{1r}, \alpha_{1r}, \beta_{1r}$ และ γ_{1r} โดยที่

X_{1r} คือ ระยะในแนวแกน X จากเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 1 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

Y_{1r} คือ ระยะในแนวแกน Y จากเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 1 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

Z_{1r} คือ ระยะในแนวแกน Z จากเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 1 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

α_{1r} คือ มุมระหว่างแกน XO (แกน X บนเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 1) และ ไลน์ออฟโหนด (The line of nodes)

β_{1r} คือ มุมระหว่างแกน ZO (แกน Z บนเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 1) และ แกน Z บนเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

γ_{1r} คือ มุมระหว่างไลน์ออฟโหนด และ แกน X บนเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด ในที่นี้กำหนดให้แกน X บนเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงาน คือ P_{12}

ไลน์ออฟโหนด (The line of nodes) คือ เวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการตัดกันของ ระนาบ X0-Y0 ของเครื่อง ณ ตำแหน่งที่ 2 และ ระนาบ Xr-Yr บนชิ้นงานที่ต้องการวัด

กำหนดให้จุดอ้างอิงจุดแรก (P_1) เป็น X_{1r}, Y_{1r}, Z_{1r} ดังนั้นจากจุดอ้างอิง 3 จุดที่กำหนดไว้ คือ ให้

$$\text{ดังนั้น} \quad P_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, \quad P_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad P_3 = \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix}$$

$$X_{1r} = x_1, \quad Y_{1r} = y_1, \quad Z_{1r} = z_1$$

หา $\alpha_{1r}, \beta_{1r}, \gamma_{1r}$

$$\text{จาก} \quad P_{12} = P_2 - P_1 \quad \text{และ} \quad P_{23} = P_3 - P_2 \quad (\text{ข.9})$$

หาเวกเตอร์นอร์มอลของระนาบบนชิ้นงานได้จาก

$$N_{1r} = P_{12} \times P_{23} \quad (\text{ข.10})$$

เวกเตอร์นอร์มอลหนึ่งหน่วยของระนาบบนชิ้นงาน คือ

$$n_{1r} = \frac{N_{1r}}{|N_{1r}|} \quad (\text{ข.11})$$

ใช้วิธี Z-X-Z ออยเลอร์เองเกิด

หา The line of nodes จากเส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบทั้งสอง ดังนั้น

$$\text{The line of nodes} (nod_1) = N_{o1x} \times N_{1r} \quad (\text{ข.12})$$

จะได้ว่า

$$\alpha_{1r} = \arccos \left(\frac{N_{o1x} \cdot nod_1}{|N_{o1x}| |nod_1|} \right) \quad (\text{ข.13})$$

$$\beta_{1r} = \arccos \left(\frac{N_{o1z} \cdot N_{1r}}{|N_{o1z}| |N_{1r}|} \right) \quad (\text{ข.14})$$

$$\gamma_{1r} = \arccos \left(\frac{nod_1 \cdot P_{12}}{|nod_1| |P_{12}|} \right) \quad (\text{ข.15})$$

โดยที่

$$N_{o1x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad N_{o1z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad [14]$$

(โปรดระวัง เครื่องหมายของสมการ ช.13 - ช.15)

จากนั้น นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการ ง.16 จะได้ว่า

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} ca * cg - sa * cb * sg & -ca * sg - sa * cb * cg & sa * sb & x_{0Origin} \\ sa * cg + ca * cb * sg & -sa * sg + ca * cb * cg & -sb * ca & y_{0Origin} \\ sb * sg & sb * cg & cb & z_{0Origin} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่ $ca = \cos(\alpha_{1r})$,

$cb = \cos(\beta_{1r})$,

$cg = \cos(\gamma_{1r})$,

$sa = \sin(\alpha_{1r})$,

$sb = \sin(\beta_{1r})$,

$sg = \sin(\gamma_{1r})$

$x_{0Origin} = X_{1r}$

$y_{0Origin} = Y_{1r}$

$z_{0Origin} = Z_{1r}$

ดังนั้นค่า ${}^rT_1^{-1} = {}^0T_1$

หา rT_2

พิจารณา ณ ตำแหน่งที่ 2

ในการย้ายแกนจะมีตัวที่ต้องการทราบค่า 6 ตัว คือ $X_{2r}, Y_{2r}, Z_{2r}, \alpha_{2r}, \beta_{2r}$ และ γ_{2r}

โดยที่

X_{2r} คือ ระยะในแนวแกน X จากเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 2 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

Y_{2r} คือ ระยะในแนวแกน Y จากเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 2 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

Z_{2r} คือ ระยะในแนวแกน Z จากเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 2 ถึงเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

α_{2r} คือ มุมระหว่างแกน X0 (แกน X บนเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 2) และ ไลน์ออฟโหนด (The line of nodes)

β_{2r} คือ มุมระหว่างแกน ZO (แกน Z บนเฟรม 0 ของเครื่องตำแหน่งที่ 2) และ แกน Z บนเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด

γ_{2r} คือ มุมระหว่างไลน์ออฟโหนด และ แกน X บนเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงานที่ต้องการวัด ในที่นี้กำหนดให้แกน X บนเฟรมอ้างอิงบนชิ้นงาน คือ P_{45}

ไลน์ออฟโหนด (The line of nodes) คือ เวกเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการตัดกันของ ระนาบ X0-Y0 ของเครื่อง ณ ตำแหน่งที่ 2 และ ระนาบ Xr-Yr บนชิ้นงานที่ต้องการวัด

กำหนดให้จุดอ้างอิงจุดแรก (P_2) เป็น X_{2r}, Y_{2r}, Z_{2r} ดังนั้นจากจุดอ้างอิง 3 จุดที่กำหนดไว้คือ ให้

$$\text{ดังนั้น } P_4 = \begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{bmatrix}, \quad P_5 = \begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \\ z_5 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad P_6 = \begin{bmatrix} x_6 \\ y_6 \\ z_6 \end{bmatrix}$$

$$X_{2r} = x_4, \quad Y_{2r} = y_4, \quad Z_{2r} = z_4$$

หา $\alpha_{2r}, \beta_{2r}, \gamma_{2r}$

$$\text{จาก } P_{45} = P_5 - P_4 \quad \text{และ} \quad P_{56} = P_6 - P_5 \quad (\text{ข.16})$$

หาเวกเตอร์นอร์มอลของระนาบบนชิ้นงานได้จาก

$$N_{2r} = P_{45} \times P_{56} \quad (\text{ข.17})$$

เวกเตอร์นอร์มอลหนึ่งหน่วยของระนาบบนชิ้นงาน คือ

$$n_{2r} = \frac{N_{2r}}{|N_{2r}|} \quad (\text{ข.18})$$

ใช้วิธี Z-X-Z ออยเลอร์เองเกิด

หา The line of nodes จากเส้นที่เกิดจากการตัดกันของระนาบทั้งสอง ดังนั้น

$$\text{The line of nodes}(nod_2) = N_{o2} \times N_{2r} \quad (\text{ข.19})$$

จะได้ว่า

$$\alpha_{2r} = \arccos \left(\frac{N_{o2x} \cdot nod_2}{|N_{o2x}| |nod_2|} \right) \quad (\text{ข.20})$$

$$\beta_{2r} = \arccos \left(\frac{N_{o2z} \cdot N_{2r}}{|N_{o2z}| |N_{2r}|} \right) \quad (\text{ข.21})$$

$$\gamma_{2r} = \arccos \left(\frac{nod_2 \cdot P_{45}}{|nod_2| |P_{45}|} \right) \quad (\text{ข.22})$$

โดยที่

$$N_{o2x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, N_{o2z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad [14]$$

(โปรดระวัง เครื่องหมายของสมการ ช.19 - ช.21)

จากนั้น นำค่าที่ได้มาแทนลงในสมการ ง.16 จะได้ว่า

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} ca*cg - sa*cb*sg & -ca*sg - sa*cb*cg & sa*sb & x_{0Origin} \\ sa*cg + ca*cb*sg & -sa*sg + ca*cb*cg & -sb*ca & y_{0Origin} \\ sb*sg & sb*cg & cb & z_{0Origin} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่ $ca = \cos(\alpha_{2r}),$

$cb = \cos(\beta_{2r}),$

$cg = \cos(\gamma_{2r}),$

$sa = \sin(\alpha_{2r}),$

$sb = \sin(\beta_{2r}),$

$sg = \sin(\gamma_{2r})$

$x_{0Origin} = X_{2r}$

$y_{0Origin} = Y_{2r}$

$z_{0Origin} = Z_{2r}$

ดังนั้นค่า ${}^0T_2 = {}^0T_2^{-1}$

เมื่อได้ค่า ${}^0T_1^{-1}$ และ 0T_2 แล้ว นำมาแทนค่าในสมการ ช.8 ก็จะสามารถหาค่า 0P_1 ได้

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมนต์มโน้น ภูริวิศิษฎ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 เมษายน ปีพ.ศ. 2527 เป็นชาวสมุทรปราการ เข้าศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดประยูรวงศาวาส เมื่อสำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่หก ได้สอบเข้าศึกษาต่อในระดับมัธยมที่โรงเรียนวัดสุทธิวราราม หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย