การสอบเทียบระบบกลไกแขนกลแบบขนาน

นายเอกพจน์ สุนทรมาตฤก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CALIBRATION OF A PARALLEL MECHANISM MANIPULATOR ARM

Mr.Ekkapot Suntornmatrik

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2008
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสอบเทียบระบบกลไกแขนกลแบบขนาน
โดย	นายเอกพจน์ สุนทรมาตฤก
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกพจน์ สุนทรมาตฤก : การสอบเทียบระบบกลไกแขนกลแบบขนาน. (Calibration Of A Parallel Mechanism Manipulator Arm) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 85หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาและหาวิธีการสอบเทียบสำหรับกลไกแขนกลนำ 6 องศาอิสระที่มีโครงสร้างแบบขนาน เพื่อปรับปรุงความแม่นยำให้กับระบบกลไกแบบขนานซึ่งใช้สำหรับการสร้างชิ้นงานต้นแบบ การสอบเทียบในงานวิจัยนี้จำกัดอยู่ที่การสอบเทียบระดับ 2 คือครอบคลุมเฉพาะความผิดพลาดที่เกิดจากขนาดทางกายภาพของแขนกล แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไกที่สามารถใช้เพื่อการสอบเทียบหาค่าพารามิเตอร์มีอยู่ 2 แบบ คือ สมการคิเนแมติกส์ของกลไกและสมการจาโคเบียนของกลไก จากการเปรียบเทียบในแง่ของการจัดหาอุปกรณ์ภายนอกซึ่งจำเป็นในการสอบเทียบและความเหมาะสมกับระดับการสอบเทียบ พบว่าการใช้สมการคิเนแมติกส์สำหรับงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมมากกว่าการใช้สมการจาโคเบียน โดยสมการคิเนแมติกส์ที่เลือกใช้คือ สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ อุปกรณ์ภายนอกซึ่งจำเป็นต้องใช้ในการสอบเทียบในงานวิจัยนี้ คือ อุปกรณ์สอบเทียบ ซึ่งทำหน้าที่เสมือนอุปกรณ์ตรวจรู้ทางตำแหน่ง โดยการนำอุปกรณ์สอบเทียบดังกล่าววัดหาพิกัดตำแหน่งของจุดบนตัวมันเองด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม จากนั้นจึงวัดหาตำแหน่งจุดดังกล่าวด้วยกลไกแขนกลนำ ซึ่งตำแหน่งที่ได้จากกลไกแขนกลนำกับตำแหน่งที่ได้จากเครื่องซีเอ็มเอ็มย่อมมีค่าแตกต่างกันอันเนื่องมาจากพารามิเตอร์ของกลไกที่คลาดเคลื่อนจากการสร้างและการประกอบ แล้วจึงประยุกต์การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดกับผลต่างระหว่างค่าพิกัดที่ได้จากกลไกแขนกลนำกับเครื่องซีเอ็มเอ็ม งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะที่สุดสำหรับกลไกแขนกลนำ โดยพบว่าจำนวนพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดอยู่ที่ 51 พารามิเตอร์ จากนั้นจึงได้ทำการทดลองความแม่นยำของกลไกโดยใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว โดยการวัดตำแหน่งบนอุปกรณ์สอบเทียบ 16 จุด พบว่า ความแม่นยำของกลไกแขนกลนำทั้ง 3 แกน มีความละเอียดอยู่ที่ต่ำกว่า 1 มิลิเมตร การเพิ่มจำนวนพารามิเตอร์ไม่สามารถเพิ่มความแม่นยำให้กับกลไกได้อีกเนื่องมาจาก ระยะเผื่อในแบริ่ง ความผิดพลาดที่เกิดจากแรงกดจากการใช้เครื่องซีเอ็มเอ็มวัดตำแหน่งอุปกรณ์สอบเทียบ การเปลี่ยนอุปกรณ์ตรวจรู้ให้มีความละเอียดยิ่งขึ้นและการใช้เทคนิคการสอบเทียบแบบอื่นๆแทนการใช้อุปกรณ์สอบเทียบซึ่งอาจจะมีความผิดพลาดจากแรงกดที่ไม่เท่ากันในขั้นตอนการวัดหาตำแหน่งบนอุปกรณ์สอบเทียบด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม น่าจะส่งผลให้ผลการสอบเทียบดีขึ้นได้อีก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต เอกพจน์ สุนทรมาตฤก
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ
ปีการศึกษา 2551

4870639421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HAPTIC / CALIBRATION / PARALLEL MECHANISM

EKKAPOT SUNTORNMATRIK : CALIBRATION OF PARALLEL MECHANISM MANIPULATOR ARMS. ADVISOR : ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 85 pp.

This research covers the calibration method of a 6-DOF parallel mechanism manipulator arm. The calibration process is done in order to improve the accuracy of this arm which typically used as a master arm for rapid prototyping process in manufactured type of process. In this research, the level-2 calibration, covering only the errors of the physical of mechanism such as link, joint, etc, are considered. In general, two mathematics models, kinematics and Jacobian, were concerned in order to obtain the related parameters of the mechanism. With respect to the external calibration devices, the forward kinematics is more appropriate to be used. A calibration object which is an external device developed in this work, consists of many known fixed referenced points, is used in the calibration process. The errors between the known referenced points and the measurement using the robot arm are recorded. The parameters in the manipulator arm are analyzed and adjusted until the best results, based on minimizing of the least square error, are presented. In this research, the number of parameters that provide suitable result is found. The most suitable set of parameter consists of 51 parameters. According to the test on 16 reference points, the accuracy of the master arm is better than 1 mm. However, to increase the number of the parameters, the accuracy could not be improved because some errors are existed. These errors deal with some uncertainties, for example the clearance in bearings and improper measurements using CMM. Because, the force exerted, during measurements using CMM, lead to some deformation and error. Some statistical method may be needed to improve the accuracy in the measurement.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Mechanical Engineering Student's Signature Ekkapot Suntornmatrik

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature ....

Academic Year : 2008

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้มาด้วยดีโดยตลอด ขอขอบคุณพี่แขกที่ช่วยสอนใช้เครื่องจักรซีเอ็นซีและเครื่องมือช่างต่าง ๆที่จำเป็น ขอขอบคุณเพื่อน ๆทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและเอกทุกท่านที่สนับสนุนการวิจัยเสมอมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ญ
บทที่
1.บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย 3
2. การสอบเทียบ 4
2.1 ระดับการสอบเทียบหุ่นยนต์ 4
2.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ 5
2.3 ความละเอียด 8
2.4 ความแม่นยำ 8
3. แนวทางการสอบเทียบ 10
4. จลศาสตร์ของกลไก 15
4.1 สมการฟอร์เวิร์ดแบบเดิม 15
4.2 สมการอินเวิร์ดแบบใหม่ 20
4.3 พารามิเตอร์เนื่องจากกลไก 22
5. คณิตศาสตร์ที่ใช้ในการสอบเทียบ 25
5.1 การถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด 26
5.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบที่มีความต่อเนื่อง 28
5.3 สถิติศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย 31
6. การปรับปรุงโครงสร้างและอุปกรณ์สอบเทียบ 33
6.1 การปรับปรุงโครงสร้าง 33
6.2 อุปกรณ์สอบเทียบ 39
6.3 วิธีการหาตำแหน่งรูเจาะบนอุปกรณ์สอบเทียบ 41

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

6.4 กลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้น 43
7. วิธีการทดลองและผลการทดลอง 46
7.1 วิธีการทดลอง 46
7.2 ผลการทดลอง 52
8. สรุปผลและข้อเสนอแนะ 75
8.1 สรุปผลวิทยานิพนธ์ 75
8.2 ข้อเสนอแนะ 77
รายการอ้างอิง 78
ภาคผนวก 79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 85

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ภาพ หน้า

ตาราง 7.1 ค่าเศษตกค้างรวมจากการทำการถดถอย
เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม..50
ตาราง 7.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชั่น lsqcurevfit
เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.1 เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม............................62
ตาราง 7.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชั่น lsqcurevfit
เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม........................64
ตาราง 7.4 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชั่น lsqcurevfit
เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.1 เมื่อใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว..66
ตาราง 7.5 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชั่น lsqcurevfit
เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 เมื่อใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว..68
ตาราง 7.6 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้หลังจากปรับปรุงฐานด้านบนจากการ
ใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.1 เมื่อใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว............70
ตาราง 7.7 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้หลังจากปรับปรุงฐานด้านบนจากการ
ใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 เมื่อใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว........72
ตาราง 7.8 ผลการทดลองจากการวัดพิกัดของรูเจาะ 16 รู โดยใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว
ที่ได้จากการตั้งค่า TolFun = 0.001 ก่อนการปรับปรุงฐานบน..............................74
ตาราง 7.9 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างรูเจาะ 10 รู โดยใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว
ที่ได้จากการตั้งค่า TolFun = 0.001 ทั้ง 3 ครั้ง ก่อนการปรับปรุงฐานบน..............74
ตาราง 7.10 ผลการทดลองจากการวัดพิกัดของรูเจาะ 10 รู หลังจากปรับปรุงฐานบน.............74

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพ หน้า

รูปที่ 1.1 เครื่องสร้างต้นแบบแบบเร็วสำหรับงานอัญมณี ความแม่นยำ 2 ไมโครเมตร ของบริษัท Roland 1
รูปที่ 1.2 เครื่องสร้างต้นแบบแบบเร็วความแม่นยำ 10 ไมโครเมตร ของบริษัท Modela 1
รูปที่ 1.3 เครื่องกลึงซีเอ็นซีของบริษัทฮิตาชิ 3
รูปที่ 2.1 การสอบเทียบระดับ 1 5
รูปที่ 2.2 การสอบเทียบระดับ 2 6
รูปที่ 2.3 นิยามของความละเอียดและความแม่นยำ 9
รูปที่ 2.4 นิยามของความแม่นยำทางตำแหน่งที่ทำได้จริง 9
รูปที่ 3.1 แขนกลสจ๊วต 10
รูปที่ 3.2 ธีโอโดไลท์ 11
รูปที่ 3.3 อินไคล์นโนมิเตอร์ 11
รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกน ของบริษัท Brown&Sharpe 12
รูปที่ 4.1 เวคเตอร์และเฟรมต่างๆที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง 16
รูปที่ 6.1 ข้อต่อแบบเลื่อนก่อนการปรับปรุง 34
รูปที่ 6.2 ข้อต่อแบบเลื่อนหลังการปรับปรุง 34
รูปที่ 6.3 ภาพจำลองส่วนประกอบข้อต่อแบบเลื่อน 35
รูปที่ 6.4 ภาพจำลองของระยะเผื่อที่ข้อต่อแบบเลื่อน 35
รูปที่ 6.6 พูเลย์ที่ยึดติดกับลิเนียร์สไลด์ 36
รูปที่ 6.7 กลไกทดรอบที่ข้อต่อแบบหมุนข้อต่อที่ 3 ก่อนการปรับปรุง 37
รูปที่ 6.8 กลไกทดรอบที่ข้อต่อแบบหมุนข้อต่อที่ 3 หลังการปรับปรุง 37
รูปที่ 6.9 โครงสร้างฐานบนก่อนการปรับปรุง 38
รูปที่ 6.10 โครงสร้างฐานบนหลังการปรับปรุง 38
รูปที่ 6.11 ปริมาตรการทำงานของแฮบติค 39
รูปที่ 6.12 แบบจำลองอุปกรณ์สอบเทียบในคอมพิวเตอร์ 40
รูปที่ 6.13 อุปกรณ์สอบเทียบจริง 41
รูปที่ 6.14 รูปร่างก้านเหล็กติดทรงกลมขนาด 5 มิลลิเมตร 41
รูปที่ 6.15 หัว probe ซีเอ็มเอ็มวัดค่าพิกัดของทรงกลม 42
รูปที่ 6.16 จุดออริจินของอุปกรณ์สอบเทียบ 42
รูปที่ 6.17 แบบจำลองกลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นในคอมพิวเตอร์ 43
รูปที่ 6.18 กลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นจริง 43
รูปที่ 6.19 พูเลย์ทำหน้าที่เป็นสต๊อบเปอร์ 44

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพ หน้า

รูปที่ 6.20 แหวนเกลียวทำหน้าที่เป็นสต๊อบเปอร์ 44
รูปที่ 6.21 สปริงดึงก้านล๊อคยึดให้ปลายแขนแฮบติคหยุดนิ่ง 45
รูปที่ 6.22 สต๊อบเปอร์ที่ฐาน........ 45
รูปที่ 7.1 ความหมายของเฟรม W และ เฟรม B 46
รูปที่ 7.2 ภาพจำลองปลายแขนแฮบติคแตะลงบนอุปกรณ์สอบเทียบ 47
รูปที่ 7.3 กลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นชนสต๊อบเปอร์........ 48
รูปที่ 7.4 กลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นล็อคปลายแขนแฮบติค........ 49
รูปที่ 7.5 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.1 ระหว่างพารามิเตอร์ 42 และ 51 ตัว เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม........ 52
รูปที่ 7.6 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 ระหว่างพารามิเตอร์ 42 และ 51 ตัว เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม........ 53
รูปที่ 7.7 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 ระหว่างพารามิเตอร์ 51 และ 57 ตัว เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม........ 54
รูปที่ 7.8 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 และ TolFun = 0.1 สำหรับพารามิเตอร์ 51 ตัว 55
รูปที่ 7.9 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดตำแหน่งรูเจาะ บนอุปกรณ์สอบเทียบ 16 รู ครั้งที่ 1 56
รูปที่ 7.10 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดตำแหน่งรูเจาะ บนอุปกรณ์สอบเทียบ 16 รู ครั้งที่ 2........ 57
รูปที่ 7.11 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดตำแหน่งรูเจาะ บนอุปกรณ์สอบเทียบ 16 รู ครั้งที่ 3........ 58
รูปที่ 7.12 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดระยะระหว่างรูเจาะ 10 รู ซึ่งทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง........ 59
รูปที่ 7.13 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 และ TolFun = 0.1 สำหรับพารามิเตอร์ 51 ตัว หลังจากปรับปรุงฐานบน........ 60
รูปที่ 7.14 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดตำแหน่งรูเจาะ บนอุปกรณ์สอบเทียบ 10 รู ทั้งหมด 3 ครั้ง........ 61
รูปที่ ก.1 มอเตอร์กระแสตรงของข้อหมุนที่ 1 และ ข้อต่อแบบเลื่อน 80
รูปที่ ก.2 อุปกรณ์วัดมุม 80
รูปที่ ก.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของข้อหมุนตัวที่ 2 81
รูปที่ ก.4 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของข้อแบบเลื่อน 81

ภาพ หน้า

รูปที่ ก.5 ระบบสายพานและมูเล่ของข้อหมุนตัวที่ 1 82
รูปที่ ก.6 ระบบสายพานและมูเล่ของข้อต่อแบบเลื่อน........ 82
รูปที่ ก.7 ระบบมู่เล่สายพานของอุปกรณ์วัดมุมของข้อต่อแบบเลื่อน 82
รูปที่ ก.8 รายละเอียดของคันบังคับ 83
รูปที่ ก.9 วิธีการจับคันบังคับ........ 83
รูปที่ ก.10 การ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม 83
รูปที่ ก.11 ชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง 84

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตขั้นสูง โดยทั่วไปแล้วมีสิ่งที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งก็คือ ความละเอียดแม่นยำในการทำงาน ความละเอียดนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์นั้นๆเกี่ยวข้อง บางงานต้องการความเอียดระดับเซนติเมตร บางงานก็ระดับมิลลิเมตร หรือบางครั้งในงานที่ต้องการความละเอียดสูง อาจต้องการความแม่นยำของอุปกรณ์ถึงระดับไมโครเมตรเลยทีเดียว รูปที่1.1ถึงรูปที่1.3แสดงเครื่องจักรที่ต้องการความแม่นยำทางตำแหน่งสูงที่มีใช้ในอุตสาหกรรมจริง

รูปที่ 1.1 เครื่องสร้างต้นแบบแบบเร็วสำหรับงานอัญมณี ความแม่นยำ 2 ไมโครเมตร ของบริษัท Roland

รูปที่ 1.2 เครื่องสร้างต้นแบบแบบเร็วความแม่นยำ 10 ไมโครเมตร ของบริษัท Modela

รูปที่ 1.3 เครื่องกลึงซีเอ็นซีของบริษัทฮิตาชิ

ความละเอียดนี้โดยทั่วไปแล้วจะมากหรือน้อยขึ้นกับปัจจัยหลายส่วน เช่น โครงสร้างของอุปกรณ์มีความแข็งเกร็งมากเพียงใด ยิ่งโครงสร้างมีความแข็งเกร็งมากเท่าไหร่ยิ่งทำให้ความแม่นยำให้การทำงานสูงขึ้น ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ภายในที่ผลิตไม่ได้ค่าความผิดพลาดตามที่ต้องการจะทำให้ค่าความผิดพลาดรวมของอุปกรณ์นั้นๆเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความละเอียดแม่นยำของเครื่องลดลง ความละเอียดของอุปกรณ์ตรวจรู้ที่มากย่อมทำให้เครื่องจักรมีความแม่นยำทางตำแหน่งสูงไปด้วย เทคนิคการสอบเทียบเข้ามามีส่วนช่วยเพิ่มความแม่นยำของเครื่องจักร และยิ่งเมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่งค่าเริ่มต้นต่างๆที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์หรือเครื่องจักรนั้น มักมีการเปลี่ยนแปลงหรือผิดไปจากค่าเดิม การสอบเทียบก็จะมีส่วนสำคัญในการปรับแต่งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์นั้นให้กลับมามีความแม่นยำเหมือนตอนเริ่มใช้งานอีกครั้ง เครื่องสร้างชิ้นงานต้นแบบแบบเร็ว ซึ่งห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีการผลิตขั้นสูงได้ทำการพัฒนาขึ้นประกอบไปด้วย แขนกลแบบขนานในตระกูลเอช-4 ที่มีห้าองศาอิสระ [1] ทำหน้าที่เป็นแขนกลตาม และแขนกลแบบขนานที่มีหกองศาอิสระ [2] ทำหน้าที่เป็นแขนกลนำ ยังมีข้อด้อยในเรื่องของความละเอียดแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งเนื่องจากงานวิจัยทั้งสองมิได้มุ่งเน้นไปในส่วนการสอบเทียบให้แขนกลทั้งสองมีความละเอียดแม่นยำสูง เพื่อพัฒนาเครื่องดังกล่าวให้มีขีดความสามารถในระดับอุตสาหกรรมจริงและเพื่อเป็นการสร้างองค์ความรู้ด้านการสอบเทียบให้กับงานวิจัยที่จะสร้างหุ่นยนต์หรือเครื่องจักรซึ่งต้องการความแม่นยำทางตำแหน่งระดับสูง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะทำการศึกษาหาวิธีการและเทคนิคการสอบเทียบสำหรับแขนกลทั้งสอง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อปรับปรุงแขนกลนำ 6 องศาอิสระที่มีโครงสร้างแบบขนานให้มีความแม่นยำในการทำงานมากขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตรวจสอบความละเอียดที่สามารถทำได้ของแขนกลนำโดยอ้างอิงกับอุปกรณ์ที่มีอยู่
2. ศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงแขนกลนำเพื่อจะให้ได้ความละเอียดที่ดีขึ้น
3. สร้างอุปกรณ์สำหรับการสอบเทียบ (Calibration Objects)
4. หาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ที่กำหนดตำแหน่งจุดเริ่มต้น (Home Position)
5. ศึกษาเทคนิคและวิธีการสอบเทียบที่เหมาะสมกับแขนกลนำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แขนกลนำมีความแม่นยำมากขึ้น
2. องค์ความรู้สำหรับการสอบเทียบสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแขนกลอื่นๆ
3. สามารถนำแขนกลนำที่สอบเทียบแล้วไปใช้ในงานการขึ้นรูปซับซ้อนได้

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างและจลนศาสตร์ของแขนกลนำรวมทั้งเทคนิคและวิธีการสอบเทียบแบบต่างๆอย่างละเอียด
2. ปรับปรุงโครงสร้างของแขนกลนำให้มีความแข็งเกร็ง (Rigidity) มากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ที่จำเป็น เช่น ความยาวแขนกล ปรับปรุงหรือจัดหาอุปกรณ์ตรวจรู้ที่จำเป็นที่จะทำให้การวัดมีความละเอียดมากขึ้น
3. สร้างอุปกรณ์สำหรับการสอบเทียบ (Calibration Objects)
4. ทดลอง สรุป และวิเคราะห์ผลการสอบเทียบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
การสอบเทียบ

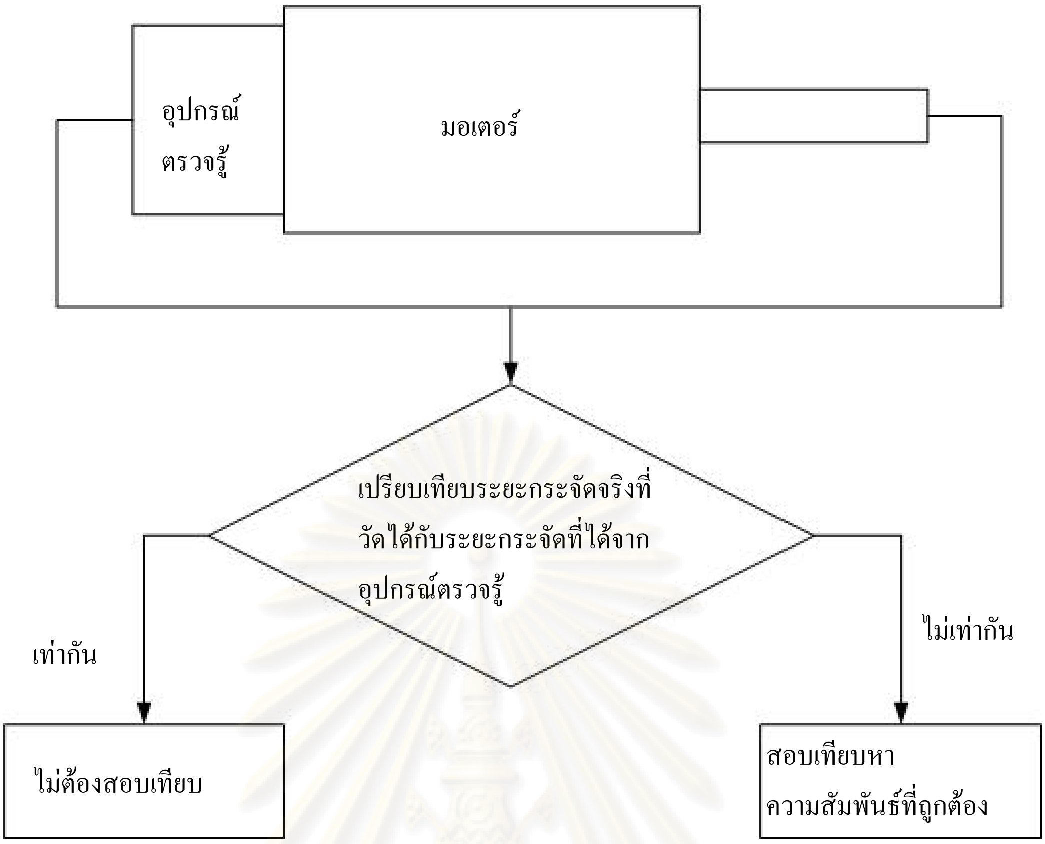
การปรับปรุงความถูกต้องแม่นยำของหุ่นยนต์หรือที่เรียกว่าการสอบเทียบ ส่วนใหญ่แล้วกระทำผ่านทางซอฟต์แวร์มากกว่าการใช้วิธีเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหุ่นยนต์ การสอบเทียบช่วยลดปัญหาที่เกิดจากชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ซึ่งผลิตไม่ได้ตามขนาดที่ต้องการและความเบี่ยงเบนในระหว่างการประกอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับหุ่นยนต์ซึ่งต้องอาศัยความแม่นยำทางตำแหน่งสูงในการทำงาน เช่น เครื่องสร้างต้นแบบแบบเร็ว เครื่องซีเอ็นซี ความเบี่ยงเบนเล็กน้อยในชิ้นส่วนจะส่งผลให้หุ่นยนต์ลดความถูกต้องแม่นยำลงตามไปด้วย

2.1 ระดับการสอบเทียบหุ่นยนต์

2.1.1 ระดับ1

เป้าหมายคือการหาความสัมพันธ์ที่ถูกต้องระหว่างสัญญาณซึ่งถูกสร้างโดยอุปกรณ์ตรวจรู้กับระยะขจัดจริงซึ่งตัวขับทำได้ การสอบเทียบระดับนี้เกี่ยวกับจลนศาสตร์ของตัวขับกับอุปกรณ์ตรวจรู้ของตัวขับนั่นเอง โดยทั่วไปจะทำในขั้นตอนการสร้างหุ่นยนต์ แต่อย่างไรก็ดีบางกรณีก็ต้องทำทุกครั้งที่เปิดเครื่องหุ่นยนต์ เช่น ถ้าหุ่นยนต์ใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แบบสัมพัทธ์ จะไม่รู้ตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อมีการปิดเครื่องและเปิดเครื่องใหม่ หุ่นยนต์จะต้องเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิง เพื่อตั้งค่าตัวนับของอุปกรณ์ตรวจรู้ใหม่ กระบวนการแบบนี้โดยทั่วไปเรียก การโฮม(Homing) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติเมื่อเปิดเครื่องและอาศัยกลไกทางกายภาพ รูปที่ 2.1 อธิบายความหมายการสอบเทียบระดับนี้

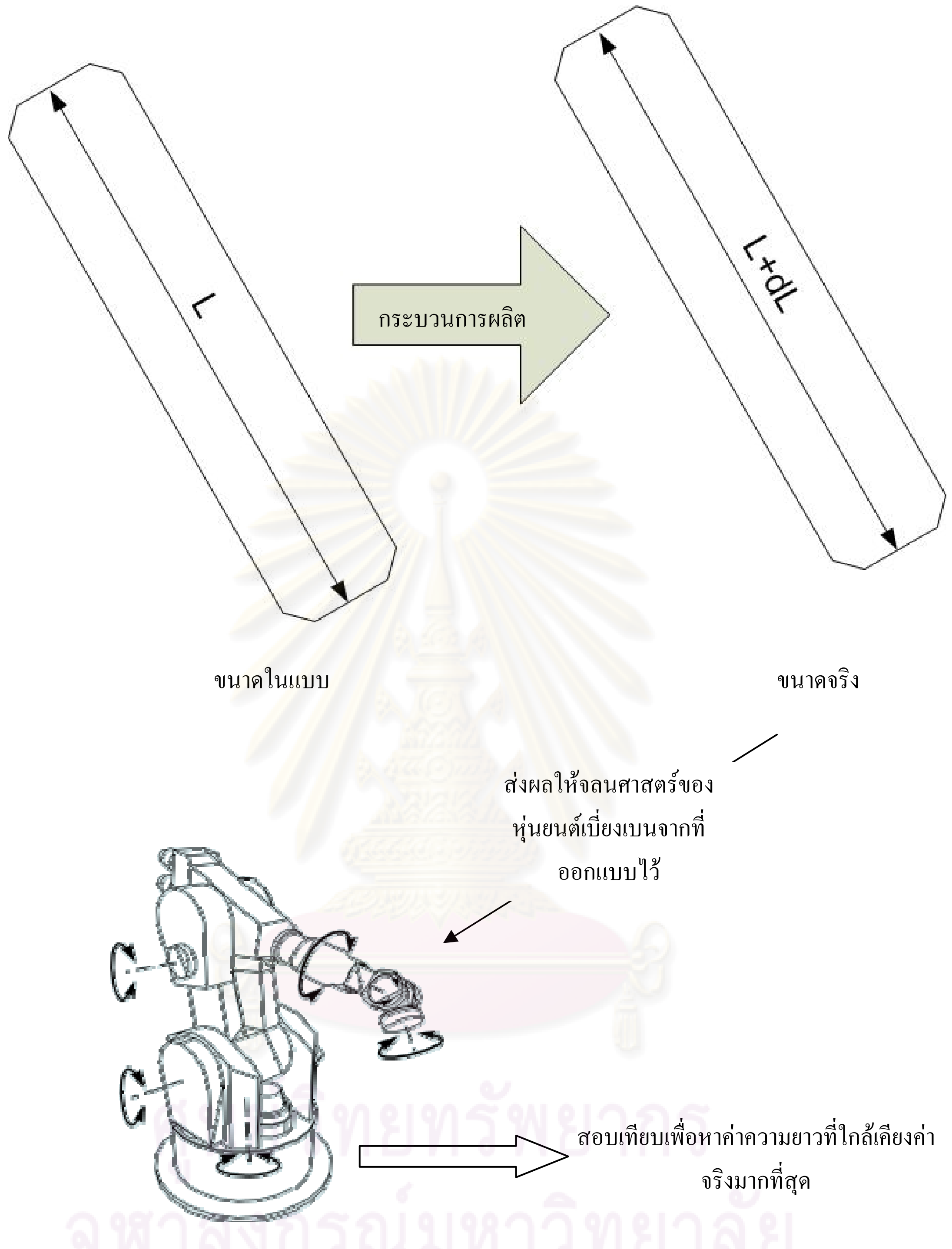
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 การสอบเทียบระดับ 1

2.1.2 ระดับ2

เป้าหมายคือหาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ที่ถูกต้อง ตัวแปรสำคัญที่กำหนดความแม่นยำของแบบจำลองจลนศาสตร์คือพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ เช่น ระยะห่างของข้อต่อ ความยาวแขนกล นั่นคือจะสอบเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์เหล่านี้อย่างละเอียด การสอบเทียบในระดับนี้จะสมมติให้ส่วนประกอบของหุ่นยนต์มีความแข็งเกร็งไม่มีการยืดหด ข้อต่อของหุ่นยนต์มีความสมบูรณ์ไม่มีช่องว่างในข้อต่อ ไม่มีความฝืดในข้อต่อ รูปที่ 2.2 อธิบายความหมายการสอบเทียบระดับนี้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.2 การสอบเทียบระดับ 2

2.1.3 ระดับ3

มองไปถึงความผิดพลาดทางตำแหน่งซึ่งเกิดจาก แรงเสียดทานในข้อต่อ ระยะห่างในข้อต่อ พลศาสตร์ของหุ่นยนต์ ความไม่แข็งเกร็งของโครงสร้างของหุ่นยนต์ การสอบเทียบระดับนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลายนัก และอาจมีต้นทุนที่สูงมากเกินความจำเป็น

2.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ

2.2.1 หาแบบจำลอง หรือความสัมพันธ์เพื่อใช้ในการสอบเทียบ

ขึ้นอยู่กับระดับของการสอบเทียบ ตัวอย่างเช่น หากต้องการสอบเทียบในระดับ 2 แบบจำลองก็คือ ความสัมพันธ์หรือสมการระหว่างระยะขจัดข้อต่อหุ่นยนต์กับตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ (Forward Kinematics) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถหาได้โดยใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ แต่สมการนี้ไม่ได้มีความแม่นยำจริงในทางปฏิบัติ เนื่องจากโดยปรกติแล้วส่วนประกอบของหุ่นยนต์ย่อมต้องมีความคลาดเคลื่อนในระหว่างการผลิตและความเบี่ยงเบนในระหว่างการประกอบ ทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเช่น ความยาว ความหนา ตำแหน่งยึด ของแบบจำลองที่ได้จากกระบวนการทางคณิตศาสตร์แตกต่างจากค่าจริง การรู้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆอย่างแม่นยำจะส่งผลให้แบบจำลองนี้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุด

2.2.2 เก็บข้อมูลจริง

เป็นการเก็บข้อมูลจริงเพื่อใช้สำหรับหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของหุ่นยนต์โดยใช้แบบจำลองที่หาไว้ในข้อ 1 เช่น การสอบเทียบในระดับ 2 จะเป็นการวัดค่าระยะขจัดข้อต่อหุ่นยนต์กับตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ในระวางที่ต้องอาศัยเครื่องมือที่มีความแม่นยำมากกว่าความแม่นยำที่ต้องการให้หุ่นยนต์มี เช่น หากต้องการสอบเทียบให้หุ่นยนต์มีความแม่นยำระดับ 20 ไมโครเมตร เครื่องมือที่ใช้วัดก็ต้องมีความละเอียดมากกว่า 20 ไมโครเมตร

2.2.3 กระบวนการทางคณิตศาสตร์

ความยากง่ายในขั้นนี้ขึ้นอยู่กับแบบจำลองที่ใช้เพื่อการสอบเทียบ หากแบบจำลองที่เลือกใช้มีความซับซ้อนมาก การแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ก็ยิ่งใช้เวลานาน หลักการคร่าวๆในขั้นนี้คือ การปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองกับค่าที่เก็บจริง มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.4 นำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว จะถูกนำไปแทนที่ค่าเก่าในโปรแกรมควบคุมตำแหน่ง

นอกจากนี้แล้วยังมีคำอีก 2 คำที่มีการใช้อย่างทั่วไปสำหรับหุ่นยนต์ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว นั่นคือ ความละเอียด (Resolution) และ ความแม่นยำ (Accuracy)

2.3 ความละเอียด

ความละเอียด ของหุ่นยนต์แบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ ก็คือ

2.3.1 โปรแกรมมิ่งเรซโซลูชัน (Programming Resolution) คือ ตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ที่เล็กที่สุดซึ่งโปรแกรมที่ใช้ควบคุมหุ่นยนต์นั้นๆ สามารถทำได้

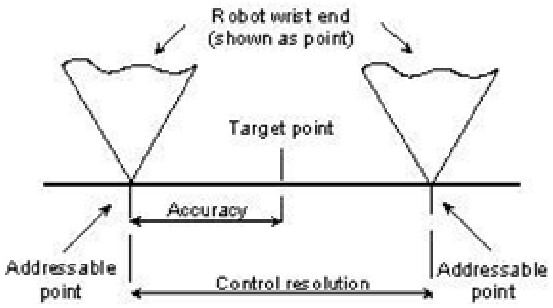
2.3.2 คอนโทรลเรซโซลูชัน(Control Resolution) คือ ตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ที่เล็กที่สุดซึ่งอุปกรณ์ตรวจรู้สามารถวัดได้ ตัวอย่างเช่น แกนๆ หนึ่งของหุ่นยนต์ มีอ๊อพติคอลเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งมีจำนวนพัลส์ต่อการหมุนครบ 1 รอบ เท่ากับ 1000 พัลส์ จะได้ว่า ทุกๆ 1 พัลส์ เพลาของเอ็นโค้ดเดอร์ตัวนี้จะหมุนไป 0.36 องศา นั่นคือ 0.36 องศา คือ คอนโทรลเรซโซลูชั่นของการเคลื่อนที่ของแกนนี้

สมรรถนะที่ดีที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อ โปรแกรมมิ่งเรซโซลูชันเท่ากับคอนโทรลเรซโซลูชัน ซึ่งสามารถเรียกรวมว่า ซิซเต็มเรซโซลูชัน(System Resolution) ในกรณีของแฮบติคความละเอียดจะขึ้นกับ คอนโทรลเรซโซลูชันเท่านั้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลไปยังตำแหน่งต่างๆกระทำโดยผู้ใช้งาน

2.4 ความแม่นยำ

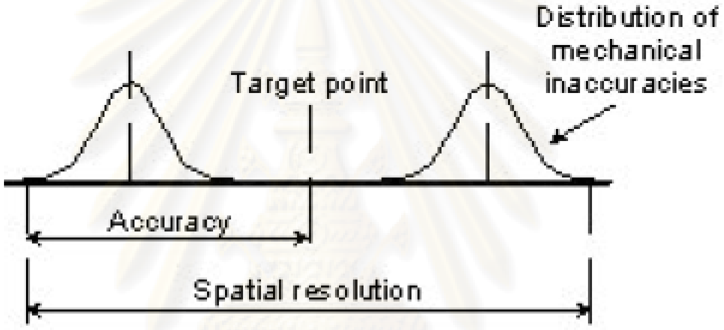
หมายถึงความสามารถของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนตำแหน่งปลายแขนกลไปยังตำแหน่งที่ต้องการภายในปริมาตรการทำงานหนึ่งๆ ในขั้นต้นจะนิยามความละเอียดอยู่ที่ครึ่งหนึ่งของคอนโทรลเรซโซลูชัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 นิยามของความละเอียดและความแม่นยำ

พิจารณาจากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่ากรณีที่แย่ที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อจุดที่ต้องการเคลื่อนที่ไปอยู่ ณ กึ่งกลางระหว่างคอนโทรลเรซโซลูชัน



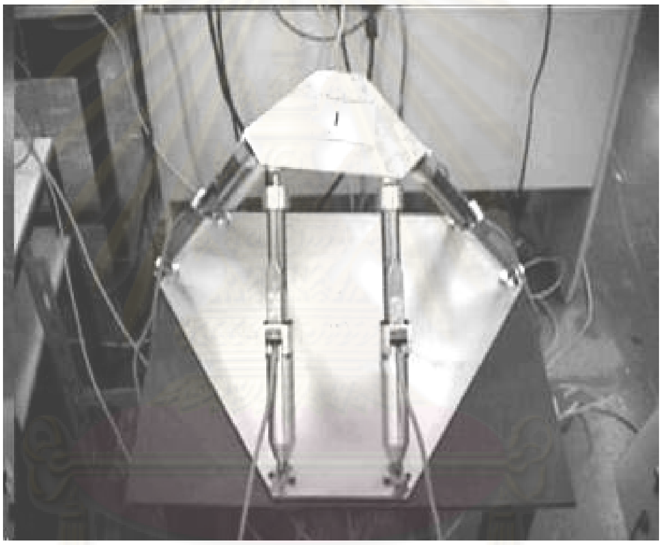
รูปที่ 2.4 นิยามของความแม่นยำทางตำแหน่งที่ทำได้จริง

แต่หากพิจารณาให้ตรงตามความจริงขึ้นไปอีกต้องรวมความไม่แม่นยำที่เกิดจากชิ้นส่วนของตัวกลไกเองด้วย ซึ่งในกรณีนี้จะนิยามความละเอียดอยู่ที่ ครึ่งหนึ่งของความละเอียดทางตำแหน่งที่ทำได้จริง(Spatial Resolution) ดังที่แสดงในรูป 2.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
แนวทางการสอบเทียบ

กลไกที่มีโครงสร้างแบบขนานซึ่งนิยมใช้ศึกษาวิธีการสอบเทียบกันมากคือโครงสร้างแบบสจ๊วต (Stewart Platform Manipulator) ถูกสร้างครั้งแรกโดย D.Stewart ในปี ค.ศ.1965 ใช้ในการพัฒนาโครงสร้างของเครื่องจำลองการบิน (Flight Simulator) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระซึ่งมีลักษณะแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1 โดยที่แผ่นบนจะเชื่อมติดกับส่วนที่เป็นฐานโดยอุปกรณ์ขับที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (Linear Motor) จำนวน 6 ชุดที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกระทำโดยการควบคุมความยาวของอุปกรณ์ขับทั้ง 6 ชุดนี้ เพื่อให้ส่วนที่เคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งและทิศทางที่ผู้ควบคุมต้องการได้



รูปที่ 3.1 แขนกลสจ๊วต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื่องจากเป็นกลไกที่ถูกคิดค้นและพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานถึงขั้นผลิตออกมาจำหน่ายเพื่อใช้งานจริงในอุตสาหกรรม จึงทำให้สะดวกในแง่ของการที่ผู้ศึกษาหาวิธีสอบเทียบหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบขนาน ไม่ต้องยุ่งวุ่นวายในการปรับปรุงฮาร์ดแวร์ของหุ่นซ้ำอีก แนวทางการสอบเทียบที่พัฒนาขึ้นจากกกลไกนี้มีหลายวิธี จะพบใน [1] ว่าการรู้ตำแหน่งและทิศทางการหมุนของแพลตฟอร์มเทียบกับโลกนั้น สามารถใช้สมการอินเวอร์สคิเมติกส์คำนวณหาความยาวของขาหุ่นยนต์ทั้ง 6 ขาได้ โดยการลดเศษตกค้างของความผิดพลาดระหว่างความยาวของขาหุ่นยนต์ที่ได้จากการคำนวณกับความยาวของขาหุ่นยนต์ที่ได้จากการ

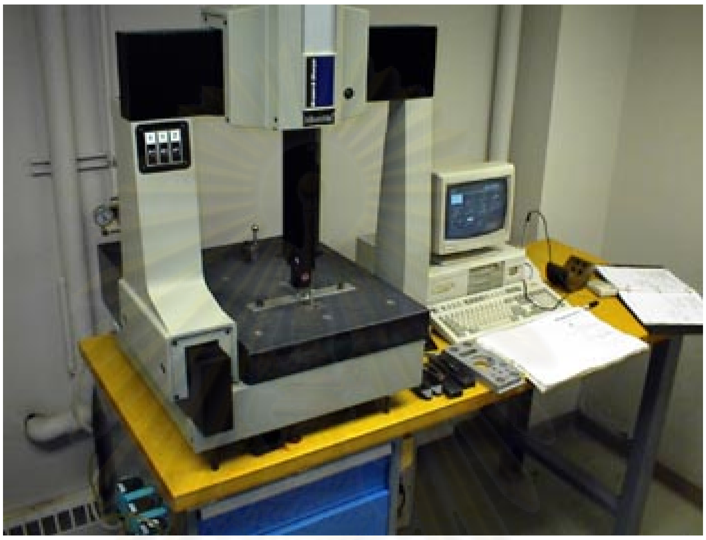
วัด อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดหาตำแหน่งและทิศทางการหมุนสำหรับงานวิจัยนี้คือธีโอโดไลท์ (Theodolite) เทคนิคการวัดโดยใช้ธีโอโดไลท์สามารถศึกษาได้จาก [8]

รูปที่ 3.2 ธีโอโดไลท์

ในขณะที่ [2] ใช้วิธีการที่คล้ายคลึงกัน แต่เปลี่ยนมาใช้ อินไคล์นโนมิเตอร์ (Inclinometer) สองตัวซึ่งติดอยู่บนแพลตฟอร์มแทนการใช้ธีโอโดไลท์ โดยการลดค่าความผิดพลาดระหว่างทิศทางการหมุน (Orientation) ของแพลตฟอร์มที่คำนวณได้จากเมทริกซ์การแปลงกับทิศการหมุนที่วัดได้จริงจากอินไคล์นโนมิเตอร์

รูปที่ 3.3 อินไคล์นโนมิเตอร์

[3] ใช้การสร้างเงื่อนไขทางกลไก โดยการยึดข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซลไม่ให้เคลื่อนที่สลับกับข้อต่อแบบทรงกลมเข้าช่วยเพื่อหาตำแหน่งและทิศทางของแพลตฟอร์ม [4] ใช้การติดอุปกรณ์ตรวจรู้บนข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซลบางข้อต่อเพิ่ม เพื่อช่วยในการวัดหาตำแหน่งและทิศทางการหมุนของแพลตฟอร์ม [5],[6]นำเอาหุ่นยนต์ไปตั้งบนซีเอ็มเอ็มที่มีขนาดใหญ่เพื่อวัดหาตำแหน่งและทิศทางของแพลตฟอร์ม



รูปที่ 3.4 แสดงเครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกน
ของบริษัท Brown&Sharpe

ตัวอย่างข้างต้นล้วนใช้สมการคิเนแมติกส์เป็นตัวหลักในการสร้างเทคนิคการสอบเทียบที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งพบในกลไกแบบสจ๊วต สำหรับแนวทางที่ดูแตกต่างออกไปพบใน [7] ซึ่งนำเสนอการสอบเทียบผ่านสมการจาโคเบียน โดยมี 2 แนวทางให้เลือกคือ ทางเลือกแรกใช้สมการจาโคเบียนในรูปของสมการแรง $\tau = J^T w$ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องติดอุปกรณ์ตรวจรู้เพิ่มเติมคือ ติดอุปกรณ์ตรวจรู้ทอร์คที่แต่ละข้อต่อ กับติดอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและทอร์คที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ ทางเลือกที่สองใช้สมการจาโคเบียนในรูปของสมการความเร็ว $J\dot{\theta} = t$ ในกรณีนี้ต้องติดอุปกรณ์ตรวจรู้สำหรับวัดความเร็วที่ปลายแขนเพิ่มเติม ซึ่งแนวทางนี้มีตัวอย่างงานวิจัยมากมายเช่นกัน แต่เนื่องจากแนวทางแบบหลังนี้เหมาะที่จะใช้ในการสอบเทียบกลไกที่ใช้งานในเชิงเป็นแขนกลมากกว่าที่จะใช้ในการสอบเทียบแฮบติค จึงไม่ขออ้างอิงถึงมากนัก

จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถบอกคร่าวๆได้ว่าแนวทางการสอบเทียบจะเริ่มมาจากการกำหนดว่า จะใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์มาเป็นจุดเริ่มต้นในการคิดค้นเทคนิคการสอบเทียบ ซึ่งมี 2 แนวทางหลักๆคือ ใช้สมการคิเนแมติกส์ของกลไก หรือ ใช้

สมการจาโคเบียนของกลไกและเนื่องจากกลไกที่ต้องการสอบเทียบเป็นแฮบติด จึงเลือกใช้สมการคิเนแมติกส์ของกลไกในการหาวิธีสอบเทียบ

เมื่อได้ว่าจะใช้ความสัมพันธ์ของกลไกในทางคิเนแมติกส์เพื่อการสอบเทียบแล้ว หากพิจารณาลงไปในรายละเอียดอีก จะพบว่าสมการคิเนแมติกส์สำหรับหุ่นยนต์นั้นแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ และ สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ จากตัวอย่างงานวิจัยขั้นต้นมีทั้งที่ใช้สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์และสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์เป็นจุดเริ่มต้นในการคิดค้นหาเทคนิคการสอบเทียบ แต่เนื่องจากกลไกที่มีโครงสร้างแบบปิดนั้นโดยทั่วไปแล้วการหาสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ทำได้ง่ายกว่า มีรูปแบบตายตัว ในขณะที่สมการฟอร์ดเวิร์ดคิเนแมติกส์จะมีรูปสมการไม่ตายตัว บางครั้งก็หาไม่ได้ หรือไม่ก็อยู่ในรูปเชิงการคำนวณตัวเลข (Numerical Form) งานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งใช้สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์เป็นหลัก ทำให้ปัญหาของการสอบเทียบถูกลดทอนให้เหลืออยู่ตรงที่การหาเทคนิคในการวัดตำแหน่งและทิศทางการหมุนของแพลตฟอร์ม แต่หากเลือกใช้สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ อาจจะต้องมีภาระงานเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการคำนวณเชิงตัวเลขเมื่อใช้สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ที่อยู่ในรูปเชิงการคำนวณตัวเลข ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาต่างก็นำเสนอวิธีที่แตกต่างกันออกไป

ในส่วนของแฮบติคที่จะทำการสอบเทียบในครั้งนี้ ในงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการหาความสัมพันธ์ทางคิเนแมติกส์ของกลไกไว้ทั้งสองแบบ คือมีทั้งสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์และสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ โดยสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ได้มาจากการใช้วิธีการทางรูปภาพผสมกับการใช้เวคเตอร์ ในขณะที่สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ได้มาจากเมทริกซ์การแปลง(Transformation Matrix) และด้วยการติดอุปกรณ์ตรวจรู้เพิ่ม ทำให้สมการฟอร์เวิร์ดเคิเนแมติกส์มีรูปสมการที่ตายตัว (ดูรายละเอียดในบทที่ 4) การเลือกว่าจะใช้สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ หรือฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ในการสอบเทียบสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

เนื่องการความไม่สมบูรณ์ของชิ้นส่วนในขั้นตอนการสร้าง รวมทั้งความผิดพลาดในขั้นการประกอบ ทำให้คิเนแมติกส์ของกลไกไม่ตรงตามที่ออกแบบไว้ จำเป็นที่จะต้องมีการปรับปรุงให้สมการคิเนแมติกส์มีความคล้ายคลึงกับความเป็นจริงให้มากที่สุด จากการศึกษาและพิจารณาสมการทั้งสองของแฮบติดพบว่า การปรับปรุงสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ทำได้ง่ายกว่าสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ เนื่องจากสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ใช้วิธีการทางรูปภาพ ซึ่งเมื่อหากต้องการเพิ่มเติมพารามิเตอร์ให้กับกลไกแล้ว พบว่าการพิสูจน์เพื่อหาสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ใหม่ทำได้ค่อนข้างยาก

ในงานวิจัยที่อ้างถึงในขั้นต้น ใช้โครงสร้างสจ๊วตในการสอบเทียบ ซึ่งมีการหาสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ที่ตายตัวไว้ค่อนข้างสมบูรณ์ ในขณะที่สมการฟอร์เวิร์ดสคิเนแมติกส์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปเชิงการคำนวณตัวเลข ทำให้การเลือกใช้สมการอินเวอร์สคินแมติกส์มีความเหมาะสมกว่าในแง่การคำนวณ แต่แฮบติคที่จะทำการสอบเทียบในครั้งนี้ได้มีการแก้ปัญหาของ

ฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ไว้แล้วด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้เพิ่ม ทำให้หาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ที่มีสมการตายตัวได้

จากสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ที่อยู่ในรูปทั่วไป $y = f(q_i, x)$ เมื่อ q_i คือมุมที่ข้อต่อต่างๆ x คือพารามิเตอร์ และสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ที่อยู่รูปทั่วไป $q_i = g(y_i, x)$ เมื่อ y_i คือเวคเตอร์บอกตำแหน่งและทิศการหมุนของปลายแขน การเลือกใช้สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์จะต้องหาทั้งตำแหน่งและทิศทางการหมุนไปพร้อมๆกันในขณะที่สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ต้องการแค่ตำแหน่งเท่านั้น

จากเหตุผลข้างต้น การเลือกใช้สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์จึงดูเหมาะสมกว่าการใช้สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ทั้งในแง่ของการความยากทางคณิตศาตร์และการจัดหาอุปกรณ์วัดภายนอกเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการสอบเทียบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
จลนศาสตร์ของแขนกล

จากบทที่ 3 ได้ข้อสรุปที่ว่าจะใช้สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์เป็นสมการตั้งต้นในการสอบเทียบแฮบติค ในบทนี้จะนำเสนอสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ที่ได้รับการปรับปรุงให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง ช่วงแรกจะขออธิบายสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์แบบดั้งเดิมก่อน

4.1 สมการฟอร์เวิร์ดแบบเดิม

ในการหาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์จะขอหมุนอุปกรณ์แฮบติคกลับขึ้นมาในแนวตั้งก่อนเพื่อให้รูปง่ายต่อการพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งกำหนดให้

i = 1, 2, 3 แทนลำดับของแขน

r_b แทนระยะจากจุดศูนย์กลางของฐานล่าง (จุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ 0) ถึงจุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ 1 ของแขนที่ i

d^i แทนระยะที่ข้อต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่ของแขนที่ i

L^i แทนความยาวของแขนที่ i (แต่เนื่องจาก $L^1 = L^2 = L^3 = L$)

θ_1^i แทนมุมที่อยู่บน Coordinate Frame ที่ 1 ของแขนที่ i

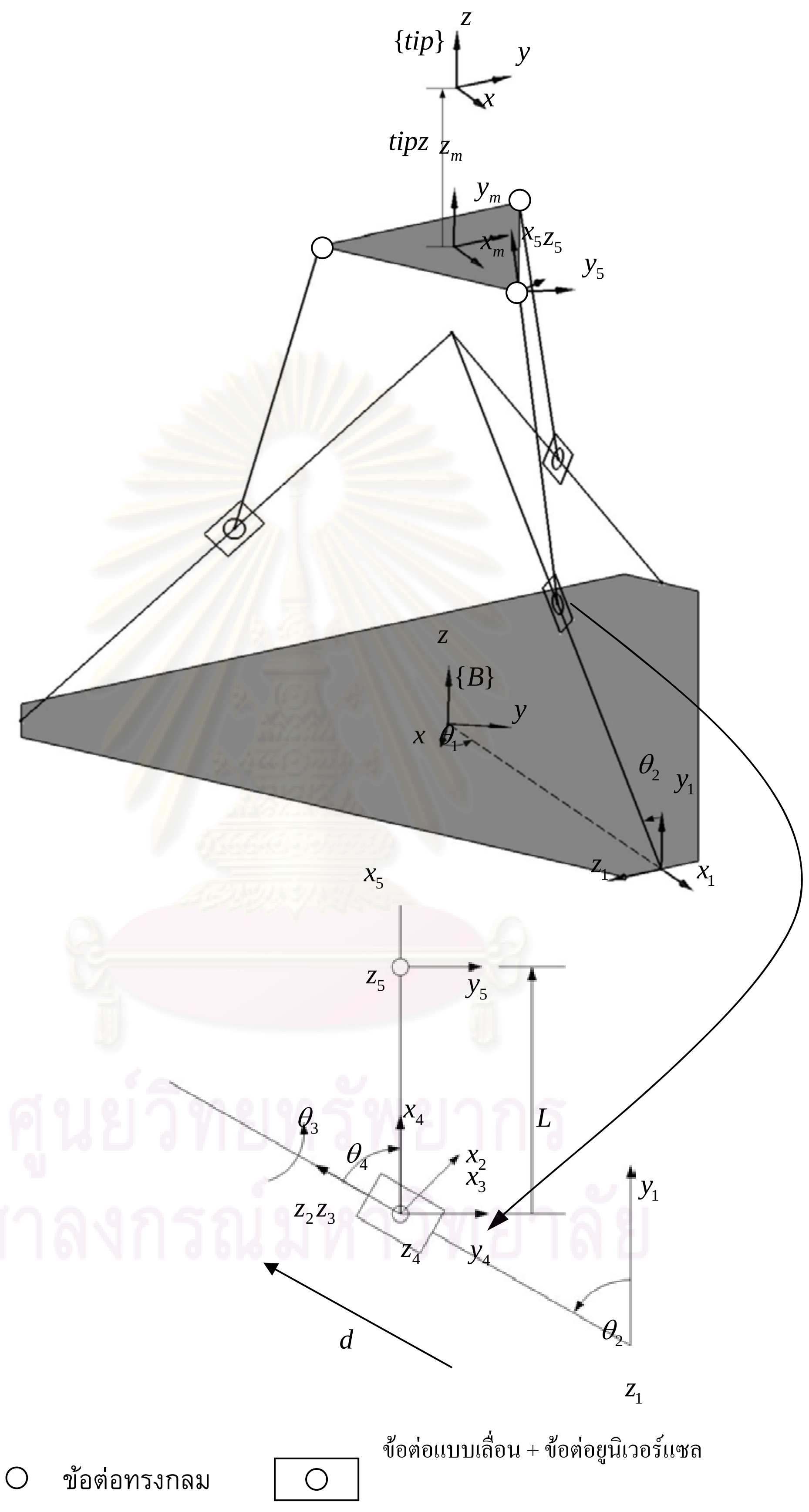
$\theta_1^1 = 0°$, $\theta_1^2 = 120°$, $\theta_1^3 = 240°$

θ_2^i แทนมุมที่อยู่บน Coordinate Frame ที่ 2 ของแขนที่ i

$c = \cos$

$s = \sin$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 เวคเตอร์และเฟรมต่าง ๆที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.1 จะแสดงให้เห็นว่าแต่ละ Coordinate Frame ถูกวางอยู่อย่างไร โดยเริ่มด้วย

เฟรมที่ 0 ซึ่งติดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของฐานของอุปกรณ์แฮบติค

เฟรมที่ 1 ซึ่งติดอยู่ที่ปลายของก้านโยง (ใช้ทำหน้าที่เป็นแนวแกนให้ข้อต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่ตามแนวแกนนี้) ด้านที่ติดกับฐาน (ทำให้เกิดพารามิเตอร์แขนละ 2 ตัวคือ θ_1 และ r_b)

เฟรมที่ 2 ซึ่งติดอยู่ที่ข้อต่อแบบเลื่อน (ทำให้เกิดพารามิเตอร์ θ_2 และ d_0 โดยที่ d_0 เป็นค่าเริ่มต้นของข้อต่อแบบเลื่อน)

ส่วนเฟรมที่ 3 และเฟรมที่ 4 จะติดอยู่ที่ข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล (มีพารามิเตอร์ 2 ตัวคือ θ_{03} และ θ_{04} ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นของข้อต่อแบบยูนิเวอร์ซอล) เฟรมที่ 5 ซึ่งติดอยู่กับปลายของก้านโยง (เกิดพารามิเตอร์ L ซึ่งเป็นค่าความยาวของก้านโยง)เพราะฉะนั้น Transformation Matrix ของ Coordinate Frame ที่ j เทียบกับ Coordinate Frame ที่ $j+1$ ของแขนที่ i เป็นดังนี้ (เมื่อ $j = 0,1,2,3,4$ และให้ $0 = B$)

$$ {}^{B}_{1}T^{i} = \begin{bmatrix} c\theta_1^i & 0 & s\theta_1^i & r_b c\theta_1^i \\ s\theta_1^i & 0 & -c\theta_1^i & r_b s\theta_1^i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{1}_{2}T^{i} = \begin{bmatrix} c\theta_2^i & 0 & -s\theta_2^i & -d^i s\theta_2^i \\ s\theta_2^i & 0 & c\theta_2^i & d^i c\theta_2^i \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{2}_{3}T^{i} = \begin{bmatrix} c\theta_3^i & -s\theta_3^i & 0 & 0 \\ s\theta_3^i & c\theta_3^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{3}_{4}T^{i} = \begin{bmatrix} s\theta_4^i & c\theta_4^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ c\theta_4^i & -s\theta_4^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$
{}^{4}_{5}T^{i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

เพราะฉะนั้น Transformation Matrix ของ Coordinate Frame ที่ 5 เมื่อเทียบกับ Coordinate Frame ที่   ของแขนที่ i มีค่าเป็นดังนี้ ${}^{B}_{5}T^{i} = {}^{B}_{1}T^{i}\,{}^{1}_{2}T^{i}\,{}^{2}_{3}T^{i}\,{}^{3}_{4}T^{i}\,{}^{4}_{5}T^{i}$

$$
{}^{B}_{5}T^{i} = \begin{bmatrix} {}^{B}_{5}T^{i}_{1,1} & {}^{B}_{5}T^{i}_{1,2} & {}^{B}_{5}T^{i}_{1,3} & {}^{B}_{5}T^{i}_{1,4} \\ {}^{B}_{5}T^{i}_{2,1} & {}^{B}_{5}T^{i}_{2,2} & {}^{B}_{5}T^{i}_{2,3} & {}^{B}_{5}T^{i}_{2,4} \\ {}^{B}_{5}T^{i}_{3,1} & {}^{B}_{5}T^{i}_{3,2} & {}^{B}_{5}T^{i}_{3,3} & {}^{B}_{5}T^{i}_{3,4} \\ {}^{B}_{5}T^{i}_{4,1} & {}^{B}_{5}T^{i}_{4,2} & {}^{B}_{5}T^{i}_{4,3} & {}^{B}_{5}T^{i}_{4,4} \end{bmatrix}
$$

เมื่อ

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{1,1} = \left(c\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3} - s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{3}\right)s\theta^{i}_{4} - c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{2,1} = \left(s\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3} + c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{3}\right)s\theta^{i}_{4} - s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{3,1} = s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3}s\theta^{i}_{4} + c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{4,1} = 0
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{1,2} = \left(c\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3} - s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{3}\right)c\theta^{i}_{4} + c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}s\theta^{i}_{4}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{2,2} = \left(s\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3} + c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{3}\right)c\theta^{i}_{4} + s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}s\theta^{i}_{4}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{3,2} = s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3}c\theta^{i}_{4} - c\theta^{i}_{2}s\theta^{i}_{4}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{4,2} = 0
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{1,3} = -c\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}s\theta^{i}_{3} - s\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{3}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{2,3} = -s\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}s\theta^{i}_{3} + c\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{3}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{3,3} = -s\theta^{i}_{2}s\theta^{i}_{3}
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{4,3} = 0
$$

$$
{}^{B}_{5}T^{i}_{1,4} = \left(\left(c\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3} - s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{3}\right)s\theta^{i}_{4} - c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}\right)L - d^{i}\left(c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}\right) + r_{b}c\theta^{i}_{1}
$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$${}^{B}_{5}T^{i}_{2,4} = \left(\left(s\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3} + c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{3}\right)s\theta^{i}_{4} - s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}\right)L - d^{i}\left(s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}\right) + r_{b}s\theta^{i}_{1}$$

$${}^{B}_{5}T^{i}_{3,4} = \left(s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3}s\theta^{i}_{4} + c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}\right)L + d^{i}\left(c\theta^{i}_{2}\right)$$

$${}^{B}_{5}T^{i}_{4,4} = 1$$

เพราะฉะนั้นเวคเตอร์ตำแหน่ง (Position Vector) ของ Coordinate Frame ที่ 5 เมื่อเทียบกับ Coordinate Frame ที่ B ของแขนที่ i มีค่าเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} {}^{B}_{5}\vec{P}^{i} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{B}_{5}T^{i} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} {}^{B}_{5}\vec{P}^{i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\left(c\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3} - s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{3}\right)s\theta^{i}_{4} - c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}\right)L - d^{i}\left(c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}\right) + r_{b}c\theta^{i}_{1} \\ \left(\left(s\theta^{i}_{1}c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3} + c\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{3}\right)s\theta^{i}_{4} - s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}\right)L - d^{i}\left(s\theta^{i}_{1}s\theta^{i}_{2}\right) + r_{b}s\theta^{i}_{1} \\ \left(s\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{3}s\theta^{i}_{4} + c\theta^{i}_{2}c\theta^{i}_{4}\right)L + d^{i}\left(c\theta^{i}_{2}\right) \\ 1 \end{bmatrix}$$

เพราะฉะนั้น Transformation Matrix ของฐานบน (จุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ M) เมื่อเทียบกับฐานล่าง (จุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ B) คือ

$${}^{B}_{M}T = \begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{o} & \vec{a} & {}^{B}_{M}\vec{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อเวคเตอร์ตำแหน่งของฐานบนเมื่อเทียบกับฐานล่างคือ

$${}^{B}_{M}\vec{P} = \frac{1}{3}\left({}^{B}_{5}\vec{P}^{1} + {}^{B}_{5}\vec{P}^{2} + {}^{B}_{5}\vec{P}^{3}\right)$$

Orientation ของฐานบนเมื่อเทียบกับฐานล่างคือ

$$\vec{n} = \frac{{}^{B}_{5}\vec{P}^{1} - {}^{B}_{M}\vec{P}}{\left|{}^{B}_{5}\vec{P}^{1} - {}^{B}_{M}\vec{P}\right|}, \quad \vec{o} = \frac{{}^{B}_{5}\vec{P}^{2} - {}^{B}_{5}\vec{P}^{3}}{\left|{}^{B}_{5}\vec{P}^{2} - {}^{B}_{5}\vec{P}^{3}\right|}, \quad \vec{a} = \vec{n} \times \vec{o}$$

และสุดท้าย Coordinate Frame ที่ปลายแขนแฮบติค ซึ่งมีทิศทางการวางตัวเหมือนกับ Coordinate Frame ที่ 5 แต่ห่างออกมาในทิศทาง z (ทำให้เกิดพารามิเตอร์ $tipz$ ซึ่งเป็นความยาวของปลายแขนแฮบติค) เพราะฉะนั้น Transformation Matrix ของปลายแขนเมื่อเที่ยบกับฐานล่างคือ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$ {}^{B}_{tip}T = {}^{B}_{M}T\,{}^{M}_{tip}T \quad \text{เมื่อ} \quad {}^{M}_{tip}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & tipz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

สรุปอีกครั้งก็คือแต่ละขาจะมีพารามิเตอร์ทั้งหมด 7 ตัวคือ $\theta_1, r_b, \theta_2, d_0, \theta_{03}, \theta_{04}, L$ เมื่อรวมกับพารามิเตอร์ความยาวปลายแขน $tipz$ จะได้จำนวนพารามิเตอร์ทั้งหมด 22 ตัว ในลำดับต่อไปจะพิจาณา Coordinate Frame ที่จำเป็นต้องปรับปรุงพารามิเตอร์

4.2 สมการฟอร์เวิร์ดแบบใหม่

Coordinate Frame 2

พิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า Coordinate Frame ที่ 2 หรือข้อต่อแบบเลื่อน เคลื่อนที่อยู่ในระนาบ xy ของ Coordinate Frame ที่ 1 แบบใหม่ปรับให้ระนาบ zx ของ Coordinate Frame ที่ 2 ไม่ซ้อนทับกับระนาบ xy ของ Coordinate Frame ที่ 1 โดยการหมุน Coordinate Frame ที่ 2 เดิมรอบแกน y_1 ทำให้เกิดพารามิเตอร์ α_2

$$ {}^{1}_{2}R^{new} = R_{y_1}(\alpha_2)\,{}^{1}_{2}R = \begin{bmatrix} c\alpha_2 & 0 & s\alpha_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\alpha_2 & 0 & c\alpha_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{1}_{2}R^{new} = \begin{bmatrix} c\alpha_2 c\theta_2 & -s\alpha_2 & -c\alpha_2 s\theta_2 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 \\ -s\alpha_2 c\theta_2 & -c\alpha_2 & s\alpha_2 s\theta_2 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{1}P^{new}_{org2} = d_2\,{}^{1}_{2}\hat{z} = \begin{bmatrix} -d_i c\alpha_2 s\theta_2 \\ d_i c\theta_2 \\ d_i s\alpha_2 s\theta_2 \end{bmatrix} \quad \because R = [\hat{x} \quad \hat{y} \quad \hat{z}] $$

$$ {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} {}^{1}_{2}R^{new} & {}^{1}P^{new}_{org2} \\ 0 \;\; 0 \;\; 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Coordinate Frame 4

พิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าแกน z ของ Coordinate Frame ที่ 4 (หรือแกนหมุนของข้อต่อแบบหมุนตัวหนึ่งในข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล) ตั้งฉากกับระนาบ xy ของ Coordinate Frame ที่ 3 แบบใหม่ปรับให้แกน z ดังกล่าวไม่ตั้งฉากกับระนาบ xy ของ Coordinate Frame ที่ 3 โดยใช้การหมุนแบบออยเลอร์รอบแกน x และ y ตามลำดับ ทำให้เกิดพารามิเตอร์ γ_2, β_2

$$ {}_4^3R^{new} = {}_4^3RR_x(\gamma)R_y(\beta) $$

$$ {}_4^3R^{new} = \begin{bmatrix} s\theta_4 & c\theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma_4 & -s\gamma_4 \\ 0 & s\gamma_4 & c\gamma_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta_4 & 0 & s\beta_4 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta_4 & 0 & c\beta_4 \end{bmatrix} $$

$$ {}_4^3R^{new} = \begin{bmatrix} s\theta_4 & c\theta_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta_4 & 0 & s\beta_4 \\ s\gamma_4 s\beta_4 & c\gamma_4 & -s\gamma_4 c\beta_4 \\ -c\gamma_4 s\beta_4 & s\gamma_4 & c\gamma_4 c\beta_4 \end{bmatrix} $$

$$ {}_4^3R^{new} = \begin{bmatrix} s\theta_4^i c\beta_4^i + c\theta_4^i s\gamma_4^i s\beta_4^i & c\theta_4^i c\gamma_4^i & s\theta_4^i s\beta_4^i - c\,\theta_4^i\, s\,\gamma_4^i\, c\,\beta_4^i \\ -c\gamma_4^i s\beta_4^i & s\gamma_4^i & c\gamma_4^i c\beta_4^i \\ c\theta_4^i c\beta_4^i - s\theta_4^i s\beta_4^i s\gamma_4^i & -s\theta_4^i c\gamma_4^i & c\theta_4^i s\beta_4^i + s\theta_4^i s\gamma_4^i c\beta_4^i \end{bmatrix} $$

พิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า Origin ของ Coordinate Frame ที่ 4 ซ้อนทับกับ Origin ของ Coordinate Frame ที่ 3 แบบใหม่ปรับให้ Origin ของ Coordinate Frame ที่ 4 มีออฟเซ็ท (Offset) จากแกน xy ของ Coordinate Frame ที่ 3 ทำให้เกิดพารามิเตอร์ a_4, b_4

$$ {}^3P_{org4}^{new} = \begin{bmatrix} a_4^i \\ b_4^i \\ 0 \end{bmatrix} $$

Coordinate Frame ที่ปลายแขน

พิจารณาจากสมการที่ จะเห็นว่าตำแหน่งของ Coordinate Frame Tip อยู่ตรงจุดกึ่งกลางของสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีด้านประกอบซึ่งเกิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากปลายของก้านโยงทั้งสาม แต่เนื่องจากในความเป็นจริงแล้วปลายของก้านโยงทั้งสามไม่มีทางห่างเท่าๆกันเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า จึงปรับให้ Origin ของ Coordinate Frame M ซึ่งเดิมอยู่ตรงกึ่งกลางแผ่นสามเหลี่ยม ไปซ้อนทับอยู่กับ Coordinate Frame ที่ 5 ของขาที่ 1 และกำหนดพารามิเตอร์ $\begin{bmatrix} tipx & tipy & tipz \end{bmatrix}^T$ เพื่อเป็นเวคเตอร์บอกตำแหน่ง Coordinate Frame ที่ปลายแขน เทียบกับ Coordinate Frame M

$$ {}^{B}_{M}\vec{P} = {}^{B}_{5}\vec{P}^{1} $$

$$ {}^{B}_{tip}T = {}^{B}_{M}T\, {}^{M}_{tip}T \quad \text{เมื่อ} \quad {}^{M}_{tip}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & tipx \\ 0 & 1 & 0 & tipy \\ 0 & 0 & 1 & tipz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

สรุปจนถึงตอนนี้พารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละขามี $\alpha_2, \gamma_4, \beta_4, a_4, b_4$ (รวม 3 ขาเป็น 15 ตัว) และ $tipx, tipy$ อีก 2 ตัว รวมทั้งหมดเป็น 17 ตัว

4.3 พารามิเตอร์เนื่องจากกลไก

ยังมีพารามิเตอร์ซึ่งเกิดจากการที่เอ็นโค้ดเดอร์บางข้อต่อไม่ได้ถูกใช้วัดค่าการหมุนโดยตรงแต่ผ่านกลไกทดรอบ หรือไม่ก็เกิดจากการใช้โรตารี่เอ็นโค้ดเดอร์มาใช้วัดหาระยะทางแบบเส้นตรง ซึ่งสามารถพิจารณาที่แต่ละข้อต่อได้ดังนี้

4.3.1 ข้อต่อแบบเลื่อน

สมการระยะกระจัดที่ข้อต่อแบบเลื่อนเป็น

$$ d = d_0 + \Delta d \quad \text{เมื่อ} \quad \Delta d = \frac{2\pi R_d}{x_d} \Delta x_d \qquad (4.1) $$

โดยที่

R_d คือรัศมีของพูเล่ย์ที่สวมอยู่กับเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งใช้อ่านค่าสำหรับข้อต่อแบบเลื่อน

x_d คือความละเอียดของเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งอ่านค่าสำหรับข้อต่อแบบเลื่อน

Δx_d คือจำนวนพัลส์ที่อ่านได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ (เกิดพารามิเตอร์ R_d)

4.3.2 ข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล

เพื่อความสะดวกในการพิจารณา ในที่นี้ขอแยกข้อต่อยูนิเวอร์แซลออกเป็นข้อต่อแบบหมุนที่ 3 และข้อต่อแบบหมุนที่ 4

ข้อต่อแบบหมุนที่ 3

ที่ข้อต่อนี้มีการใช้กลไกทดรอบ เพื่อเพิ่มความละเอียดในการวัดโดย พูเล่ย์ที่เป็นพูเล่ย์ขับ มีขนาดใหญ่กว่าพูเล่ย์ตามซึ่งสวมอยู่บนเอ็นโค้ดเดอร์ที่ใช้อ่านค่าการหมุนของข้อต่อ สมการระยะกระจัดที่ข้อต่อที่ 3 นี้เป็น

$$\theta_3 = \theta_{03} + \Delta\theta_3 \text{ เมื่อ } \Delta\theta_3 = \frac{2\pi R_{enc}}{x_3 R_{big}} \Delta x_3 \quad (4.2)$$

โดยที่

R_{enc} คือรัศมีของแกนเพลาที่สวมอยู่กับเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งใช้อ่านค่าสำหรับข้อต่อแบบหมุนที่ 3

R_{big} คือ รัศมีของพูเลย์ที่ติดอยู่กับข้อต่อแบบเลื่อน

x_3 คือ ความละเอียดของเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งใช้อ่านค่าสำหรับข้อต่อแบบหมุนข้อต่อที่ 3

Δx_3 คือจำนวนพัลส์ที่อ่านได้จาเอ็นโค้ดเดอร์ (เกิดพารามิเตอร์ R_{enc} และ R_{big})

ข้อต่อแบบหมุนที่ 4

ในส่วนของข้อต่อแบบหมุนที่ 4 นั้นเนื่องจากเป็นการใช้โรตารี่เอ็นโค้ดเดอร์วัดข้อต่อแบบหมุนโดยไม่ผ่านกลไกทดรอบ จึงไม่มีพารามิเตอร์เพิ่มเติม ณ ข้อต่อนี้

จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) จะเห็นว่ามีรูปสมการที่คล้ายกัน เราสามารถปรับให้ทั้งสองอยู่ในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\theta_i = \theta_{0i} + \frac{2\pi T_i}{x_i} \times \Delta\theta_i$$

โดยที่

θ_{0i} คือ ค่าเริ่มต้นของข้อต่อนั้นๆ

ในกรณีของข้อต่อแบบเลื่อน T_i คือ R_d

ในกรณีของข้อต่อแบบหมุนข้อต่อที่ 3 T_i คือ อัตราทด $\frac{R_{enc}}{R_{big}}$

x_i คือ ความละเอียดของเอ็นโค้ดเดอร์ที่ข้อต่อนั้นๆ

$\Delta\theta_i$ คือจำนวนพัลส์ที่อ่านได้จากเอ็นโค้ดเดอร์

สรุปก็คือในแต่ละขาจะเกิดพารามิเตอร์ที่ข้อต่อแบบหมุนข้อต่อที่ 3 และข้อต่อแบบเลื่อนอีก 2 ตัวคือ T_1, T_2 รวมทั้งหมดจะเกิดพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นอีก 6 ตัว จากฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ของเดิมที่มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 22 ตัว เมื่อรวมกับพารามิเตอร์ที่เกิดจากการปรับปรุงคิเนเมติกส์ 17 ตัว และพารามิเตอร์ที่เกิดจากกลไกที่ใช้อ่านค่าจากเอ็นโค้ดเดอร์อีก 6 ตัว รวมพารามิเตอร์ของฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ที่ปรับปรุงแล้วทั้งหมดมีจำนวนทั้งสิ้น 45 ตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
คณิตศาสตร์ที่ใช้ในการสอบเทียบ

ในบทนี้จะอธิบายถึงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พร้อมทั้งวิธีใช้งานฟังก์ชัน lsqcurvefit อย่างพอสังเขป เริ่มแรกให้พิจารณาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ที่อยู่ในรูปทั่วไป

$$y = f\left(q_i, x\right) \tag{5.1}$$

โดยที่

5. y คือ เวคเตอร์บอกตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์

6. q_i คือเวคเตอร์บอกมุมที่ข้อต่อต่างๆ

7. x คือเวคเตอร์พารามิเตอร์ต่างๆของหุ่นยนต์ เช่น ความยาวแขนหุ่นยนต์ ระยะออฟเซ็ทที่ข้อต่อ

สมการ 5.1 นี้เป็นระบบสมการที่ประกอบด้วย 3 สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งแต่ละสมการติดอยู่ในรูปของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าซึ่งเป็นพารามิเตอร์ต่างๆของหุ่นยนต์ เช่น ความยาวแขนหุ่นยนต์ ในกรณีของกลไกแขนกลนำที่เราจะทำการสอบเทียบในงานวิจัยนี้ จำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่ามีจำนวน 45 ตัว ดังที่แสดงให้เห็นในบทที่ 4 (เฉพาะพารามิเตอร์ภายในมี 45 ตัว แต่หากรวมพารามิเตอร์ภายนอกที่จำเป็นต้องใช้เพื่อการสอบเทียบ จะมีถึง 51 ตัว ซึ่งพารามิเตอร์ภายนอกนี้จะแสดงให้เห็นในบทที่ 7) ระบบสมการลักษณะนี้เรียกว่า โอเวอร์ดีเทอร์มีนซิสเต็ม (Overdetermined system) คือ มีตัวแปรที่ไม่รู้ค่ามากกว่าจำนวนสมการ การหาพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าสำหรับระบบสมการที่อยู่ในลักษณะนี้ ใช้การประยุกต์ระเบียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Opimization) เพื่อหาค่าที่น้อยที่สุดของ

$$s = \sum_{1}^{n} r_i^2$$

โดยที่

$$r_i = \hat{y} - f\left(q_i, x\right)$$

เมื่อ $\hat{y}$ คือเวคเตอร์บอกตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ภายนอก

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.1 การถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด

มีโปรแกรมสำเร็จรูปมากมายที่เตรียมฟังก์ชันสำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดไว้ให้ใช้งานได้อย่างสะดวก ในที่นี้ขอเลือกใช้โปรแกรมแมทแล็บ (MATLAB) ของบริษัทแมทเวิร์ก (MathWorks) เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่รู้จักกันดีและใช้กันอย่างแพร่หลาย โปรแกรมแมทแล็บมีทูลบ๊อกซ์ (Toolbox) อยู่ตัวหนึ่งที่ชื่อ Optimization Toolbox ซึ่งได้รวบรวมฟังก์ชันที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบต่างๆไว้ จะต้องเลือกใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับลักษณะของปัญหา จากที่กล่าวมาข้างต้น ขอสรุปลักษณะของปัญหาการสอบเทียบแฮบติคดังนี้

เป็นระบบสมการที่เรียกว่า โอเวอร์ดีเทอร์มีนซิสเต็ม

เป็นระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear system)

เป็นการแก้ปัญหากำลังสองน้อยสุดของผลรวมของค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งปลายแขนแฮบตคิที่วัดได้กับตำแหน่งของปลายแขนแฮบติคที่ได้จากสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์

จากลักษณะของปัญหาจะได้ฟังก์ชันที่เหมาะสมก็คือฟังก์ชัน lsqcurvefit ฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันสำหรับแก้ปัญหานอนลิเนียร์เคิร์ฟฟิตติ้ง (Nonlinear Curve-Fitting) โดยใช้การถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุดดังในสมการ

$$\min_{x} \frac{1}{2}\left\| F(x, xdata) - ydata \right\|_2^2 = \frac{1}{2}\sum_i \left(F(x, xdata_i) - ydata_i\right)^2 \quad (5.2)$$

ฟังก์ชัน lsqcurvefit จะรับค่าตัวแปรต้น, $xdata$ และค่าตัวแปรตามที่ได้จากระบบจริง (Observed Output), $ydata$ เป็นค่าอินพุต (Input) ของฟังก์ชัน แล้วจึงจะหาค่าพารามิเตอร์ x ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ภายในฟังก์ชัน F ที่ทำให้สมการที่ 5.2 เป็นจริง ในการเรียกใช้งานฟังก์ชัน lsqcurvefit นั้นฟังก์ชันจะต้องการพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

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

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

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

resnorm เป็นค่าเศษตกค้างรวมทั้งหมดที่เหลือจากการทำการถดถอย

residual เป็นค่าความผิดพลาดระหว่างค่าของฟังก์ชันกับค่าที่ได้จากการวัด

exitflag จะเก็บค่าที่อธิบายสาเหตุของการสิ้นสุดของการทำการถดถอยโดยถ้าหากค่าที่ได้มากกว่า 0 ก็แสดงว่าคำตอบที่ได้ลู่เข้า แต่ถ้าหากค่าที่ได้น้อยกว่า 0 ก็แสดงว่าคำตอบของฟังก์ชันไม่ลู่เข้า

output จะเก็บข้อมูลที่เกี่ยวกับการทำการถดถอยเอาไว้

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

fun คือฟังก์ชันที่ต้องการจะทำนอนลิเนียร์เคิร์ฟฟิตติ้ง ฟังก์ชันนี้จะรับค่า x แล้วส่งเวคเตอร์ F ซึ่งเป็นค่าของฟังก์ชันกลับมา

x0 เป็นค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ x ที่ใช้ในการเริ่มการทำซ้ำ

xdata ป็นเมตริกซ์ที่เก็บข้อมูลตัวแปรต้นเอาไว้

ydata เป็นเวคเตอร์ที่เก็บค่าตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง

lb และub เป็นขีดจำกัดล่าง และบนของสัมประสิทธิ์ x ที่ต้องการหา

options จะเป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และอัลกอริทึมที่ใช้ในการทำการถดถอย

อัลกอริทึมที่ฟังก์ชัน lsqcurvefit ใช้นั้น สามารถที่จะเลือกใช้ได้โดยการตั้งอัลกอริทึมที่ต้องการเก็บไว้ในพารามิเตอร์ Options ซึ่งจะมีอัลกอริทึมหลักๆ คือ

8. ลาร์จสเกลออฟติไมซ์เซชัน (Large-Scale Optimization) เป็นอัลกอริทึมมาตรฐานของฟังก์ชันซึ่งจะใช้วิธีซับสเปซทรัสรีเจียน (Subspace Trust Region Method) และตั้งอยู่บนพื้นฐานของวิธีอินทีเรียรีเฟรคทีฟนิวตัน (ณ Interior-Reflective Newton)

9. มีเดียมสเกลออฟติไมซ์เซชั่น (Medium-Scale Optimization) เป็นอัลกอริทึมที่ใช้วิธีของเลเวนเบิร์ก-มาร์คอฟ (Levenberg-Marquardt method with line-search) หรือสามารถเลือกให้ใช้วิธีของเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton Method With Line-Search) ก็ได้

แต่อย่างไรก็ดี การใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเหล่านี้ให้ได้ผลลัพธ์ที่ดี ก็ต้องเข้าใจอัลกอริทึมที่ใช้ในฟังก์ชันนั้นๆพอสมควร เพื่อให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจะขออธิบายอัลกอริทึมหลักที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งใช้กันโดยทั่วไปคร่าวๆ

5.2 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของระบบที่มีความต่อเนื่อง(Continuous optimization)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบที่มีความต่อเนื่อง โดยทั่วไปแล้วมีวิธีพื้นฐานอยู่ 2 วิธีหลักๆ คือ

1. วิธีไลน์เสริช์ (Line-Search Methods)
2. วิธีทรัสต์รีเจี้ยน (Trust-Region Methods)

ในฟังก์ชัน lsqcurvefit อัลกอริทึมลาร์จสเกลออฟติไมซ์เซชันจะใช้วิธีไลน์เสริช์ ในขณะที่อัลกอริทึมมีเดียมสเกลออฟติไมซ์เซชันจะใช้วิธีทรัสต์รีเจี้ยน เพื่อความสะดวกขอนิยามความหมายของสัญลักษณ์และตัวแปรทางคณิตศาสตร์ดังที่แสดงในตารางที่ 5.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรและสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

$F(x): R^n \to R$	คือฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการหาค่า x^* ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชันเป้าหมายนี้
x^*	ค่าที่เหมาะสมที่สุด
$g_i = \dfrac{\partial F}{\partial x_i}$	เกรเดี้ยนท์(Gradient) ของฟังก์ชัน F
$H_{i,j} = \dfrac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j}$	เฮเซี่ยนเมทริกซ์ (Hessian matrxi) ของฟังก์ชัน F
$H_k = H(x_k)$	เฮเซี่ยนเมทริกซ์ของฟังก์ชัน F ที่จุด x_k
$B_k = B(x_k)$	ค่าประมาณล่าสุดของเฮเซี่ยนเมทริกซ์ของฟังก์ชัน F ที่จุด x_k
$B^* = B(x^*)$	เฮเซี่ยนเมทริกซ์ ณ ค่าที่เหมาะสมที่สุด
$F(x+\delta) \approx Q(\delta) = F(x) + g^t + \frac{1}{2}\delta^t B\delta$	Q คือ การประมาณฟังก์ชันแบบกำลังสองของฟังก์ชัน F รอบจุด x
k	คือตัวนับจำนวนการทำซ้ำของระเบียบวิธี
s_k	ทิศทางของการหาค่าที่เหมาะสม
α_k	ขนาดหรือความยาวของช่วงในการทำซ้ำ
$\delta_k = \alpha_k s_k = x_{k+1} - x_k$	คือช่วงกว้างของการทำซ้ำ
$h_k = \|h_k\| = \|x_k - x^*\|$	คือระยะห่างระหว่างค่าล่าสุดกับค่าที่เหมาะสมที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>วิธีไลน์เสิร์ชอย่างง่าย (วิธีของนิวตัน)</u>

กำหนดให้

$$\alpha_k = 1 \text{จะได้} \delta_k = s_k$$

โดยการใช้ข้อมูลความโค้งจากเฮเซี่ยนเมทริกซ์ของฟังก์ชัน F เพื่อหาทิศทางที่ลดลง จากการประมาณฟังก์ชันเป้าหมายด้วยเทเลอร์ซีรีย์ของฟังก์ชัน F รอบ x (โดยใช้ถึงแค่พจน์ที่สาม) จะได้

$$F(x+\delta) \approx Q(\delta) = F(x) + g^t + \frac{1}{2}\delta^t B\delta$$

ซึ่งค่าที่ต่ำที่สุดของ $Q(\delta)$ คือ

$$\nabla Q(\delta_k) = g_k + B_k\delta_k = 0$$

$$B_k\delta_k = -g_k$$

ดังนั้นวิธีนิวตันจะมีขั้นตอนดังนี้

1 แก้สมการ $B_k\delta_k = -g_k$ เพื่อหา δ_k หรือก็คือหาค่าต่ำสุดของการประมาณเป็นอันดับสองของฟังก์ชัน F

2 ให้ $x_{k+1} = x_k + \delta_k$

3 ทำซ้ำขั้นตอน 1 หรือเพิ่ม k โดยจะหยุดก็ต่อเมื่อ $g_k \approx 0$

<u>วิธีทรัสต์รีเจี้ยนอย่างง่าย</u>

ในอัลกอริทึ่มทั่ว ๆไปของทรัสรีเจี้ยนแมตอดนั้นเรามักจะเลือกให้ $\alpha_k = 1$ เสมอ โดยช่วงกว้างของการทำซ้ำจะถูกปรับผ่านรัศมีบริเวณ (trust region radius)

ทรัสต์รีเจี้ยนมีขั้นตอนดังนี้

1 แก้สมการ $B_k\delta_k = -g_k$ โดยมีเงื่อนไข $\|\delta_k\| < \Delta_k$

2 คำนวณหาดีกรีออฟอกรีเม้นท์(Degree of agreement) ρ_k ระหว่าง F กับ Q

$$\rho_k = \frac{f(x_k) - f(x_k + \delta_k)}{Q_k(0) - Q_k(\delta_k)}$$

3 ปรับปรุง x_k และ Δ_k ตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าปรับปรุงสำหรับ x_k และ Δ_k ตามเงื่อนไขของ r_k

$\rho_k < 0.01$	$0.01 \le \rho_k < 0.9$	$0.9 \le \rho_k$
$x_{k+1} = x_k$ $\Delta_{k+1} = \frac{\Delta_k}{2}$	$x_{k+1} = x_k + \delta_k$ $\Delta_{k+1} = \Delta_k$	$x_{k+1} = x_k + \delta_k$ $\Delta_{k+1} = 2\Delta_k$

4 ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอน 1 โดยจะหยุดก็ต่อเมื่อ $g_k \approx 0$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทั้งสองวิธีนี้เป็นวิธีพื้นฐานซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีสำหรับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยวิธีทรัสต์รีเจี้ยนจะเริ่มจากการเลือกขนาดของการทำซ้ำหรือก็คือการเลือกขนาดของทรัสต์รีเจี้ยน(the size of trust region) จากนั้นจึงค่อยหาทิศทางของการทำซ้ำ ในขณะที่วิธีไลน์เสิร์ชจะเริ่มด้วยการเลือกทิศทางของการทำซ้ำก่อนจากนั้นจึงค่อยหาขนาดของการทำซ้ำและเนื่องจาก

5.3 สถิติศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ค่าความถูกต้องที่ได้มาจากแต่ละจุดในปริมาตรการทำงานของแฮบติคนั้น จะได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการแสดงผลการทดลองต้องอาศัยการแสดงค่าด้วยหลักทางสถิติ ซึ่งมักแสดงค่าความผิดพลาดใน 3 รูปแบบ คือ Root mean square error, Standard deviation และ Maximum error ซึ่งทั้ง 3 ค่านี้จะช่วยให้สามารถแปลและเข้าใจผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน

5.3.1 Root mean square (rms)

ในทางคณิตศาตร์ เรียกอีกชื่อนึงว่า Quadratic mean เป็นการหาค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลใดๆแบบหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่าของข้อมูลนั้นๆมีทั้งจำนวนบวกและลบ ถ้าสมมุติมีชุดข้อมูล $\{x_1, x_2, x_3, ..., x_n\}$ สามารถคำนวณหา root mean square ของชุดข้อมูลนี้ด้วยสมการ

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \cdots + x_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2}$$

5.3.2 Standard deviation (std)

ใช้วัดความแปรผัน(Variability) ของชุดข้อมูล หากค่าที่ได้มีค่าน้อยแสดงว่าชุดข้อมูลนั้นมีค่าแต่ละค่าใกล้เคียงกัน แต่ถ้ามีค่ามากแสดงว่ามีความแตกต่างระหว่างข้อมูลแต่ละค่าสูง ถ้าสมมุติมีชุดข้อมูล $\{x_1, x_2, x_3, ..., x_n\}$ และค่าเฉลี่ย $\bar{x}$ ของชุดข้อมูลนี้เป็นไปตามสมการ

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_N}{N} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$$

สามารถคำนวณหา Standard deviation สำหรับชุดข้อมูลนี้ด้วยสมการ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}$$

5.3.3 Maximum error

คือ ค่าความผิดพลาดที่มากที่สุดของชุดข้อมูลการทดลองนั้นๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
การปรับปรุงโครงสร้างและอุปกรณ์สอบเทียบ

6.1 การปรับปรุงโครงสร้าง

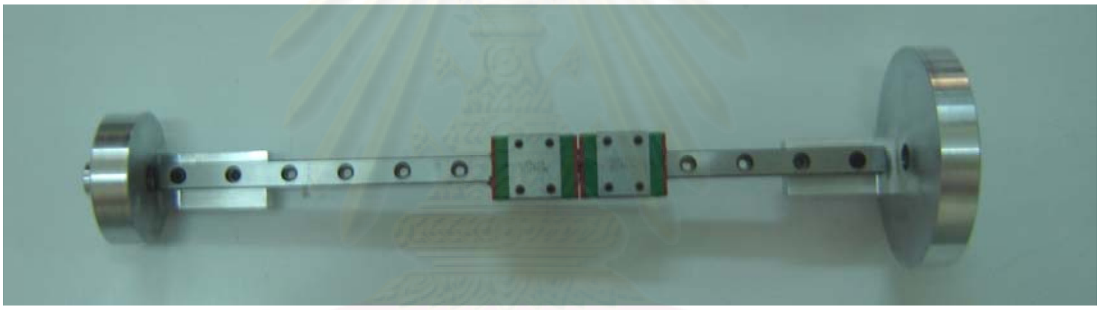
หากแบ่งงานการสร้างหุ่นยนต์หรือกลไกใดๆที่มีการควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์แล้วสามารถแบ่งภาระงานได้เป็น 2 ส่วนหลักคือ งานทางด้านฮาร์ดแวร์ (Haradware) และงานทางด้านซอฟต์แวร์ (Software) งานทางด้านฮาร์ดแวร์จะหมายถึงตั้งแต่การออกแบบ การสร้าง และการประกอบ ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของกลไก หรือภาคอิเล็กทรอนิคส์ล้วนจัดอยู่ในส่วนของงานทางด้านฮาร์ดแวร์ทั้งสิ้น ส่วนงานทางด้านซอฟต์แวร์จะหมายถึง การจัดการให้คอมพิวเตอร์หรือหน่วยประมวลผลอื่นๆสามารถเข้าใจ ติดต่อ สั่งการ ให้หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่า การปรับปรุงให้แฮบติคในงานวิจัยนี้ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นใช้การสอบเทียบหาพารามิเตอร์ที่เบี่ยงเบนไปอันเนื่องมาจากการผลิตและการประกอบ

แต่อย่างไรก็ดีการจะทำการสอบเทียบให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีนั้น ตัวกลไกหรือในที่นี้คือแฮบติคก็ต้องมีความถูกต้องแม่นยำของกลไกที่สร้าง มีความแข็งเกร็งของชิ้นส่วนที่ดี มิฉะนั้นแล้วการสอบเทียบผ่านทางซอฟต์แวร์ก็อาจจะไม่ให้ผลลัพธ์ที่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากการการที่โครงสร้างหรือชิ้นส่วนไม่ตรงตามที่ออกแบบไว้ ทำให้ต้องมีการเพิ่มพารามิเตอร์เพื่อชดเชยความผิดพลาดในส่วนนั้น ซึ่งบางส่วนอาจจะชดเชยได้ เช่น ขนาดของพูเลย์ที่ผิดไป ความยาวลิงค์สั้นหรือยาวกว่าแบบ ในขณะที่บางส่วนอาจไม่สามารถชดเชยได้ เช่น หากพูเลย์ที่กลึงไม่เป็นทรงกระบอกหรือศูนย์ไม่ดี ตรงนี้จะทำให้ค่าการเคลื่อนที่ที่อ่านได้ผิดพลาด อีกทั้งการชดเชยความไม่เป็นทรงกระบอกของพูเลย์นั้นแทบจะเป็นไปไม่ได้ หรือแม้แต่มองในแง่อุดมคติว่า ทุกความผิดพลาดสามารถชดเชยได้ด้วยการเพิ่มพารามิเตอร์ แต่ในกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นกลับจะยิ่งยากขึ้นไปอีก เนื่องจากจำนวนพารามิเตอร์ที่มากเกินไปนั่นเอง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีจึงได้มีการปรับปรุงโครงสร้าง หรือ ชิ้นส่วนบางชิ้น ให้มีความแข็งเกร็งมากยิ่งขึ้น และเพื่อให้การประกอบเป็นไปตามแบบที่ออกแบบไว้ในคอมพิวเตอร์ให้มากที่สุด เพื่อลดจำนวนพารามิเตอร์ การปรับปรุงชิ้นส่วนต่างๆของแฮบติคในงานวิจัยครั้งนี้มีดังต่อไปนี้

6.1.1 สไลด์เดอร์ที่ข้อต่อแบบเลื่อน

ก่อนการปรับปรุงใช้สไลด์เดอร์เพียงตัวเดียวดังรูปที่ 6.1 แต่เพื่อเพิ่มความแข็งเกร็งให้กับส่วนนี้ ได้เพิ่มสไลด์เดอร์เป็น 2 ตัวดังรูปที่ 6.2 การเพิ่มสไลด์เดอร์ 2 ตัวทำให้ความแข็งเกร็งเพิ่มขึ้นได้อย่างไร สามารถพิจารณาได้ดังนี้

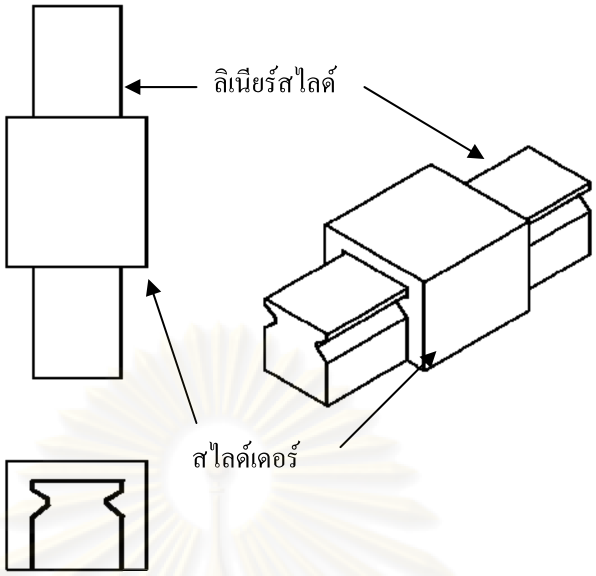
รูปที่ 6.1 ข้อต่อแบบเลื่อนก่อนการปรับปรุง



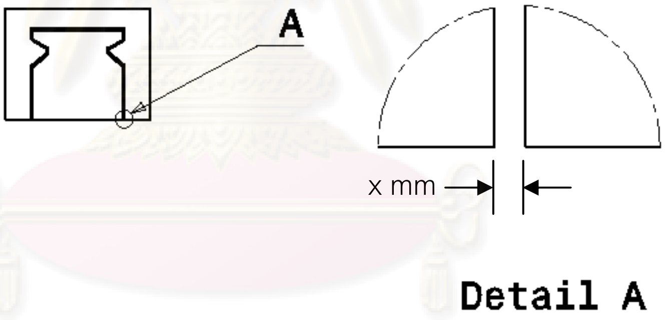
รูปที่ 6.2 ข้อต่อแบบเลื่อนหลังการปรับปรุง

พิจารณาจากรูป 6.3 โดยการกำหนดให้ชุดของข้อต่อแบบเลื่อนประกอบไปด้วย สไลด์เดอร์ (Slider) และลิเนียร์สไลด์(Linear Slide) และกำหนดให้มีเคลียร์เลนซ์ระหว่างสไลด์เดอร์และลิเนียร์สไลด์ x มิลลิเมตร ตามรูปที่ 6.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

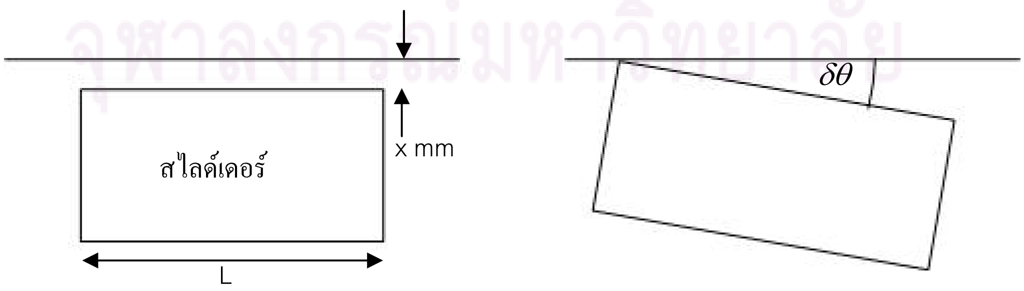


รูปที่ 6.3 ภาพจำลองส่วนประกอบข้อต่อแบบเลื่อน



รูปที่ 6.4 ภาพจำลองของระยะเผื่อที่ข้อต่อแบบเลื่อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

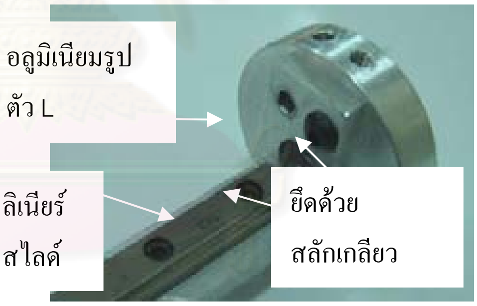


รูปที่ 6.5 ระยะเบี่ยงเบนของข้อต่อแบบเลื่อนเมื่อใช้สไลด์เดอร์ 1 ตัว

พิจารณาจากรูป 6.5 เมื่อสไลด์เดอร์เอียงภายในเคลียร์เลนซ์ระหว่างตัวมันเองกับลิเนียร์สไลด์ จะได้มุมเอียง $\delta\theta = \frac{x}{L}$ ซึ่งในกรณีที่ใช้สไลด์เดอร์ 2 ตัว หากว่าสไลด์เดอร์ทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน มุมเอียงที่ได้จะกลายเป็น $\delta\theta = \frac{x}{2L}$ นั่นคือการใช้สไลด์เดอร์ 2 ตัวจะทำให้ข้อต่อแบบเลื่อนมีความแข็งเกร็งมากยิ่งขึ้น

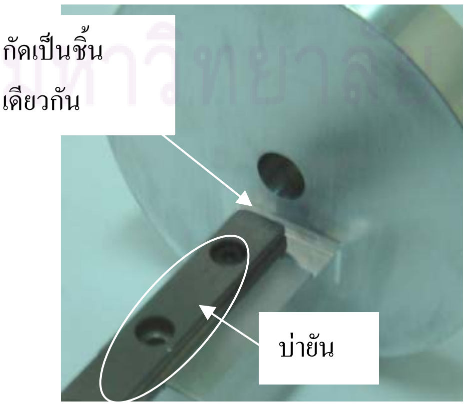
6.1.2 พูเลย์ซึ่งยึดติดกับลิเนียร์สไลด์

ก่อนปรับปรุงลิเนียร์สไลด์ยึดติดกับพูเลย์(พูเลย์นี้ใช้เป็นตัวส่งผ่านการเคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์ตรวจรู้ เพื่อวัดค่าการหมุนสำหรับข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล) ด้วยการยึดติดทั้งสองส่วน ผ่านอลูเนียมที่เป็นรูปตัว L ด้วยสลักเกลียว ดังรูปที่ 6.6 ซึ่งการยึดด้วยน๊อตย่อมเกิดความคลาดเคลื่อนในการประกอบ จึงได้ปรับปรุงโดยการ กัดชิ้นงานให้พูเลย์และอลูมิเนียม L เป็นชิ้นเดียวกัน นอกจากนั้นยังมีการทำบ่าที่อลูมิเนียมรูปตัว L เพื่อไว้ยัน ให้ลิเนียร์สไลด์ได้ตำแหน่งตามแบบเมื่อทำการยึดด้วยสลักเกลียว ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.6 พูเลย์ที่ยึดติดกับลิเนียร์สไลด์ก่อนปรับปรุง

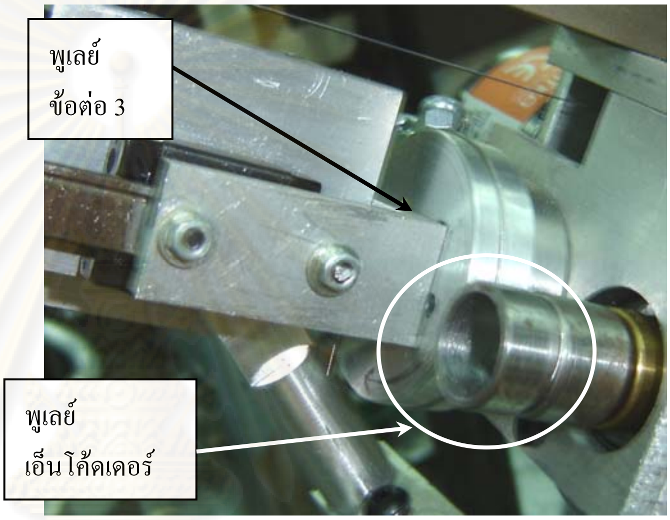
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



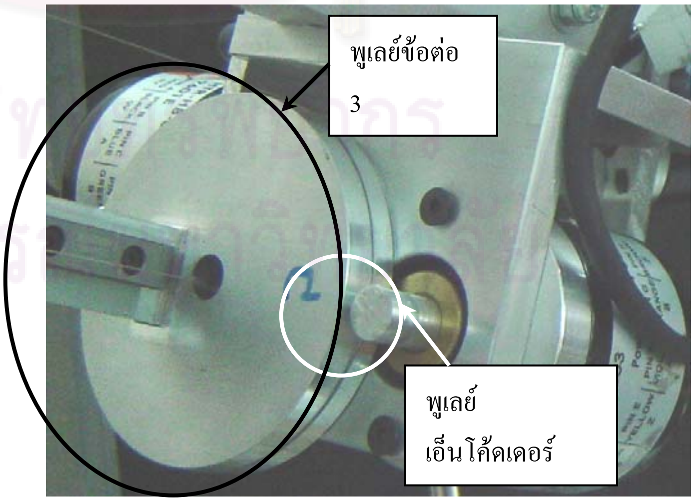
รูปที่ 6.7 พูเลย์ที่ยึดติดกับลิเนียร์สไลด์หลังปรับปรุง

6.1.3 กลไกการอ่านค่าที่ข้อต่อแบบหมุนข้อต่อที่ 3

ข้อต่อแบบหมุนนี้ก็คือข้อต่อย่อยของข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล โดยก่อนการปรับปรุง ขนาดของพูเลย์ซึ่งใช้อ่านค่าการหมุนซึ่งสวมอยู่กับเอ็นโค้ดเดอร์กับขนาดของพูเลย์ที่ใช้ส่งผ่านการหมุนจริงของข้อต่อที่ 3 มีขนาดต่างกันไม่มากนักดังแสดงในรูปที่ 6.8 เพื่อเพิ่มความไวในการอ่านค่า ได้ทำการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพูเลย์ที่ใช้ส่งผ่านการหมุนจริงของข้อต่อพร้อมกับลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของพูเลย์ที่สวมอยู่กับเอ็นโค้ดเดอร์ดังที่แสดงในรูปที่ 6.9



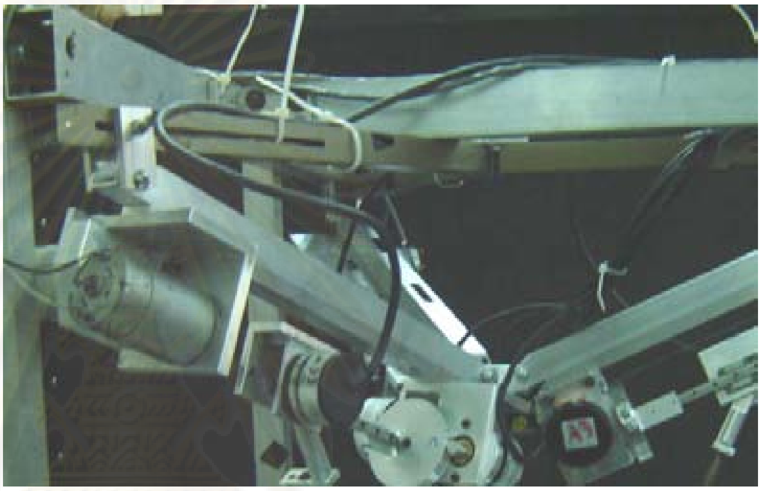
รูปที่ 6.8 กลไกทดรอบที่ข้อต่อแบบหมุนข้อต่อที่ 3 ก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 6.9 กลไกทดรอบที่ข้อต่อแบบหมุนข้อต่อที่ 3 หลังการปรับปรุง

6.1.4 โครงสร้างฐานบนของแฮบติค

การปรับปรุงส่วนนี้ทำหลังจากการสอบเทียบแฮบติคเสร็จสิ้นไปแล้ว แต่อย่างไรก็ดีผู้วิจัยก็ได้ทำการสอบเทียบเพื่อหาพารามิเตอร์ใหม่ และทำการทดสอบความแม่นยำอีกครั้ง ซึ่งผลการทดสอบได้นำเสนอเพิ่มเติมในบทที่ 7 ด้วยเช่นกัน ภาพก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 6.10 และ 6.11 ตามลำดับ



รูปที่ 6.10 โครงสร้างฐานบนก่อนการปรับปรุง

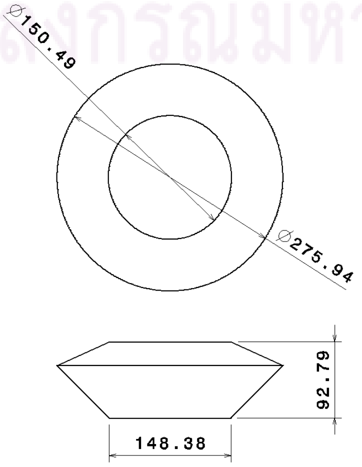
รูปที่ 6.11 โครงสร้างฐานบนหลังการปรับปรุง

จากบทที่แล้ว เลือกที่จะใช้สมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกส์ในการสร้างสมการเพื่อการสอบเทียบ เงื่อนไขในการหาแนวทางเพื่อใช้ในการสอบเทียบมีอยู่แค่อย่างเดียวคือ การหาตำแหน่งของปลายแขนของแฮบติคเทียบกับโลกให้ได้ เนื่องจากลักษณะของกลไกเป็นอุปสรรคในการวัดตำแหน่งของปลายแขนโดยตรง ไม่สามารถจะใช้เครื่องซีเอ็มเอ็มที่ทางห้องแล็บมีเพื่อวัดตำแหน่งได้ ในที่นี้เลือกใช้วิธีสร้างอุปกรณ์สอบเทียบ(Calibration Objet) ที่มีขนาดกะทัดรัดและครอบคลุมพื้นที่การใช้งานของกลไก เพื่อใช้ในการสอบเทียบ

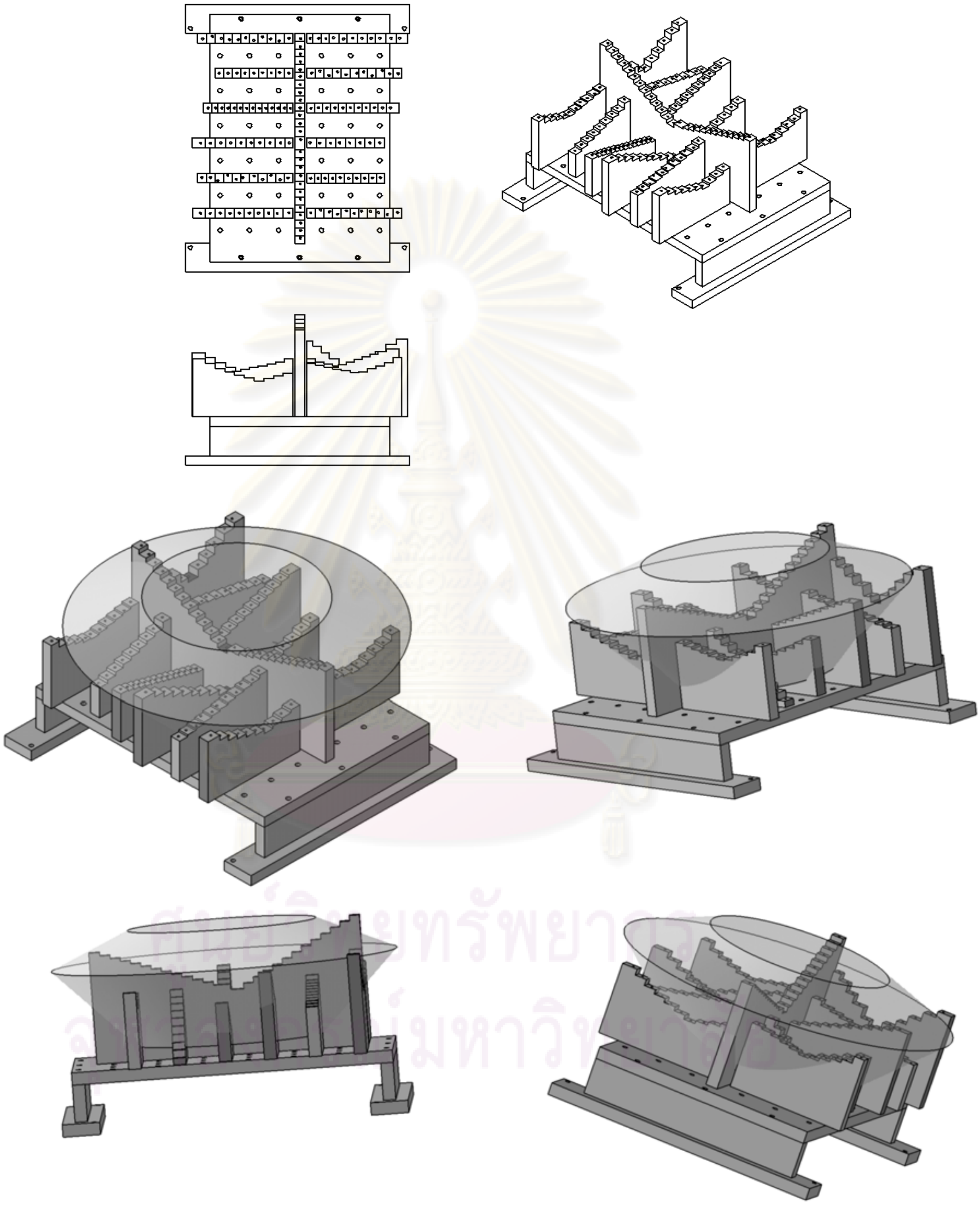
6.2 อุปกรณ์สอบเทียบ

การสร้างอุปกรณ์สอบเทียบต้องคำนึงถึงปริมาตรการทำงาน(Working Volume) ของแฮบติคเป็นหลัก เพื่อให้แบบจำลองทางคิเนแมติกส์ที่ปรับปรุงใหม่ สามารถใช้งานได้ครอบคลุม แต่งานที่ผ่านมา มิได้มีการหาปริมาตรการทำงานของแฮบติคไว้ เนื่องจากกลไกแบบปิดมีความซับซ้อนทางคณิตศาสตร์ ยากในการหาปริมาตรการทำงานในรูปของคณิตศาสตร์ ดังนั้นอันดับแรกต้องประมาณปริมาตรการทำงานของแฮบติคนี้แบบคร่าวๆเสียก่อน โดยใช้การจำลอง (Simulation) การเคลื่อนที่ของแฮบติดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาปริมาตรการทำงาน ด้วยโปรแกรมคาเทีย(CATIA) โดยโมดูลดิจิตอลมอคอัพ (Digital Mockup Module) จะได้ปริมาตรการทำงานของแฮบติคคร่าวๆดังรูปที่ 6.12 เมื่อได้ปริมาตรการทำงานจึงออกแบบอุปกรณ์สอบเทียบได้ดังรูปที่ 6.13 และ 6.14 เนื่องจากต้องการให้อุปกรณ์สอบเทียบมีน้ำหนักที่เบาแต่ในขณะเดียวกันวัสดุที่ใช้ก็ต้องแข็งไม่ยุบตัวได้ง่าย ในที่นี้จึงใช้อลูมิเนียมเกรดแข็งที่สุด (เกรด 7075) ซึ่งแม้จะมีความแข็งน้อยกว่าเหล็กแต่ก็มีน้ำหนักเบากว่าค่อนข้างมาก ทำให้สะดวกในการเคลื่อนย้าย อีกทั้งในการใช้งานจริงก็มิได้มีการใช้แรงกดปลายแขนแฮบติคลงบนอุปกรณ์สอบเทียบมากมายนัก การออกแบบให้อุปกรณ์สอบเทียบมีลักษณะนี้เนื่องมาจากให้โคออร์ดิเนทที่ครอบคลุมปริมาตรการทำงานและปลายแขนแฮบติคยังสามารถเข้าถึงโคออร์ดิเนทเหล่านี้ได้ง่าย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.12 ปริมาตรการทำงานของแฮบติค



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

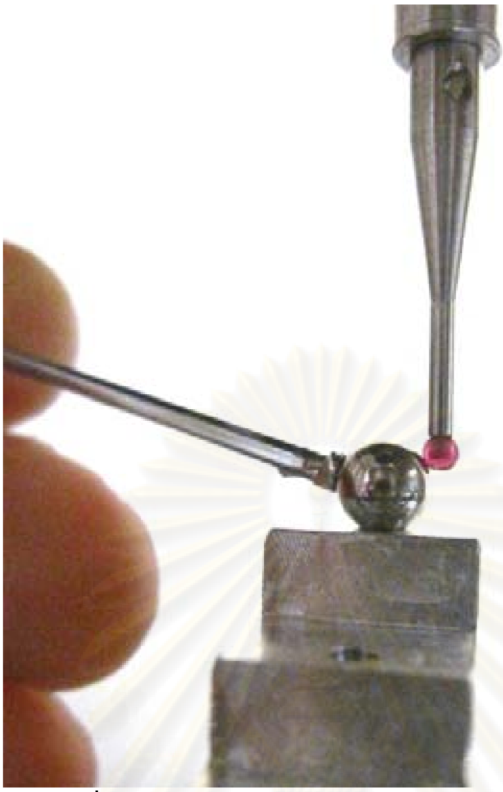
รูปที่ 6.13 แบบจำลองอุปกรณ์สอบเทียบในคอมพิวเตอร์

รูปที่ 6.14 อุปกรณ์สอบเทียบจริง

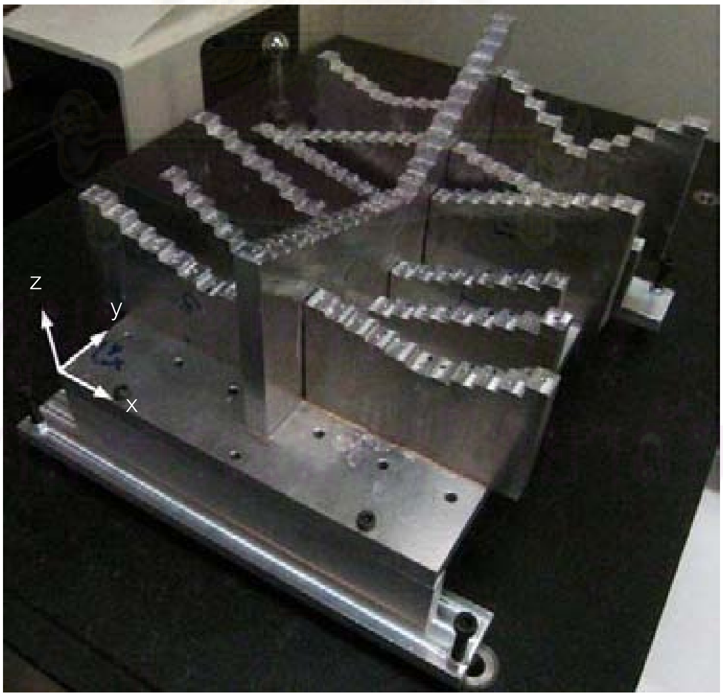
6.3 วิธีการหาตำแหน่งรูเจาะบนอุปกรณ์สอบเทียบ

นำเอาทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรซึ่งติดอยู่บนก้านเหล็กดังรูป 6.15 วางไปบนรูที่เจาะไว้ จากนั้นใช้เครื่องซีเอ็มเอ็มวัดดังรูปที่ 6.16 เพื่อหาพิกัดของทรงกลมเมื่อเทียบกับจุดออริจินของอุปกรณ์สอบเทียบซึ่งอยู่ที่มุมซ้ายดังรูปที่ 6.17 ทำกับทุกๆรูที่เจาะไว้ก็จะได้พิกัดของอุปกรณ์สอบเทียบเทียบกับตัวของมันเอง

รูปที่ 6.15 ก้านเหล็กติดทรงกลมขนาด 5 มิลลิเมตร



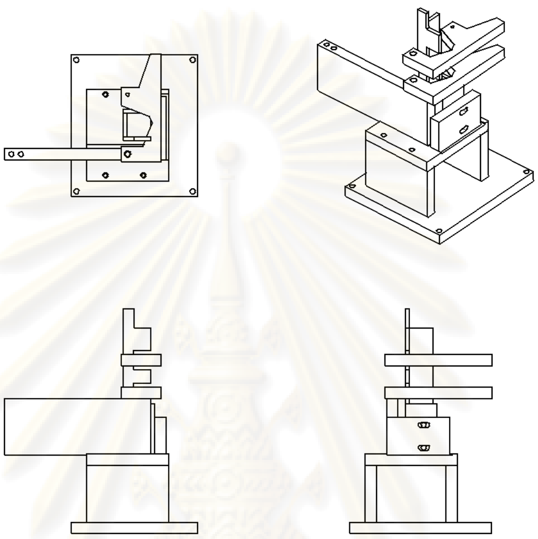
รูปที่ 6.16 หัว probe ซีเอ็มเอ็มวัดค่าพิกัดของทรงกลม



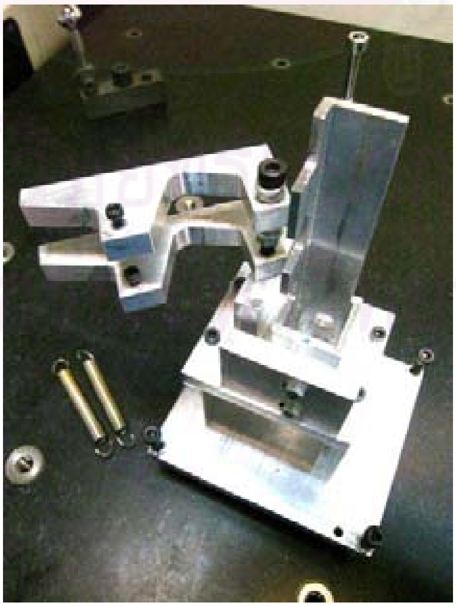
รูปที่ 6.17 จุดออริจินของอุปกรณ์สอบเทียบ

6.4 กลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้น

เนื่องจากแฮบติคที่ทำการสอบเทียบ ใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แบบสัมพัทธ์ การเปิดปิดเครื่องเพื่อใช้งานแต่ละครั้งจะทำให้อุปกรณ์ตรวจรู้อ่านค่าที่ไม่ถูกต้อง ทำให้ต้องมีการจัดทำตำแหน่งโฮมเพื่อให้การอ่านค่าจากอุปกรณ์ตรวจรู้เป็นไปอย่างถูกต้อง ตำแหน่งโฮมคือตำแหน่งที่แฮบติคต้องเริ่มต้นการทำงาน ณ ตำแหน่งนั้นทุกครั้ง ด้วยลักษณะกลไกจึงออกแบบให้ตำแหน่งโฮมของแฮบติคมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 6.18 และสร้างออกมาได้ตามรูปที่ 6.19

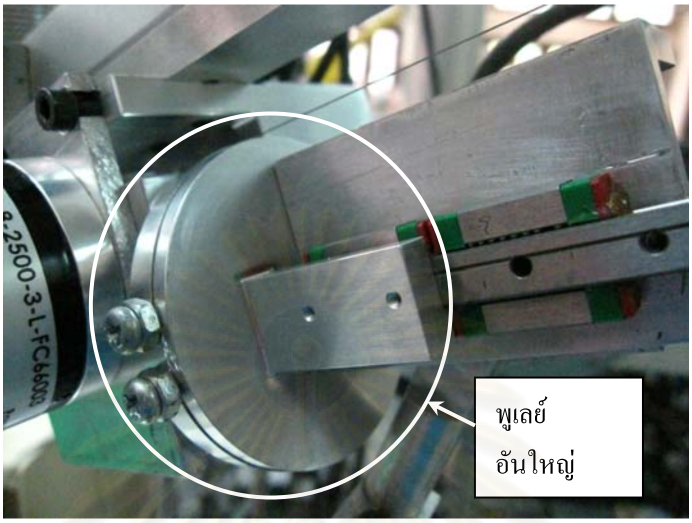


รูปที่ 6.18 แบบจำลองกลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นในคอมพิวเตอร์



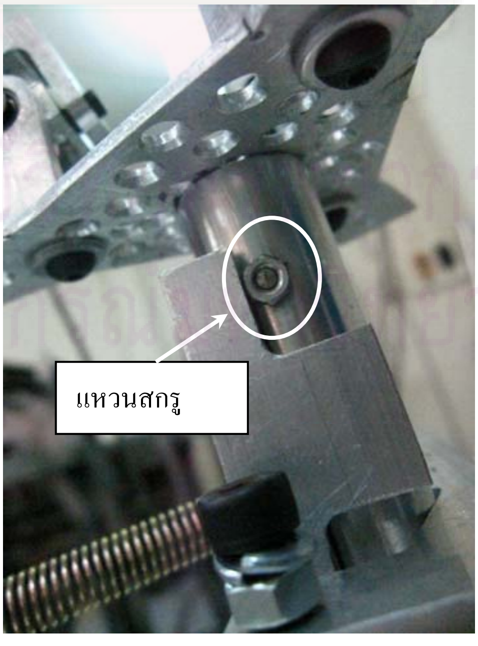
รูปที่ 6.19 กลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นจริง

การเคลื่อนที่ในแนวของลิเนียร์สไลด์จะถูกหยุดไว้ด้วยชิ้นส่วนของกลไกเอง คือ พูเลย์อันใหญ่ทำหน้าที่เหมือนฮาร์ดสต๊อป(Hard stop) ไปในตัว ทำให้ปลายแขนแฮบติคไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวดิ่งได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 6.20

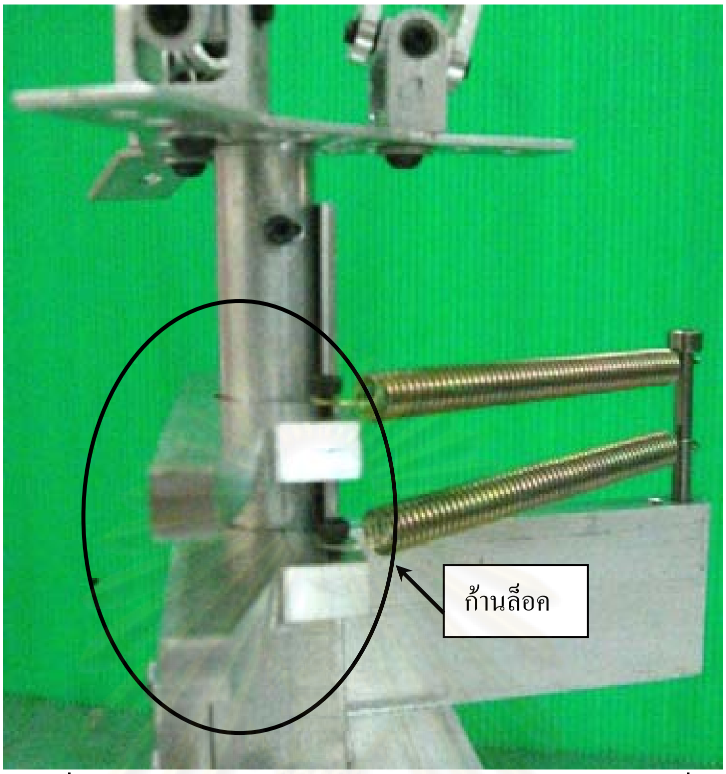


รูปที่ 6.20 พูเลย์ทำหน้าที่เป็นสต๊อบเปอร์

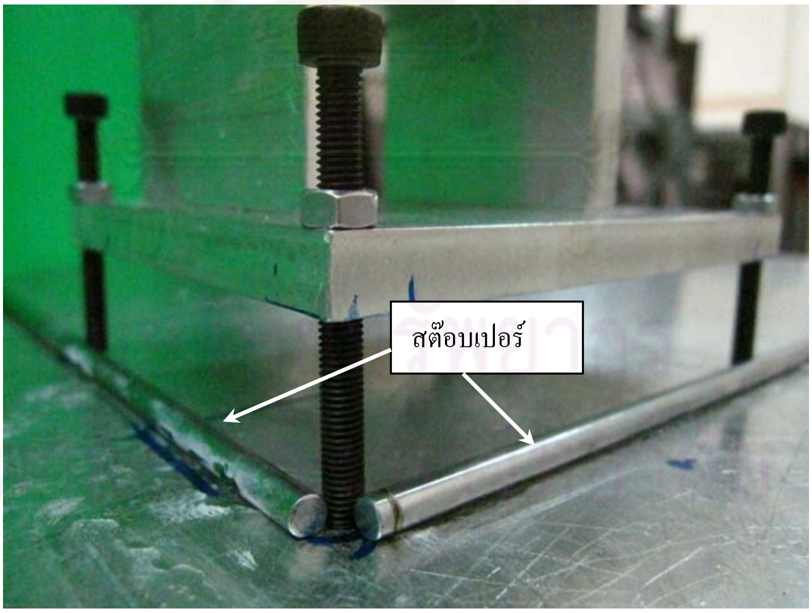
แหวนสกรู (nut) ตามรูปที่ 6.21 ทำหน้าที่เหมือนสต๊อบเปอร์ เมื่อรวมกับก้านล๊อค(Locking arm) อีก 2 ก้านที่ถูกดึงด้วยสปริง ดังที่แสดงในรูป 6.22 จะทำให้ปลายแขนของแฮบติคไม่สามารถหมุนรอบแกนดิ่งได้



รูปที่ 6.21 แหวนสกรูทำหน้าที่เป็นสต๊อบเปอร์



รูปที่ 6.22 สปริงดึงก้านล๊อคยึดให้ปลายแขนแฮบติคหยุดนิ่ง



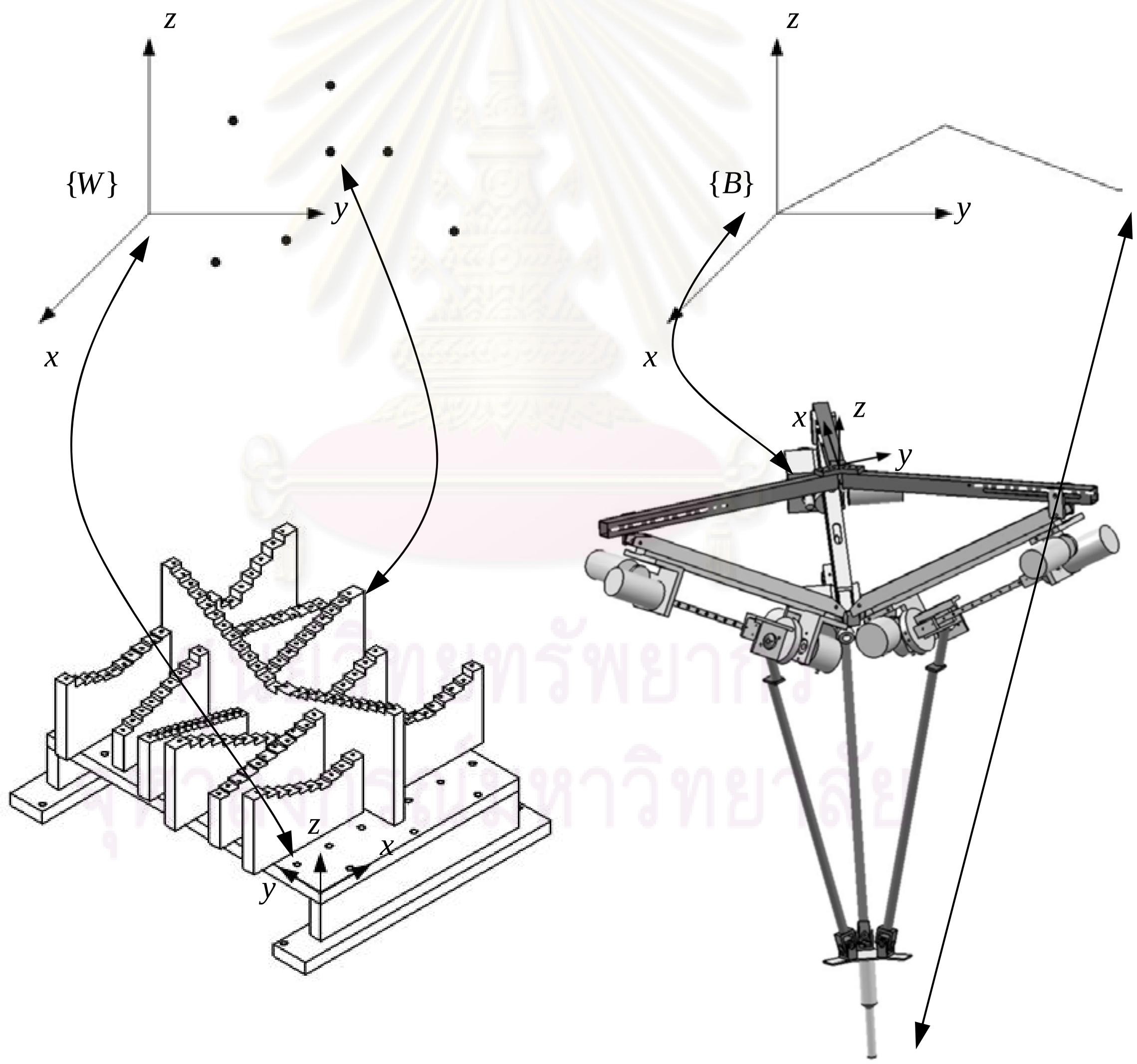
รูปที่ 6.23 สต๊อบเปอร์ที่ฐาน

ฮาร์ดสต๊อปตามรูปที่ 6.23 ทำให้อุปกรณ์ทั้งชุดวางตัวอยู่ในตำแหน่งเดิมทุกครั้งที่โฮมมิ่งแฮบติค และปลายแขนแฮบติคไม่สามารถเคลื่อนที่ในแนวระดับ

บทที่ 7
วิธีการทดลองและผลการทดลอง

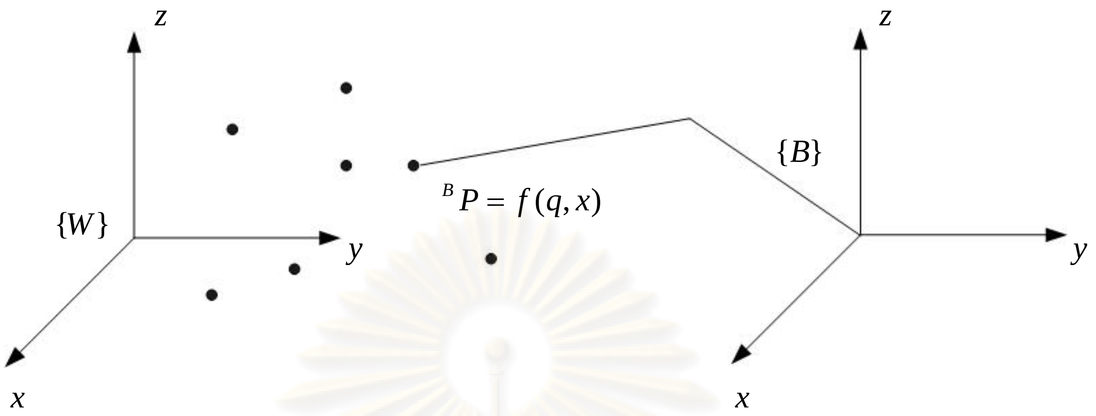
7.1 วิธีการทดลอง

ดังที่กล่าวไว้ในบทก่อนๆ เนื่องจากกลไกของแฮบติค ทำให้ไม่สามารถใช้เครื่องซีเอ็มเอ็มที่ทางแล็บมีใช้วัดหาตำแหน่งจุดปลายแขนแฮบติคได้โดยตรง จึงต้องอาศัยอุปกรณ์สอบเทียบที่ออกแบบขึ้น ซึ่งการใช้อุปกรณ์สอบเทียบดังกล่าวขออธิบายดังต่อไปนี้ พิจารณาจากรูปที่ 7.1 ให้ {W} แทน Coordinate Frame ของอุปกรณ์สอบเทียบ และ {B} แทน Coordinate Frame ของแฮบติคซึ่งติดอยู่ที่ฐาน จุดที่อยู่บริเวณ {W} ของรูปแทนพิกัดของหลุมที่เจาะไว้บนอุปกรณ์สอบเทียบ



รูปที่ 7.1 ความหมายของเฟรม W และ เฟรม B

แตะปลายแขนแฮบติคลงบนอุปกรณ์สอบเทียบ ณ ตำแหน่งที่เจาะรูไว้ จากรูปที่ 7.2 ให้เป็นจุด P ซึ่งเราสามารถหาตำแหน่งของปลายแขนแฮบติคเทียบกับ {B} ได้จากเมทริกซ์การแปลงหรือจากสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์



รูปที่ 7.2 ภาพจำลองปลายแขนแฮบติคแตะลงบนอุปกรณ์สอบเทียบ

เราสามารถหาตำแหน่งของจุด P เทียบกับ {W} ได้โดยใช้เมทริกซ์การแปลง $^{W}_{B}T$

$$^{W}P = {}^{W}_{B}T\,{}^{B}P$$

ซึ่งในที่นี้ เราไม่ทราบค่าของเมทริกซ์การแปลนี้ แต่เรารู้แน่ชัดว่าเมทริกซ์ดังกล่าวอยู่ในรูป

$$^{W}_{B}T = \begin{bmatrix} & {}^{W}_{B}R & & {}^{W}P_{orgB} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ด้วยการใช้การบรรยายทิศทางการหมุนแบบ x-y-z fixed angle เราสามารถสร้างเมทริกซ์การหมุน $^{W}_{B}R$ เพื่อใช้กำหนดทิศการหมุนของ {B} เทียบ {W} (ซึ่งทำให้เกิดพารามิเตอร์ 3 ตัว)

$$^{W}_{B}R = {}^{W}_{B}R_{xyz}(\gamma,\beta,\alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

และกำหนดพารามิเตอร์อีก 3 ตัวเพื่อใช้เป็นเวคเตอร์บอกตำแหน่งของ {B} เทียบกับ {W}

$$^{W}P_{orgB} = \begin{bmatrix} BWx & BWy & BWz \end{bmatrix}$$

เมื่อรวมกับพารามิเตอร์ของแฮบติคแล้วจะได้ จุด P ซึ่งอยู่ในรูปของระบบสมการที่เรียกว่าโอเวอร์ดีเทอร์มีนแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมี 3 สมการ แต่มีพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าทั้งหมด 45+6=51 ตัว เราสามารถสร้างชุดข้อมูลด้วยการเลื่อนปลายแขนแฮบติคไปแตะ ณ ตำแหน่งที่รูเจาะ

ตำแหน่งอื่น หรือจะใช้ตำแหน่งรูเจาะเดิมแต่เปลี่ยนทิศทางของปลายแขน ให้มีจำนวนข้อมูลที่มากกว่าหรือเท่ากับจำนวนพารามิเตอร์ที่เราต้องการหาค่า ในขณะเดียวกันเราก็ทราบค่าพิกัดจุด P เทียบกับตัวอุปกรณ์สอบเทียบเอง (หรือก็คือ ${}^{W}P$) จากการใช้เครื่องซีเอ็มเอ็มวัดดังที่กล่าวไว้ในบทที่ผ่านๆมา ตำแหน่งรูเจาะบนอุปกรณ์สอบเทียบที่วัดได้จากเครื่องซีเอ็มเอ็มนั้นเป็นตำแหน่งของจุดศูนย์กลางทรงกลมที่มีขนาด 5 มิลลิเมตรนั่นคือ เราจะได้ชุดโคออร์ดิเนทซึ่งลอยอยู่เหนือรูเจาะนั่นเอง ในขณะที่ปลายแขนของแฮบติคเองนั้นก็ติดทรงกลมขนาด 5 มิลลิเมตรไว้เช่นเดียวกัน

ถึงขั้นนี้เรามีชุดข้อมูลที่ได้มาจากการคำนวณผ่านสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์และชุดข้อมูลที่ได้จากการนำอุปกรณ์สอบเทียบไปวัดหาพิกัดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม ซึ่งชุดข้อมูลหรือโคออร์ดิเนทที่ได้จากการคำนวณผ่านสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ควรจะมีค่าเท่ากันกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็ม แต่เนื่องจากความไม่ถูกต้องของพารามิเตอร์ จะทำให้ค่าพิกัดของรูเจาะที่ได้จากทั้งสองทางไม่เท่ากัน นั่นก็คือตอนนี้เรากำลังแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าโดยการให้ s ตามสมการที่ มีค่าน้อยที่สุด

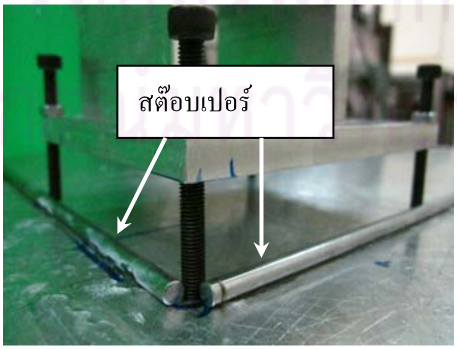
$$s = \sum_{1}^{n} r_i^2$$

โดยที่

$$r_i = \hat{y} - f\left(q_i, x\right)$$

เมื่อ $\hat{y}$ คือเวคเตอร์บอกตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งรายละเอียดทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แก้ปัญหาลักษณะนี้ได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 5 สรุปหลักใหญ่ๆในการใช้อุปกรณ์สอบเทียบเพื่อใช้สอบเทียบแฮบติคมีขั้นตอนดังนี้

วางกลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นให้ชนสต๊อบเปอร์ดังรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 กลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นชนสต๊อบเปอร์

ล็อคปลายแขนแฮบติคดังรูปที่ 7.4

รูปที่ 7.4 กลไกสำหรับตำแหน่งเริ่มต้นล็อคปลายแขนแฮบติค

เปิดโปรแกรมที่เขียนขึ้นเองซึ่งใช้สำหรับอ่านค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของแฮบติค

วางอุปกรณ์สอบเทียบให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมซึ่งปลายแขนแฮบติคสามารถเข้าถึงได้สะดวก

ขยับปลายแขนแฮบติคซึ่งมีทรงกลมขนาด 5 มิลลิเมตรติดอยู่ด้วยมือไปแตะลงบนรูเจาะที่อยู่บนอุปกรณ์สอบเทียบและเก็บค่าจากเอ็นโค้ดเดอร์ที่ข้อต่อต่าง ๆของแฮบติคด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นเอง

ทำซ้ำข้อ 5 จนกว่าจะเก็บค่าได้ครบตามที่ต้องการ

นำค่าที่อ่านได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ไปแทนในสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ได้เป็นโคออร์ดิเนทของจุดศูนย์กลางทรงกลมที่อยู่เหนือรูเจาะซึ่งเป็นโคออร์ดิเนทที่เทียบกับฐานของแฮบติคซึ่งก็คือ $f(q_i, x)$

นำ $f(q_i, x)$ ที่ได้ลบกับ $\hat{y}$ ซึ่งคือโคออร์ดิเนทของทรงกลมที่อยู่รูเจาะซึ่งได้มาจากการใช้เครื่องซีเอ็มเอ็มวัด

ใช้การถดถอยดังที่กล่าวมาข้างต้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ $s = \sum_1^n r_i^2$ มีค่าน้อยที่

7.1.1 หาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

แบ่งเป็น 42 51 57 พารามิเตอร์ โดยตั้งค่า TolFun = 0.1 และ 0.001 ใช้จำนวนข้อมูลทั้งหมด 440 ข้อมูล (44 จุด จุดละ 10 ทิศทางการหมุน) ซึ่งขั้นตอนในการเก็บข้อมูลเป็นไปตามวิธีการทั้ง 9 ข้อด้านบน โดยพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 7.2 และ 7.3 (หน้าที่ 62-64) ส่วนเศษตกค้างจากการทำถดถอยได้ตามรูปที่ 7.5-7.7 (หน้าที่ 52-54) ซึ่งเศษตกค้างรวมจากการทำการถดถอยแสดงดังตารางที่ 7.1

ตาราง 7.1 ค่าเศษตกค้างรวมจากการทำการถดถอยเพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

	TolFun = 0.1	TolFun = 0.001
42 พารามิเตอร์	2389.259	2030.000
51 พารามิเตอร์	1800.622	1544.498
57 พารามิเตอร์	1788.779	1558.223

จากตารางที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าเศษตกค้างรวมของ 51 และ 57 พารามิเตอร์มีค่าใกล้เคียงกัน อีกทั้งเมื่อดูจากกราฟที่ 7.5 (หน้าที่ 52) ซึ่งแสดงค่าเศษตกค้างจากการทำการถดถอย จะพบว่าทั้ง 2 แบบคือ 51 และ 57 พารามิเตอร์มีค่าเศษตกค้างที่ใกล้เคียงกัน และเนื่องจากการแก้ปัญหาหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นจำนวนพารามิเตอร์มีผลกับการลู่เข้าค่อนข้างมาก กล่าวคือยิ่งจำนวนพารามิเตอร์มากเท่าไหร่ก็ยิ่งลู่เข้าช้าหรือหาค่าที่เหมาะสมได้ยากขึ้น จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว เนื่องจากให้ผลรวมของเศษตกค้างที่ไม่ต่างจาก 57 ตัวและกราฟของเศษตกค้างก็มีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่มีจำนวนพารามิเตอร์ที่น้อยกว่า จากนั้นจึงได้ปรับค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นใหม่และใช้ชุดข้อมูลใหม่ 400 ข้อมูล (40 จุด จุดละ 10 ทิศทางการหมุน) ได้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 7.4 และ 7.5 (หน้าที่ 66-68) โดยเศษตกค้างจากการทำถดถอยได้ตามรูปที่ 7.8 (หน้าที่ 55)

7.1.2 ทดสอบความแม่นยำ

เป็นการทดลองซึ่งต่อเนื่องมาจากหัวข้อที่ 7.1.1 กล่าวคือหลังจากได้พารามิเตอร์ 51 ตัวตามตารางที่ 7.4 และ 7.5 แล้วก็ทำการทดสอบความแม่นยำของแฮบติคต่อทันทีไม่มีการปิดเครื่องหรือโปรแกรที่ใช้อ่านค่าเอ็นโค้ดเดอร์และไม่มีการคลื่อนย้ายอุปกรณ์สอบเทียบ โดยการใช้แฮบติควัดหาพิกัดของรูเจาะ 16 รู ที่อยู่บนอุปกรณ์สอบเทียบโดยวัดซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง ใช้

พารามิเตอร์ตามตารางที่ 7.4 และ 7.5 (หน้าที่ 66-68) ได้ผลดังรูปที่ 7.9-7.11 (หน้าที่ 56-58)

7.1.3 ทดสอบการใช้วัดระยะห่าง

เช่นเดียวกันกับหัวข้อ 7.1.2 แต่เปลี่ยนมาทดสอบการใช้วัดระยะห่างระหว่างรูเจาะ 10 ระยะ โดยใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 7.4 และ 7.5 (หน้าที่ 66-68) ได้ผลดังรูปที่ 7.12 (หน้าที่ 59)

และจากที่ได้เกริ่นไว้ในบทที่ 6 หลังจากทำการทดลองไปแล้วได้มีการปรับปรุงโครงสร้างฐานด้านบนของแฮบติคอีกครั้ง พารามิเตอร์ที่ได้ทำการหาไว้ย่อมเปลี่ยนแปลง จึงต้องมีการหาค่าพารามิเตอร์และทดสอบความแม่นยำของแฮบติคใหม่เพิ่มเติม

7.1.4 พารามิเตอร์หลังจากปรับปรุงฐานบน

ค่าเริ่มต้นและผลที่ได้แสดงในตารางที่ 7.6 และ 7.7 (หน้าที่ 70-72) โดยเศษตกค้างจากการทำถดถอยได้ตามรูปที่ 7.13 (หน้าที่ 60)

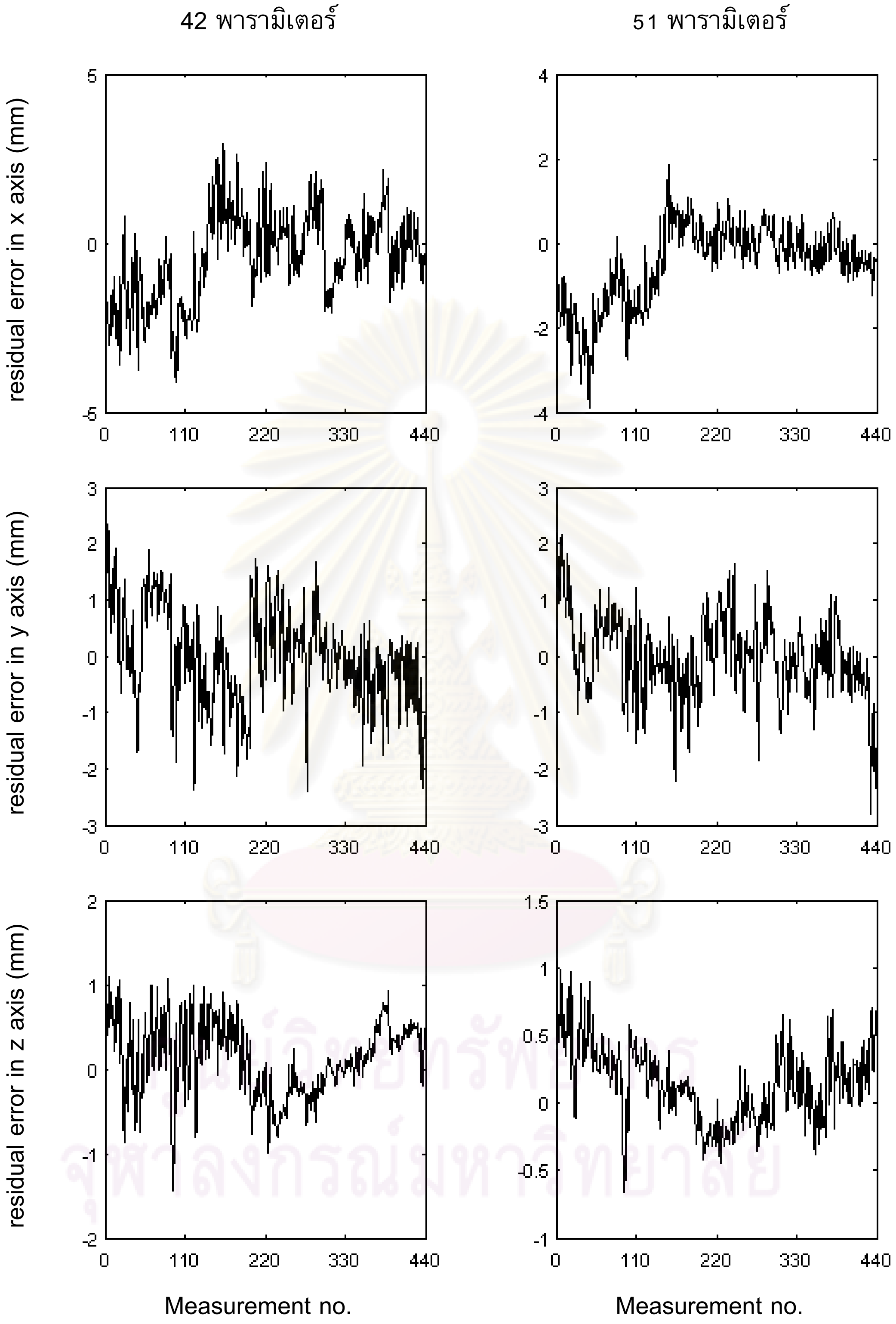
7.1.5 ทดสอบความแม่นยำ

โดยการทดสอบหาพิกัดของรูเจาะ 10 รู ใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 7.6 และ 7.7 (หน้าที่ 70-72) ได้ผลดังที่แสดในรูปที่ 7.14 (หน้าที่ 61)

ผลการทดสอบความแม่นยำทั้งก่อนและหลังปรับปรุงฐานบนถูกแปลความหมายโดยการใช้หลักทางสถิติดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 5 แสดงอยู่ในตารางที่ 7.8-7.10 (หน้าที่ 74)

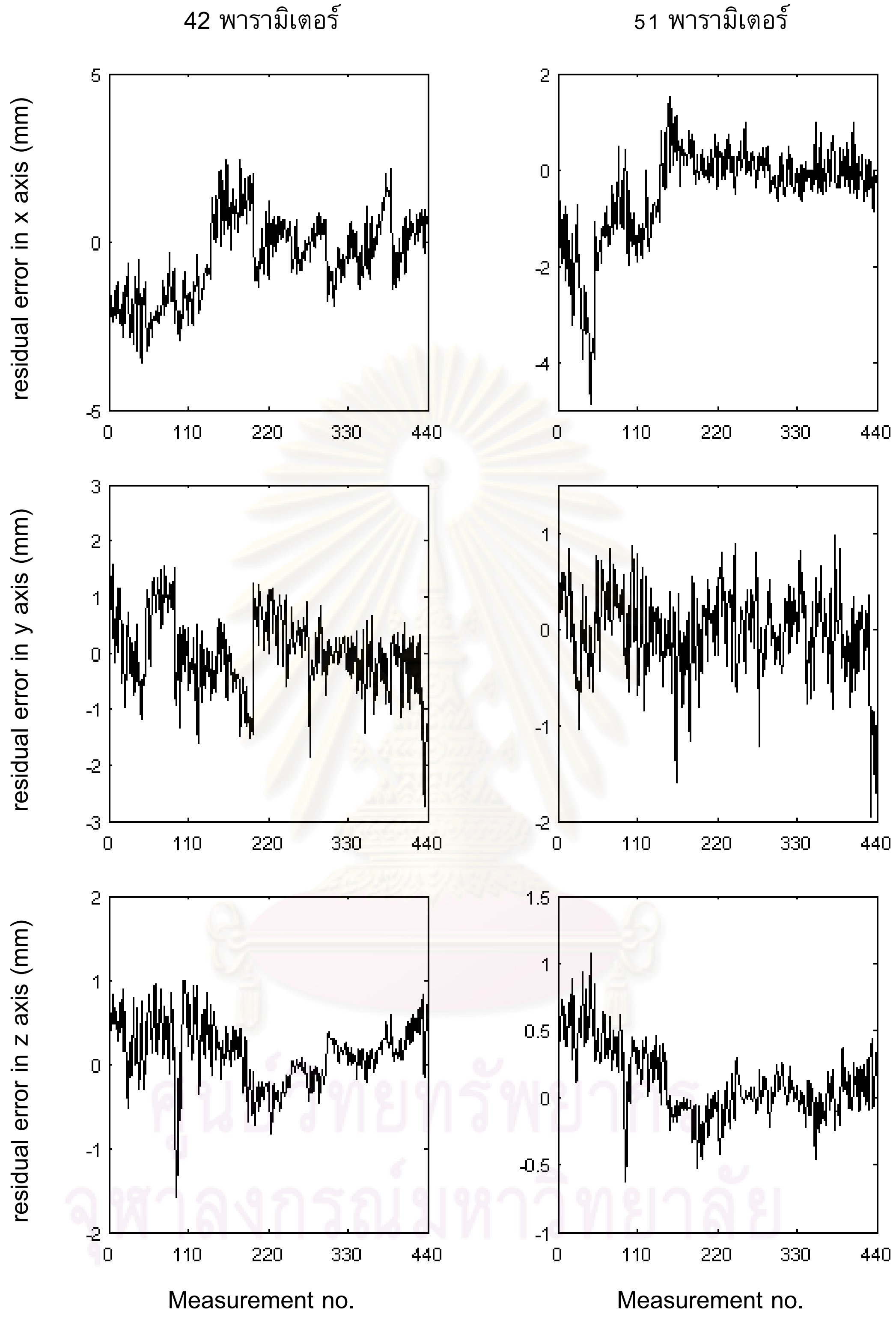
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

7.2 ผลการทดลอง



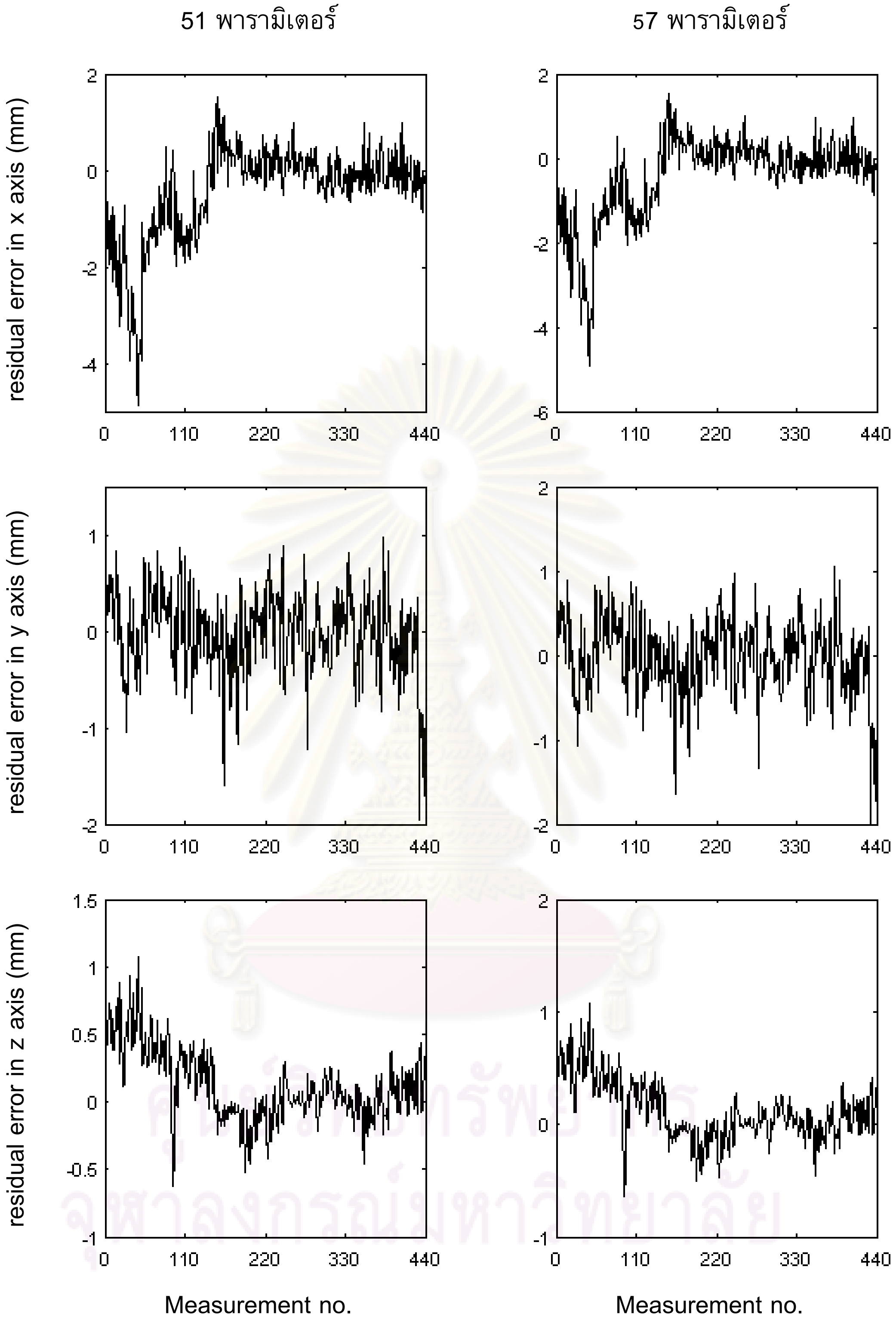
รูปที่ 7.5 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.1 ระหว่าง พารามิเตอร์ 42 และ 51 ตัว เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



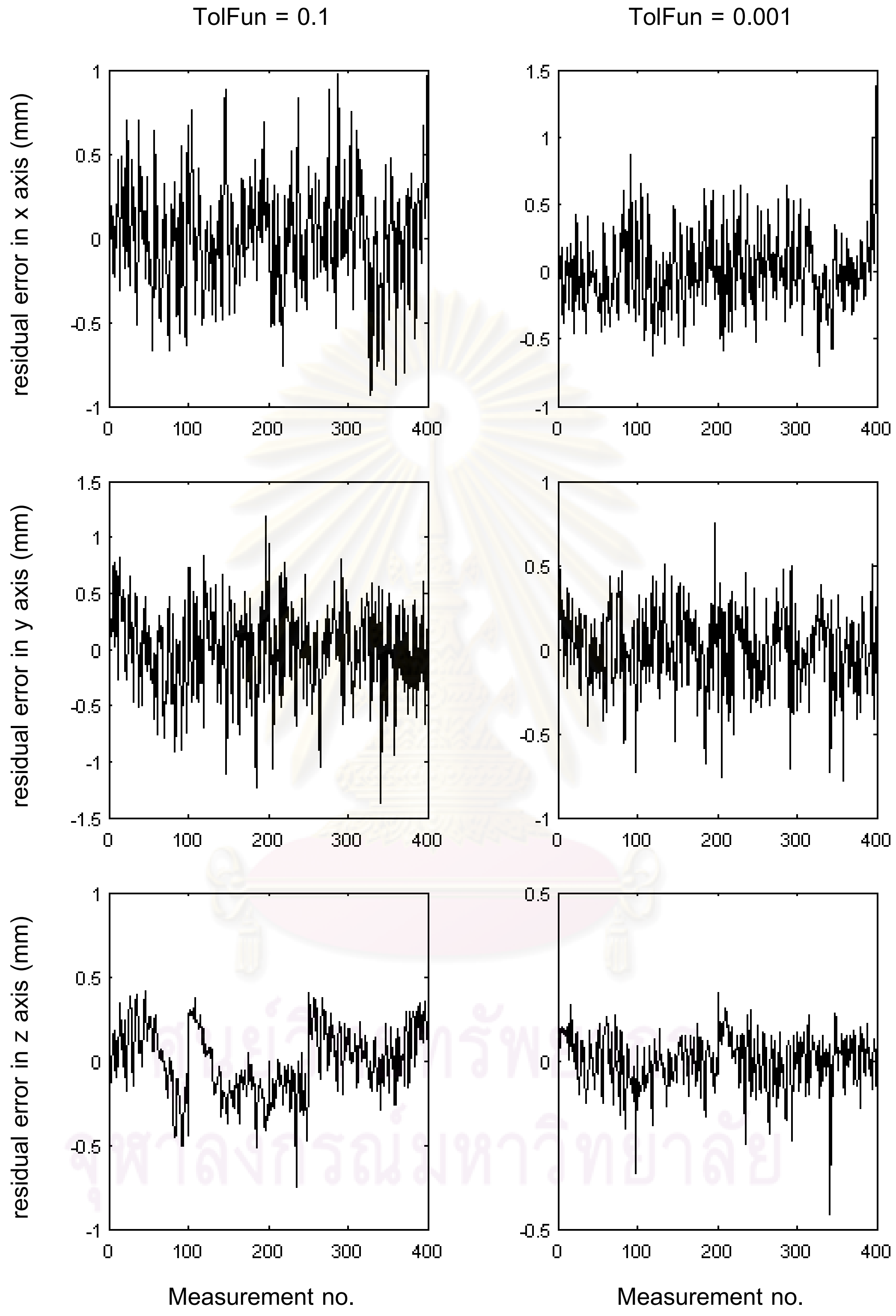
รูปที่ 7.6 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 ระหว่าง พารามิเตอร์ 42 และ 51 ตัว เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

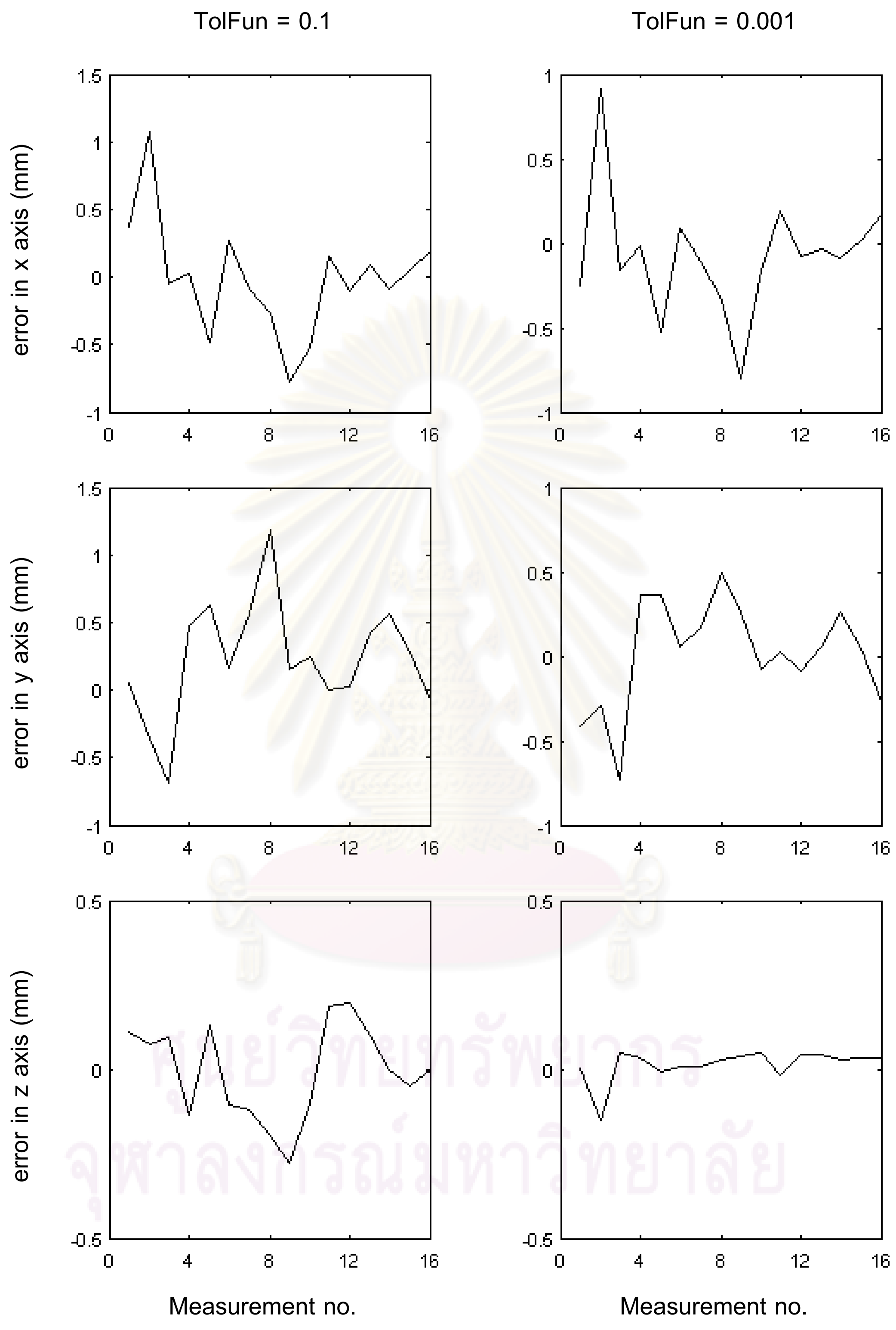


รูปที่ 7.7 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 ระหว่าง พารามิเตอร์ 51 และ 57 ตัว เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

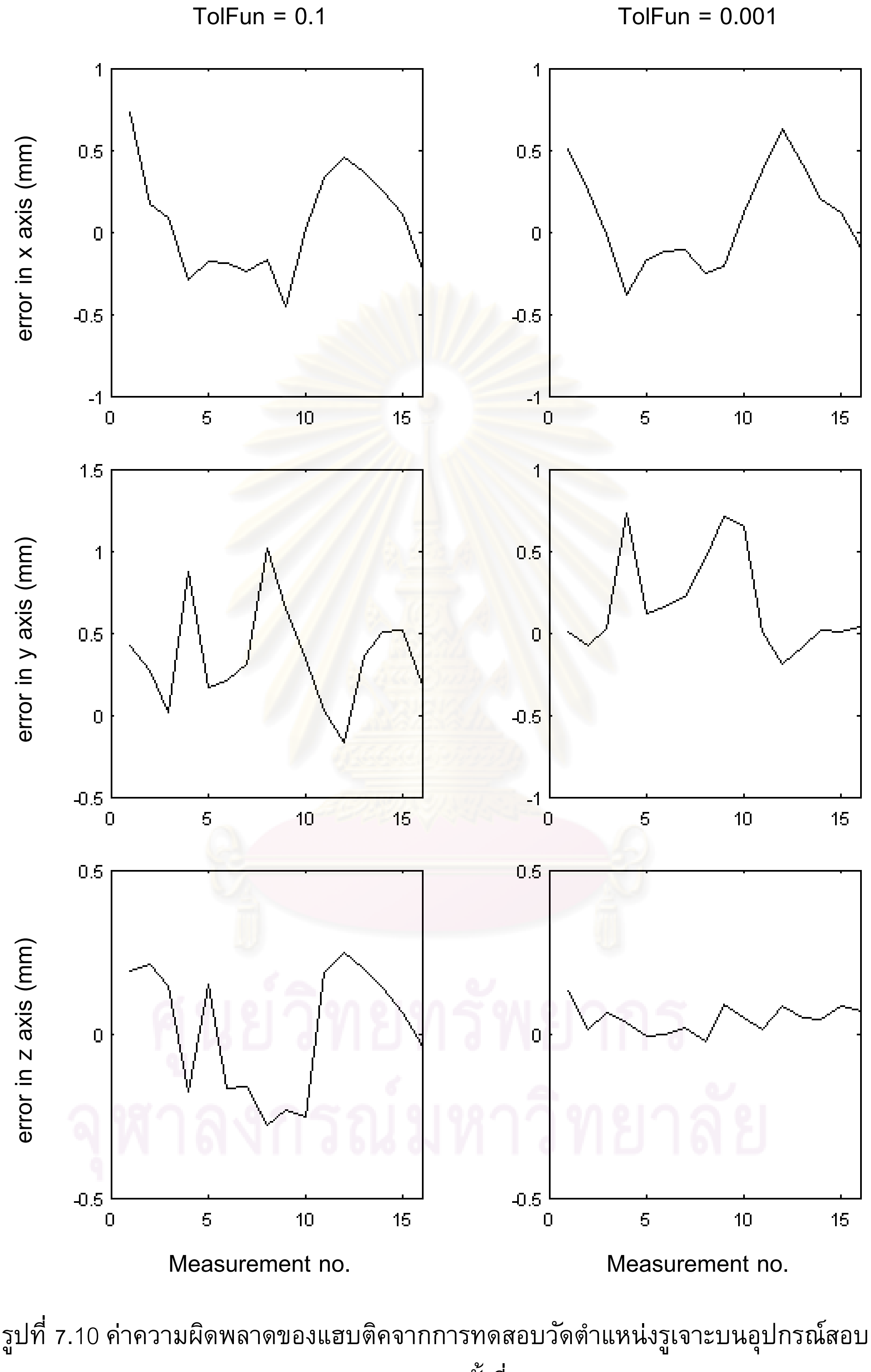


รูปที่ 7.8 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 และ TolFun = 0.1 สำหรับพารามิเตอร์ 51 ตัว

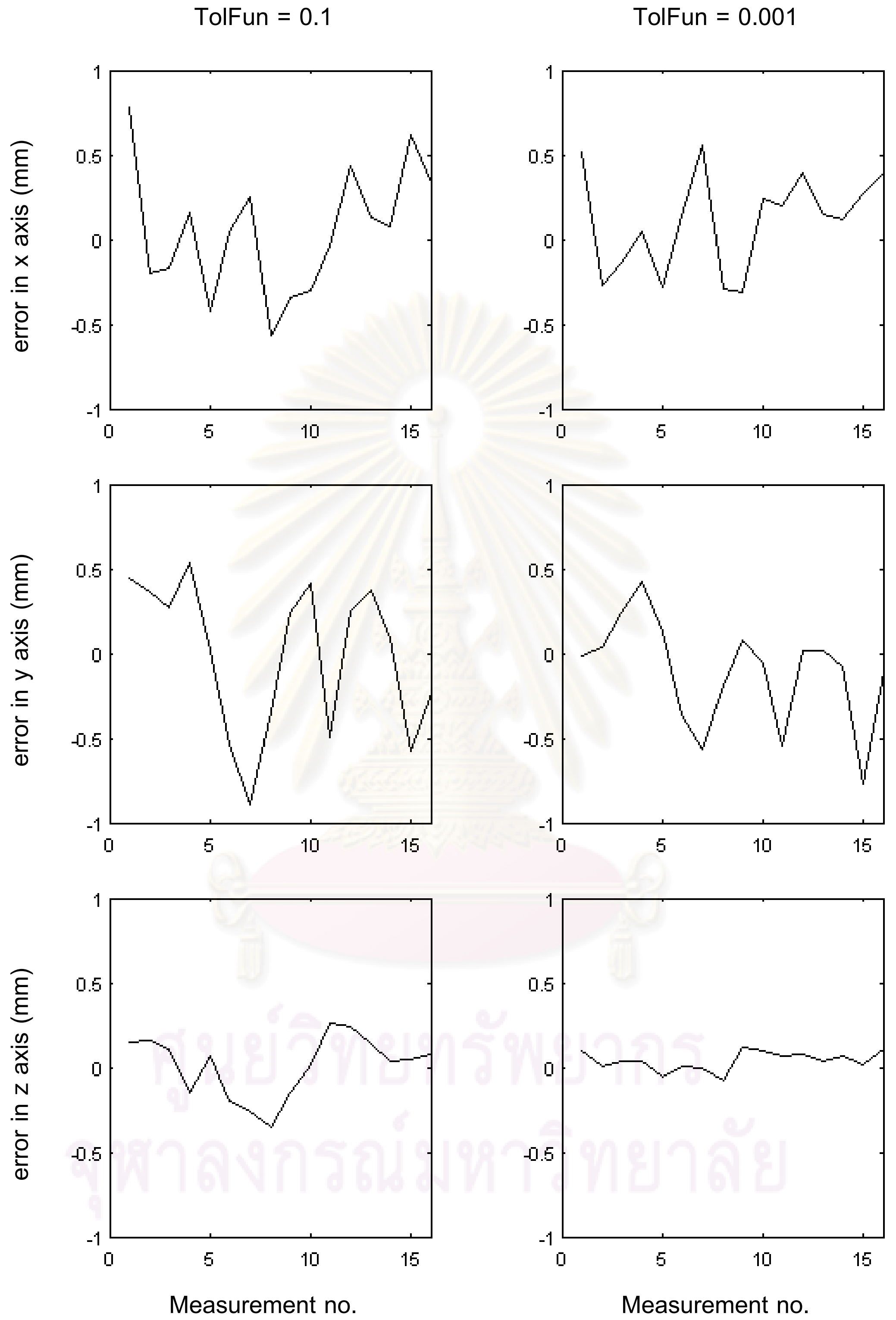


รูปที่ 7.9 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดตำแหน่งรูเจาะบนอุปกรณ์สอบเทียบ 16 รู ครั้งที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

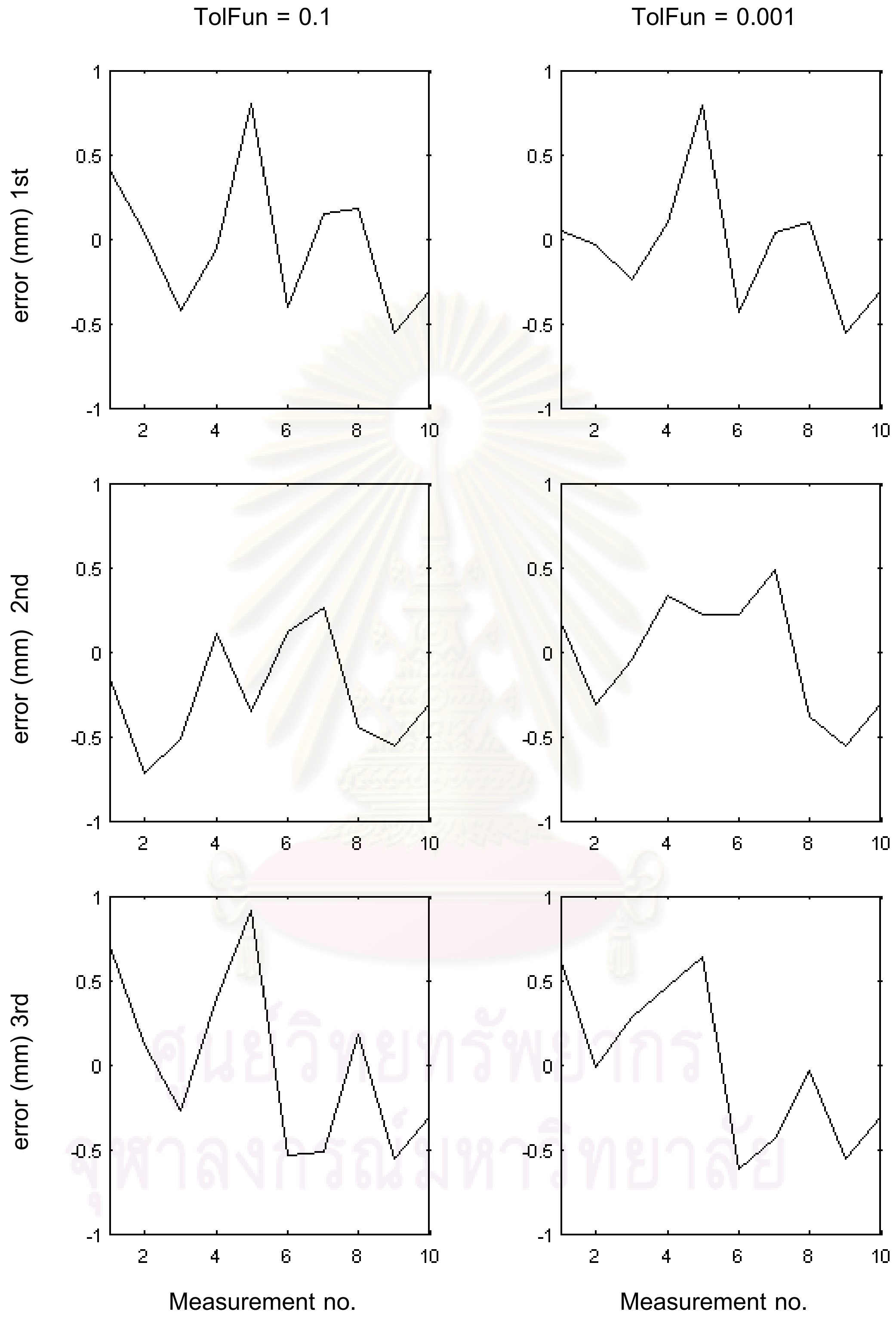


รูปที่ 7.10 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดตำแหน่งรูเจาะบนอุปกรณ์สอบเทียบ 16 รู ครั้งที่ 2



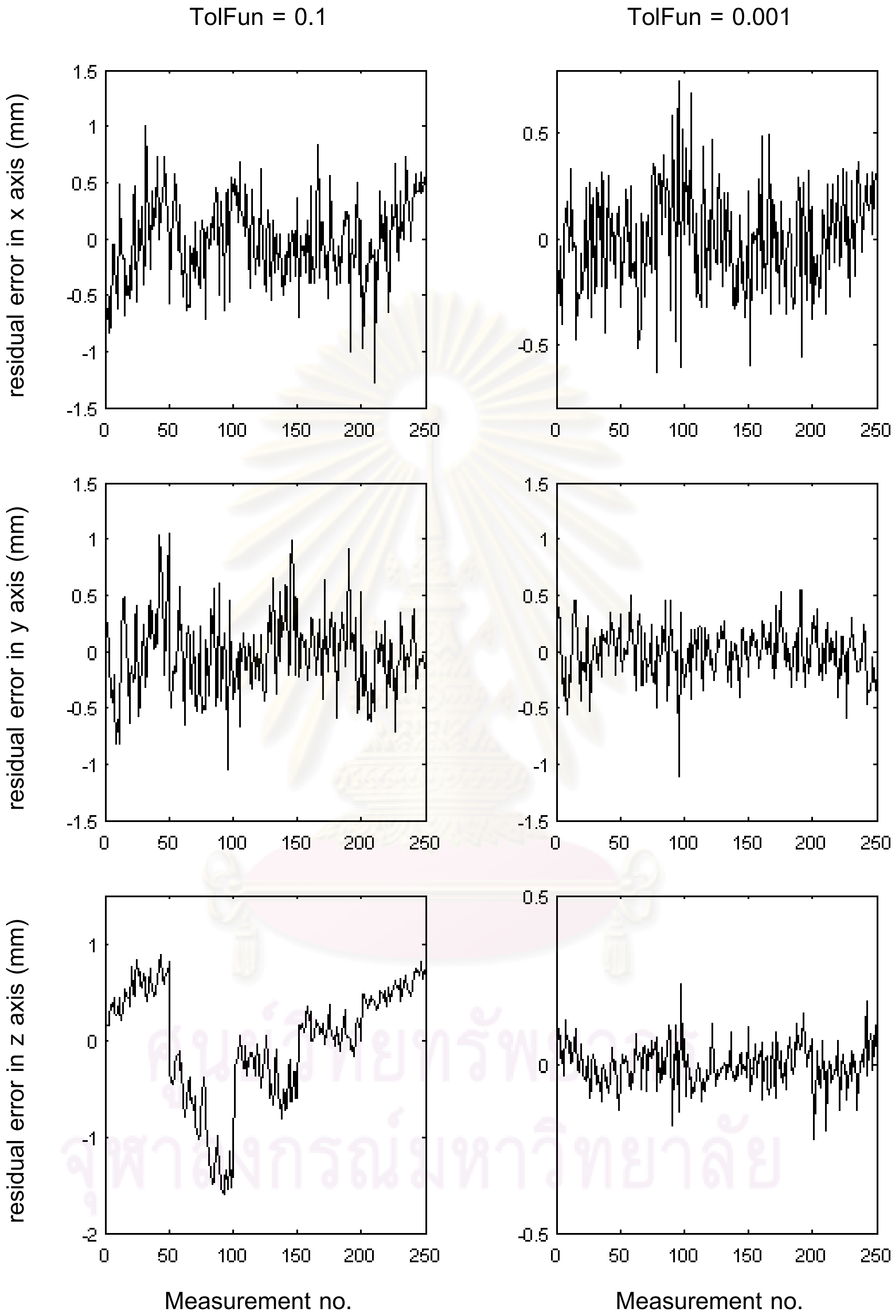
รูปที่ 7.11 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดตำแหน่งรูเจาะบนอุปกรณ์สอบเทียบ 16 รู ครั้งที่ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

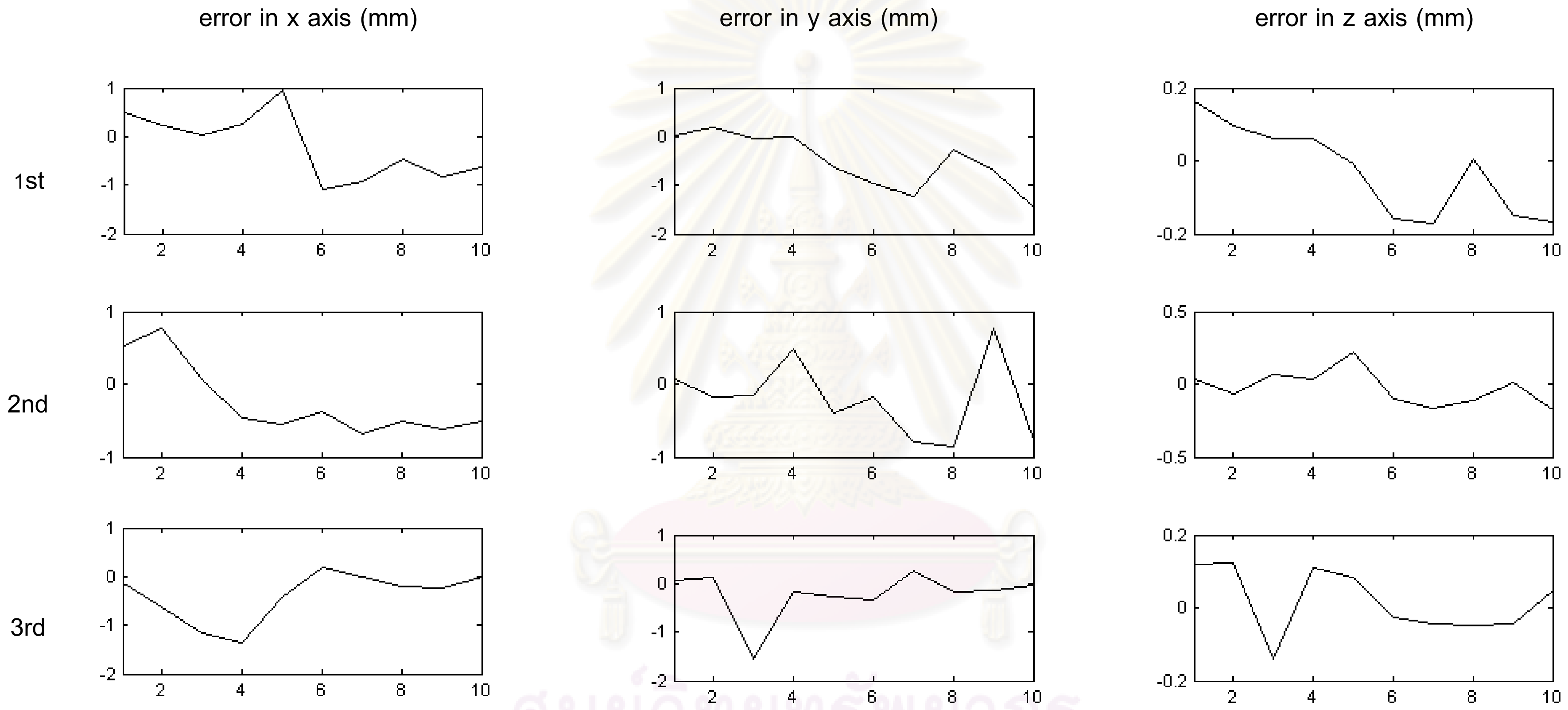


รูปที่ 7.12 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดระยะระหว่างรูเจาะ 10 รู ซึ่งทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.13 เศษตกค้างที่เหลือจากการใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 และ TolFun = 0.1 สำหรับพารามิเตอร์ 51 ตัว หลังจากปรับปรุงฐานบน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 7.14 ค่าความผิดพลาดของแฮบติคจากการทดสอบวัดตำแหน่งรูเจาะบนอุปกรณ์สอบเทียบ 10 รู ทั้งหมด 3 ครั้ง

61

ตาราง 7.2 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.1 เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น	42 พารามิเตอร์	51 พารามิเตอร์
$r_b^1(mm)$	468.364	472.202	475.744
$r_b^2(mm)$	468.364	480.387	467.613
$r_b^3(mm)$	468.364	472.943	472.317
$\theta_1^1(\deg)$	0		-0.219
$\theta_1^2(\deg)$	120		118.225
$\theta_1^3(\deg)$	240		240.620
$\theta_2^1(\deg)$	67	68.627	66.857
$\theta_2^2(\deg)$	67	63.707	66.591
$\theta_2^3(\deg)$	67	68.119	66.434
$\alpha_2^1(\deg)$	0	-0.909	0.759
$\alpha_2^2(\deg)$	0	-0.689	-0.744
$\alpha_2^3(\deg)$	0	1.507	-0.009
$d_0^1(mm)$	375.887	372.703	372.929
$d_0^2(mm)$	375.887	376.512	376.374
$d_0^3(mm)$	375.887	373.045	374.216
$\theta_{03}^1(\deg)$	0	8.114	0.481
$\theta_{03}^2(\deg)$	0	-0.485	1.129
$\theta_{03}^3(\deg)$	0	-2.398	1.152
$a_3^1(mm)$	0		
$a_3^2(mm)$	0		
$a_3^3(mm)$	0		
$b_3^1(mm)$	0		
$b_3^2(mm)$	0		
$b_3^3(mm)$	0		
$\theta_{04}^1(\deg)$	50	51.125	50.154
$\theta_{04}^2(\deg)$	50	51.765	52.574
$\theta_{04}^3(\deg)$	50	51.593	52.054

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$a_4^1(mm)$	0	5.600	0.311
$a_4^2(mm)$	0	-14.197	0.035
$a_4^3(mm)$	0	7.971	0.445
$b_4^1(mm)$	0	-4.020	0.111
$b_4^2(mm)$	0	1.194	-0.612
$b_4^3(mm)$	0	-0.796	-1.781
$\gamma_4^1(\text{deg})$	0	-0.237	1.018
$\gamma_4^2(\text{deg})$	0	1.304	-0.904
$\gamma_4^3(\text{deg})$	0	0.763	-1.849
$\beta_4^1(\text{deg})$	0	2.940	-0.114
$\beta_4^2(\text{deg})$	0	0.023	0.623
$\beta_4^3(\text{deg})$	0	0.797	1.808
$L^1(mm)$	384	389.519	383.159
$L^2(mm)$	384	375.069	384.233
$L^3(mm)$	384	386.470	383.532
T_1^1	14.6		14.300
T_1^2	14.7		14.812
T_1^3	14.84		14.811
T_2^1	0.103627		0.111
T_2^2	0.115717		0.103
T_2^3	0.106736		0.111
$\alpha_B(\text{deg})$	90	91.816	90.485
$\beta_B(\text{deg})$	0	-1.547	-1.494
$\gamma_B(\text{deg})$	180	181.800	179.389
$BW_x(mm)$	70	61.274	65.080
$BW_y(mm)$	105	119.709	111.240
$BW_z(mm)$	670	669.844	665.618
$tipx(mm)$	-25	-40.961	-56.219
$tipy(mm)$	16.5	44.764	33.316
$tipz(mm)$	145.8	152.082	144.972

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 7.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 เพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม

	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น	42 พารามิเตอร์	51 พารามิเตอร์	57 พารามิเตอร์
$r_b^1(mm)$	468.364	470.847	476.013	475.994
$r_b^2(mm)$	468.364	480.355	468.421	468.580
$r_b^3(mm)$	468.364	474.543	474.474	474.002
$\theta_1^1(\deg)$	0		-0.029	-0.031
$\theta_1^2(\deg)$	120		117.784	117.825
$\theta_1^3(\deg)$	240		240.315	240.334
$\theta_2^1(\deg)$	67	69.123	67.435	67.451
$\theta_2^2(\deg)$	67	63.077	67.742	67.654
$\theta_2^3(\deg)$	67	69.167	66.714	66.793
$\alpha_2^1(\deg)$	0	-0.833	0.407	0.389
$\alpha_2^2(\deg)$	0	-0.769	-0.225	-0.274
$\alpha_2^3(\deg)$	0	1.344	-0.252	-0.189
$d_0^1(mm)$	375.887	373.096	373.092	373.045
$d_0^2(mm)$	375.887	377.179	375.872	375.891
$d_0^3(mm)$	375.887	372.054	373.747	373.804
$\theta_{03}^1(\deg)$	0	6.392	0.111	0.800
$\theta_{03}^2(\deg)$	0	-0.768	0.826	-0.486
$\theta_{03}^3(\deg)$	0	-0.372	2.972	1.200
$a_3^1(mm)$	0			-0.139
$a_3^2(mm)$	0			-0.003
$a_3^3(mm)$	0			0.179
$b_3^1(mm)$	0			0.261
$b_3^2(mm)$	0			0.923
$b_3^3(mm)$	0			2.892
$\theta_{04}^1(\deg)$	50	52.038	51.432	51.366
$\theta_{04}^2(\deg)$	50	52.325	53.672	53.693
$\theta_{04}^3(\deg)$	50	52.216	51.765	51.799

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$a_4^1(mm)$	0	5.231	2.228	1.801
$a_4^2(mm)$	0	-25.427	2.762	2.558
$a_4^3(mm)$	0	7.931	-5.336	-4.570
$b_4^1(mm)$	0	-3.352	0.346	0.299
$b_4^2(mm)$	0	1.434	-1.506	-1.427
$b_4^3(mm)$	0	-1.594	-2.632	-2.601
$\gamma_4^1(\deg)$	0	0.679	1.386	1.476
$\gamma_4^2(\deg)$	0	1.036	0.190	0.162
$\gamma_4^3(\deg)$	0	1.386	-2.115	-2.030
$\beta_4^1(\deg)$	0	1.365	-0.316	-0.276
$\beta_4^2(\deg)$	0	0.018	0.631	0.725
$\beta_4^3(\deg)$	0	2.365	2.431	2.468
$L^1(mm)$	384	390.337	382.513	382.459
$L^2(mm)$	384	379.707	388.994	388.639
$L^3(mm)$	384	385.356	384.362	383.992
T_1^1	14.6		14.819	14.804
T_1^2	14.7		15.311	15.319
T_1^3	14.84		14.845	14.859
T_2^1	0.103627		0.110	0.110
T_2^2	0.115717		0.101	0.101
T_2^3	0.106736		0.114	0.113
$\alpha_B(\deg)$	90	92.116	90.658	90.698
$\beta_B(\deg)$	0	-1.797	-0.710	-0.770
$\gamma_B(\deg)$	180	182.521	179.495	179.575
$BW_x(mm)$	70	64.218	64.102	64.428
$BW_y(mm)$	105	119.159	110.829	110.915
$BW_z(mm)$	670	672.128	663.348	664.322
$tipx(mm)$	-25	-21.119	-32.473	-35.596
$tipy(mm)$	16.5	67.609	47.852	45.493
$tipz(mm)$	145.8	151.382	145.779	146.902

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 7.4 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.1 เมื่อใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว

	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น	51 พารามิเตอร์
$r_b^1(mm)$	468.364	477.081
$r_b^2(mm)$	468.364	467.261
$r_b^3(mm)$	468.364	472.394
$\theta_1^1(\deg)$	0	-0.310
$\theta_1^2(\deg)$	120	117.831
$\theta_1^3(\deg)$	240	241.967
$\theta_2^1(\deg)$	67	66.864
$\theta_2^2(\deg)$	67	66.365
$\theta_2^3(\deg)$	67	66.275
$\alpha_2^1(\deg)$	0	0.574
$\alpha_2^2(\deg)$	0	-0.295
$\alpha_2^3(\deg)$	0	-0.484
$d_0^1(mm)$	375.887	373.046
$d_0^2(mm)$	375.887	376.588
$d_0^3(mm)$	375.887	374.376
$\theta_{03}^1(\deg)$	0	-0.053
$\theta_{03}^2(\deg)$	0	0.217
$\theta_{03}^3(\deg)$	0	-0.216
$\theta_{04}^1(\deg)$	50	50.707
$\theta_{04}^2(\deg)$	50	51.989
$\theta_{04}^3(\deg)$	50	51.551
$a_4^1(mm)$	0	0.067
$a_4^2(mm)$	0	0.122
$a_4^3(mm)$	0	1.002
$b_4^1(mm)$	0	0.297
$b_4^2(mm)$	0	0.026
$b_4^3(mm)$	0	-0.815

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\gamma_4^1(\deg)$	0	0.644
$\gamma_4^2(\deg)$	0	0.416
$\gamma_4^3(\deg)$	0	-0.243
$\beta_4^1(\deg)$	0	-0.298
$\beta_4^2(\deg)$	0	-0.015
$\beta_4^3(\deg)$	0	0.806
$L^1(mm)$	384	383.279
$L^2(mm)$	384	384.152
$L^3(mm)$	384	383.758
T_1^1	14.6	14.416
T_1^2	14.7	14.725
T_1^3	14.84	14.800
T_2^1	0.103627	0.111
T_2^2	0.115717	0.103
T_2^3	0.106736	0.112
$\alpha_B(\deg)$	90	90.302
$\beta_B(\deg)$	0	-1.249
$\gamma_B(\deg)$	180	179.100
$BW_x(mm)$	70	65.433
$BW_y(mm)$	105	109.182
$BW_z(mm)$	670	665.823
$tipx(mm)$	-25	-56.049
$tipy(mm)$	16.5	32.509
$tipz(mm)$	145.8	144.395

ตาราง 7.5 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 เมื่อใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว

	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น	51 พารามิเตอร์
$r_b^1(mm)$	468.364	479.830
$r_b^2(mm)$	468.364	467.408
$r_b^3(mm)$	468.364	473.385
$\theta_1^1(\deg)$	0	0.041
$\theta_1^2(\deg)$	120	117.702
$\theta_1^3(\deg)$	240	242.092
$\theta_2^1(\deg)$	67	67.249
$\theta_2^2(\deg)$	67	66.814
$\theta_2^3(\deg)$	67	66.718
$\alpha_2^1(\deg)$	0	0.577
$\alpha_2^2(\deg)$	0	0.175
$\alpha_2^3(\deg)$	0	-0.694
$d_0^1(mm)$	375.887	372.464
$d_0^2(mm)$	375.887	376.433
$d_0^3(mm)$	375.887	373.874
$\theta_{03}^1(\deg)$	0	0.301
$\theta_{03}^2(\deg)$	0	0.114
$\theta_{03}^3(\deg)$	0	0.910
$\theta_{04}^1(\deg)$	50	51.594
$\theta_{04}^2(\deg)$	50	52.144
$\theta_{04}^3(\deg)$	50	51.264
$a_4^1(mm)$	0	1.844
$a_4^2(mm)$	0	3.291
$a_4^3(mm)$	0	2.454
$b_4^1(mm)$	0	0.273
$b_4^2(mm)$	0	-0.238
$b_4^3(mm)$	0	-1.102

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\gamma_4^1(\deg)$	0	-0.227
$\gamma_4^2(\deg)$	0	-1.068
$\gamma_4^3(\deg)$	0	-0.543
$\beta_4^1(\deg)$	0	-0.223
$\beta_4^2(\deg)$	0	0.259
$\beta_4^3(\deg)$	0	1.006
$L^1(mm)$	384	386.253
$L^2(mm)$	384	383.676
$L^3(mm)$	384	384.647
T_1^1	14.6	15.015
T_1^2	14.7	14.905
T_1^3	14.84	14.960
T_2^1	0.103627	0.109
T_2^2	0.115717	0.103
T_2^3	0.106736	0.112
$\alpha_B(\deg)$	90	90.010
$\beta_B(\deg)$	0	-0.319
$\gamma_B(\deg)$	180	179.216
$BW_x(mm)$	70	64.788
$BW_y(mm)$	105	110.549
$BW_z(mm)$	670	666.929
$tipx(mm)$	-25	-38.661
$tipy(mm)$	16.5	28.020
$tipz(mm)$	145.8	148.969

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 7.6 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้หลังจากปรับปรุงฐานด้านบนจากใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.1 เมื่อใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว

	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น	51 พารามิเตอร์
$r_b^1(mm)$	468.364	521.170
$r_b^2(mm)$	468.364	502.695
$r_b^3(mm)$	468.364	515.840
$\theta_1^1(\deg)$	0	-1.329
$\theta_1^2(\deg)$	120	119.270
$\theta_1^3(\deg)$	240	241.572
$\theta_2^1(\deg)$	67	67.064
$\theta_2^2(\deg)$	67	67.045
$\theta_2^3(\deg)$	67	66.817
$\alpha_2^1(\deg)$	0	0.869
$\alpha_2^2(\deg)$	0	0.577
$\alpha_2^3(\deg)$	0	-1.550
$d_0^1(mm)$	375.887	419.507
$d_0^2(mm)$	375.887	423.825
$d_0^3(mm)$	375.887	421.116
$\theta_{03}^1(\deg)$	0	0.073
$\theta_{03}^2(\deg)$	0	0.772
$\theta_{03}^3(\deg)$	0	0.669
$\theta_{04}^1(\deg)$	50	52.854
$\theta_{04}^2(\deg)$	50	52.185
$\theta_{04}^3(\deg)$	50	51.141
$a_4^1(mm)$	0	-0.228
$a_4^2(mm)$	0	-0.899
$a_4^3(mm)$	0	0.328
$b_4^1(mm)$	0	0.040
$b_4^2(mm)$	0	-1.332
$b_4^3(mm)$	0	-0.226

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\gamma_4^1(\deg)$	0	0.818
$\gamma_4^2(\deg)$	0	-0.160
$\gamma_4^3(\deg)$	0	-0.196
$\beta_4^1(\deg)$	0	-0.043
$\beta_4^2(\deg)$	0	1.053
$\beta_4^3(\deg)$	0	0.250
$L^1(mm)$	384	384.505
$L^2(mm)$	384	385.040
$L^3(mm)$	384	385.482
T_1^1	14.6	15.570
T_1^2	14.7	15.099
T_1^3	14.84	15.115
T_2^1	0.103627	0.105
T_2^2	0.115717	0.102
T_2^3	0.106736	0.111
$\alpha_B(\deg)$	90	89.807
$\beta_B(\deg)$	0	-1.496
$\gamma_B(\deg)$	180	179.631
$BW_x(mm)$	70	70.284
$BW_y(mm)$	105	108.368
$BW_z(mm)$	670	691.890
$tipx(mm)$	-25	-25.534
$tipy(mm)$	16.5	14.359
$tipz(mm)$	145.8	148.372

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 7.7 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นและค่าพารามิเตอร์ที่ได้หลังจากปรับปรุงฐานด้านบนจากใช้ฟังก์ชั่น lsqcurevfit เมื่อตั้งค่า TolFun = 0.001 เมื่อใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว

	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น	51 พารามิเตอร์
$r_b^1(mm)$	468.364	477.081
$r_b^2(mm)$	468.364	467.261
$r_b^3(mm)$	468.364	472.394
$\theta_1^1(\deg)$	0	-0.310
$\theta_1^2(\deg)$	120	117.831
$\theta_1^3(\deg)$	240	241.967
$\theta_2^1(\deg)$	67	66.864
$\theta_2^2(\deg)$	67	66.365
$\theta_2^3(\deg)$	67	66.275
$\alpha_2^1(\deg)$	0	0.574
$\alpha_2^2(\deg)$	0	-0.295
$\alpha_2^3(\deg)$	0	-0.484
$d_0^1(mm)$	375.887	373.046
$d_0^2(mm)$	375.887	376.588
$d_0^3(mm)$	375.887	374.376
$\theta_{03}^1(\deg)$	0	-0.053
$\theta_{03}^2(\deg)$	0	0.217
$\theta_{03}^3(\deg)$	0	-0.216
$\theta_{04}^1(\deg)$	50	50.707
$\theta_{04}^2(\deg)$	50	51.989
$\theta_{04}^3(\deg)$	50	51.551
$a_4^1(mm)$	0	0.067
$a_4^2(mm)$	0	0.122
$a_4^3(mm)$	0	1.002
$b_4^1(mm)$	0	0.297
$b_4^2(mm)$	0	0.026
$b_4^3(mm)$	0	-0.815

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$\gamma_4^1(\deg)$	0	0.644
$\gamma_4^2(\deg)$	0	0.416
$\gamma_4^3(\deg)$	0	-0.243
$\beta_4^1(\deg)$	0	-0.298
$\beta_4^2(\deg)$	0	-0.015
$\beta_4^3(\deg)$	0	0.806
$L^1(mm)$	384	383.279
$L^2(mm)$	384	384.152
$L^3(mm)$	384	383.758
T_1^1	14.6	14.416
T_1^2	14.7	14.725
T_1^3	14.84	14.800
T_2^1	0.103627	0.111
T_2^2	0.115717	0.103
T_2^3	0.106736	0.112
$\alpha_B(\deg)$	90	90.302
$\beta_B(\deg)$	0	-1.249
$\gamma_B(\deg)$	180	179.100
$BW_x(mm)$	70	65.433
$BW_y(mm)$	105	109.182
$BW_z(mm)$	670	665.823
$tipx(mm)$	-25	-56.049
$tipy(mm)$	16.5	32.509
$tipz(mm)$	145.8	144.395

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 7.8 ผลการทดลองจากการวัดพิกัดของรูเจาะ 16 รู โดยใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว ที่ได้จากการตั้งค่า TolFun = 0.001 ก่อนการปรับปรุงฐานบน

	x axis	y axis	z axis
rms error (mm)	0.3209	0.3229	0.0593
std error (mm)	0.3187	0.1304	0.0498
max error (mm)	0.9088	0.7281	0.1304

ตาราง 7.9 ผลการทดลองวัดระยะห่างระหว่างรูเจาะ 10 รู โดยใช้พารามิเตอร์ 51 ตัว ที่ได้จากการตั้งค่า TolFun = 0.001 ทั้ง 3 ครั้ง ก่อนการปรับปรุงฐานบน

	1st	2nd	3rd
rms error (mm)	0.3599	0.3356	0.4546
std error (mm)	0.3564	0.3351	0.4546
max error (mm)	0.7890	0.4850	0.6370

ตาราง 7.10 ผลการทดลองจากการวัดพิกัดของรูเจาะ 10 รู หลังจากปรับปรุงฐานบน

	x axis	y axis	z axis
rms error (mm)	0.61763	0.61564	0.11048
std error (mm)	0.55292	0.53113	0.10989
max error (mm)	0.94891	0.76628	0.2209

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลวิทยานิพนธ์

1.ระบบกลไกแขนกลนำที่ทำการสอบเทียบในงานวิจัยนี้ มีคอนโทรลเรซโซลูชันที่ข้อต่อต่าง ๆอยู่ที่ 2500 พัลส์ต่อรอบ

2.ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างส่วนต่าง ๆของแฮบติคดังนี้

- เพิ่มสไลด์เดอร์ที่ข้อต่อแบบเลื่อนเป็น 2 ตัวเพื่อให้ข้อต่อดังกล่าวมีความแข็งเกร็งมากยิ่งขึ้น

- พูเล่ย์ที่ข้อต่อที่ 3 เปลี่ยนจากการยึดติดกับลิเนียร์สไลด์ผ่านทางอลูมิเนียมรูปตัวแอล เป็นการออกแบบให้อลูมิเนียมรูปตัวแอลดังกล่าวเป็นชิ้นเดียวกับพูเล่ย์เพื่อลดความผิดพลาดในการประกอบ

- เพิ่มขนาดของรัศมีของพูเล่ย์ข้อต่อที่ 3 และลดขนาดของพูเล่ย์ที่สวมกับเอ็นโค้ดเดอร์ที่ใช้อ่านค่าการหมุนของพูเล่ย์ข้อต่อที่ 3 เพื่อเพิ่มอัตราทดให้การอ่านค่ามีความละเอียดมากยิ่งขึ้น

- ปรับปรุงโครงสร้างฐานบนให้มีความแข็งเกร็งและได้ศูนย์มากยิ่งขึ้น

3.การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ต่าง ๆของกลไกใช้วิธีทรัสต์รีเจี้ยน โดยใช้หาค่าที่น้อยที่สุดของ

$$s = \sum_{1}^{n} r_i^2$$

เมื่อ

$$r_i = \hat{y} - f(q_i, x)$$

โดยที่

$f(q_i, x)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนแฮบติคที่ได้จากสมการ

$\hat{y}$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนแฮบติคที่ได้จากอุปกรณ์วัดภายนอก

4.งานวิจัยนี้ได้ทดลองหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแฮบติค โดยทดลองเป็น 3 แบบ คือ 42 51 และ 57 พารามิเตอร์ ใช้จำนวนข้อมูล 440 ข้อมูล (44 จุด จุดละ

10 ทิศทางการหมุน) พบว่าแบบที่มีพารามิเตอร์ 51 และ 57 ตัวให้เศษตกค้างรวมที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเศษตกค้างรวมก็คือค่า $s = \sum_{1}^{n} r_i^2$

5.ทดลองปรับค่าเริ่มต้นและทำการถดถอยอีกครั้งโดยเลือกใช้แบบ 51 พารามิเตอร์ เนื่องจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดให้ได้ผลดีนั้นจำนวนพารามิเตอร์มีผลค่อนข้างมาก กล่าวคือ ยิ่งมีจำนวนพารามิเตอร์มากเท่าไหร่ยิ่งทำให้ลู่เข้าช้าหรือบางครั้งหากเดาค่าเริ่มต้นไม่ดีก็จะไม่ลู่เข้า ซึ่งจากการทดลองหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสมพบว่า ค่าเศษตกค้างรวมของแบบ 51 และ 57 พารามิเตอร์ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน จึงเลือกได้เลือกใช้แบบ 51 พารามิเตอร์

6.ทดสอบความแม่นยำของแฮปติค (ใช้ 51 พารามิเตอร์) โดยการทดสอบวัดพิกัดของจุดศูนย์กลางทรงกลมบนอุปกรณ์สอบเทียบ โดยทดสอบทั้งหมด 16 จุด พบว่า ความผิดพลาดทั้ง 3 แกนมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

7.ทดสอบโดยการใช้วัดระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางทรงกลมบนอุปกรณ์สอบเทียบทั้งหมด 10 ระยะห่าง พบว่า ความผิดพลาดมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

8.ความแม่นยำของแฮปติคขึ้นกับหลายปัจจัย

-การเลือกใช้อุปกรณ์สอบเทียบเป็นอุปกรณ์อ้างอิงย่อมมีความผิดพลาดในขั้นตอนการวัดอุปกรณ์สอบเทียบด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็มเนื่องจาก การใช้เครื่องซีเอ็มเอ็มเป็นการใช้คนวัดซึ่งแรงกดที่ไม่เท่ากันในแต่ละครั้งจะทำให้พิกัดที่ได้มีความผิดพลาด

-ความแม่นยำของกลไกที่ใช้สำหรับการเริ่มต้นใช้งานแฮปติค หรือก็คือความแม่นยำของตำแหน่งโฮม

-พูเลย์บางตัวอาจไม่ศูนย์อันเนื่องมาจากการประกอบ

-ระยะห่างในแบริ่งและลิเนียร์สไลด์

-การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดช้ระเบียบวิธีทางตัวเลข ทำให้เกิดความผิดพลาดจากเศษที่เกิดจากการคำนวณ

9.ปัจจัยต่างๆในข้อ 8 ส่งผลให้การเพิ่มจำนวนพารามิเตอร์ไม่สามารถเพิ่มความแม่นยำได้ดังที่เห็นในผลการทดลองเพื่อหาจำนวนพารามิเตอร์ที่เหมาะสม อีกทั้งการหาค่าที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เหมาะสมที่สุดก็ไม่ได้รับประกันค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบโกลบอล แค่รับประกันแบบโลคอล ทำให้พารามิเตอร์บางค่าที่ได้แตกต่างจากค่าที่ใช้เป็นค่าเริ่มต้นค่อนข้างมาก

8.2 ข้อเสนอแนะ

1.จากงานวิจัยหลายชิ้นที่พบในกลไกแบบสจ๊วตสังเกตได้ว่า งานวิจัยเหล่านั้นเลือกใช้หุ่นยนต์ที่จำหน่ายในท้องตลาดซึ่งทำให้ไม่ต้องปรับปรุงฮาร์ดแวร์อีก แฮบติคที่ทำการสอบเทียบในงานวิจัยนี้ยังมีบางส่วนที่น่าที่จะต้องปรับปรุงเพิ่มเติม เช่น

-มอเตอร์ที่ใช้ขับลิเนียร์สไลด์ค่อนข้างที่จะมีแรงเสียดทานเยอะ อาจส่งผลให้เกิดการเลื่อนไถลของสลิงได้

-เสาที่เป็นโครงสร้างหลักเพื่อให้อุปกรณ์แฮบติคตั้งอยู่ได้ควรจะสร้างให้แข็งแรงมั่นคงมากยิ่งขึ้น

2.การใช้เทคนิคอื่นแทนการสร้างอุปกรณ์สอบเทียบ โดยอาจจะต้องจัดหาอุปกรณ์วัดภายนอก เช่น อินไคล์นโนมิเตอร์ เพื่อวัดหาทิศทางการหมุนของปลายแขน จากนั้นจึงทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ทิศทางการหมุนที่ได้จากอินไคล์นโนมิเตอร์และจากการคำนวณผ่านทางคิเนแมติกส์มีค่าใกล้กันมากที่สุด ซึ่งหากใช้วิธีนี้จะสามารถลดความผิดพลาดจากตัวอุปกรณ์สอบเทียบซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอนการใช้คนวัดด้วยเครื่องซีเอ็มเอ็มได้

3.การปรับปรุงอุปกรณ์ตรวจรู้ให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] H. Zhuang, O. Masory and J. Yan. Kinematic calibration of Stewart platforms using pose measurements obtained by a single theodolite. Proc. of IROS 1995 : 329-335.

[2] S. Besnard and W. Khalil. Calibration of parallel robots using tow inclinometers. Proc. IEEE International Conference on Robotic and Automation 1999 : 1758-1753.

[3] W. Khalil and S. Besnard. Self calibration of Stewart-Gough parallel robts wthout extra senxors. IEEE Transaction on Robotic and Automation 15 (June 1999) : 1116-1121.

[4] H. Zhuang. Self calibration of parallel mechanisms with a case study on Stewart platforms. IEEE Transaction on Robotic and Automation 13 (March 1997) : 387-397.

[5] D. Cong, D. Yu and J. Han. Kinematic Calibration of Parallel Robots Using CMM. Proc. of World Congress on Intelligent Control and Automation 6 (June 2006) : 8514-8518.

[6] D. Yu, X. Sun and Y. Wang. Kinematic Calibration of Parallel Robots Based on Total Least Squares Algorithm. Proc. of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation 2007 : 789-794.

[7] D. J. Bennett, J. M. Hollerbach and P. D. Henri. Kinematic Calibration by Direct Estimation of the Jacobian Matrix. Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation 1992 : 351-357.

[8] O. Masory and J. Yan. Repeatability Measurement of Stewart Platforms. Proc. IEEE International Conference on Robotic and Automation 1994 : 2762.

[9] ธนุพงษ์ เงาจารุวงศ์. การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แฮบติคที่มี 6 องศาอิสระโดยใช้โครงสร้างแบบขนาน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546

[10] กิตติศักดิ์ บุญยังคุณ. เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

อุปกรณ์ของแขนกล Haptic

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

เป็นมอเตอร์กระแสตรงยี่ห้อ Sgmada รุ่น RS-385 ขนาดเท่ากับ 25 วัตต์ สามารถรับกระแสต่อเนื่องได้ 2 แอมแปร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมที่เป็นแบบ Incremental Rotary Encoder และมีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบไว้ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของมอเตอร์

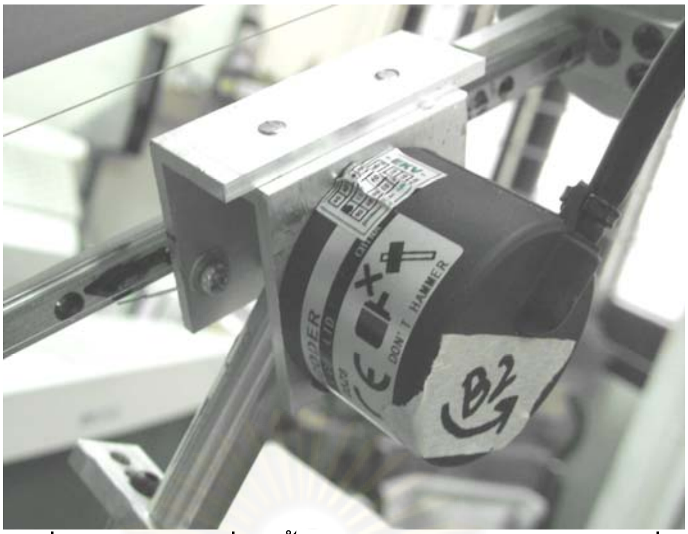
รูปที่ ก.1 มอเตอร์กระแสตรงของข้อหมุนที่ 1 และ ข้อต่อแบบเลื่อน

อุปกรณ์วัดมุม (Encoder)

ใช้ของยี่ห้อ Koyo รุ่น TRD-S2500VA ซึ่งเป็นแบบ Incremental Rotary Encoder โดยมีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบ ซึ่งใช้ติดตั้งบน Passive Joint

รูปที่ ก.2 อุปกรณ์วัดมุม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



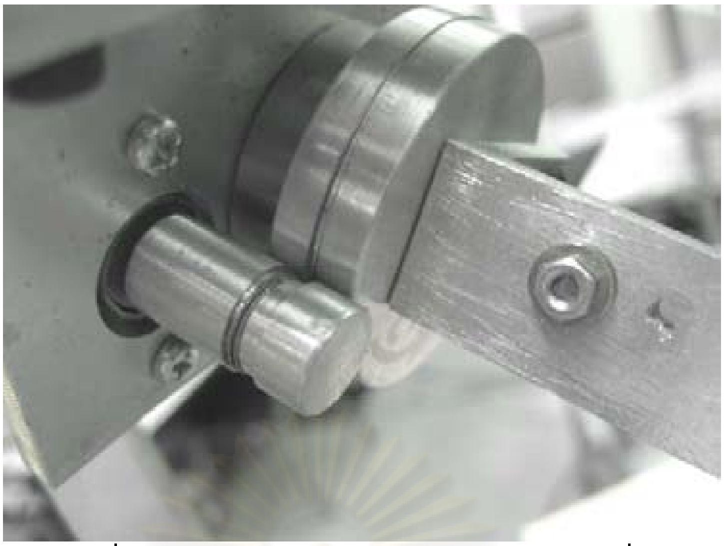
รูปที่ ก.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของข้อหมุนตัวที่ 2

รูปที่ ก.4 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของข้อแบบเลื่อน

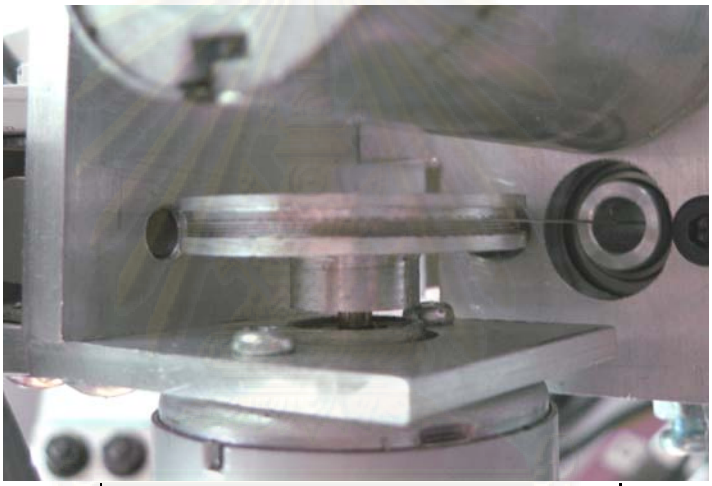
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระบบสายพานและมู่เล่

มู่เล่ที่ใช้เป็นมู่เล่ที่ทำขึ้นเป็นพิเศษวัสดุที่ใช้ทำเป็นอลูมิเนียม ที่มู่เล่ตามมีจุดยึดสายพานเพื่อกันสายพานลื่น



รูปที่ ก.5 ระบบสายพานและมูเล่ของข้อหมุนตัวที่ 1

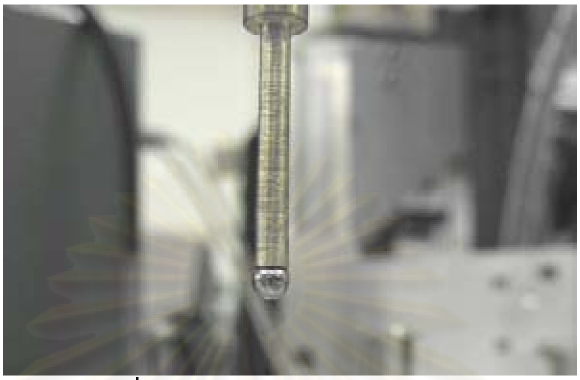


รูปที่ ก.6 ระบบสายพานและมู่เล่ของข้อต่อแบบเลื่อน

รูปที่ ก.7 ระบบมู่เล่สายพานของอุปกรณ์วัดมุมของข้อต่อแบบเลื่อน

คันบังคับ

คันบังคับที่ใช้ทำจากวัสดุสามชนิดด้วยกัน ตัวด้ามจับซึ่งใช้วิธีจับแบบปากกาทำจากอลูมิเนียม ก้านทองเหลืองปรับความยาวสำหรับยึดทรงกลมเหล็กความเที่ยงตรงสูง ทรงกลมมีขนาด 5 มิลลิเมตร



รูปที่ ก.8 รายละเอียดของคันบังคับ

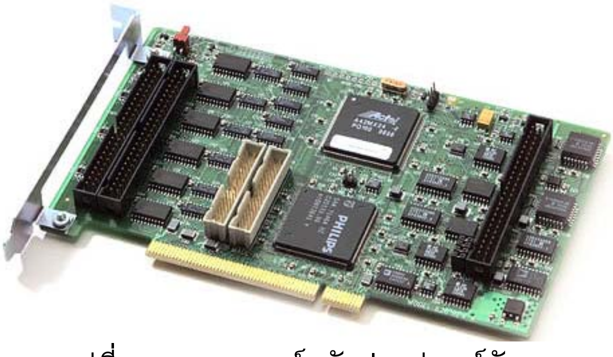
รูปที่ ก.9 วิธีการจับคันบังคับ

การ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม (Counter Card)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

ใช้ของยี่ห้อ Sensoray 626 ซึ่งสามารถต่อกับอุปกรณ์วัดมุมได้ทั้งหมด 6 ตัว สามารถส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณได้ 4 ตัว

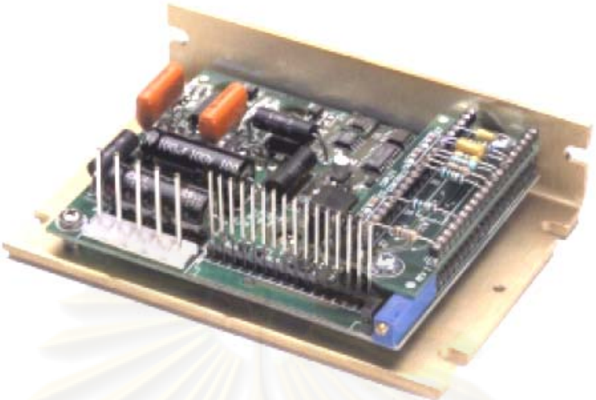
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.10 แสดงการ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม

ชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor Drive Amplifier)

ใช้ของยี่ห้อ Copley Controls รุ่น 4122P โดยที่สามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องได้สูงสุด 10 แอมแปร์



รูปที่ ก.11 แสดงชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกพจน์ สุนทรมาตฤก เกิดเมื่อวันที่ 2 กันยายน ปี พ.ศ. 2525 เป็นชาวจังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมต่อเรือและเครื่องกลเรือ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา เมื่อปี พ.ศ.2548

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย