

การพัฒนาระบบวัดพิกัดตำแหน่ง 3 มิติ แบบเลเซอร์ 2 สถานี



นายจรรุบุตร คณะนัย

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชา

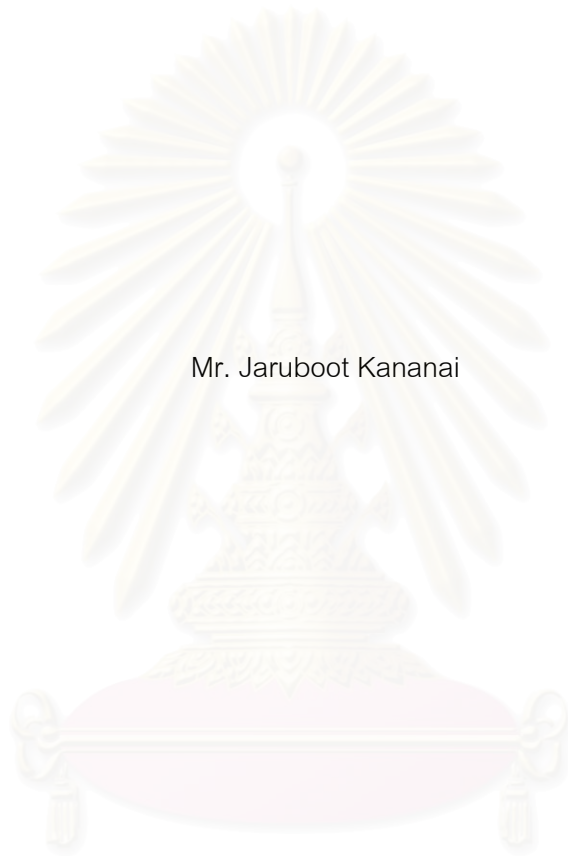
วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A 3D POSITION MEASURING SYSTEM
USING 2 LASER STATIONS



Mr. Jaruboot Kananai

สถาบันวิทยบริการ
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

การพัฒนาระบบวัดพิภักต์ตำแหน่ง 3 มิติ แบบเลเซอร์ 2

สถานี

โดย

นายจารุบุตร คณะนัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงศ์)

จารุบุตร คณะนัย : การพัฒนาระบบวัดพิกัดตำแหน่ง 3 มิติ แบบ เลเซอร์ 2 สถานี.
(DEVELOPMENT OF A 3D POSITION MEASURING SYSTEM USING 2 LASER
STATIONS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :รศ.ดร.รัชทิน จันทรเจริญ,อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ร่วม:ผ.ศ.ดร.ศุภวดี จันทรานูวัฒน์, 171 หน้า.

ปัจจุบัน เทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทในการทำงานต่างๆ โดยเฉพาะใน
ภาคอุตสาหกรรม หุ่นยนต์อุตสาหกรรมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต ช่วยทำงานแทนมนุษย์ใน
พื้นที่อันตราย และช่วยเพิ่มความแม่นยำในการทำงานในกรณีที่ต้องการความแม่นยำสูง วิทยานิพนธ์นี้
นำเสนอระบบวัดพิกัดตำแหน่ง 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์
ระบบวัดพิกัดตำแหน่ง 3 มิติที่นำเสนอใช้แสงเลเซอร์ที่ควบคุมทิศทางของลำแสงได้ จำนวน 2 ลำแสง
ยิงไปที่วัตถุที่ต้องการวัดพิกัดตำแหน่ง จากนั้นนำทิศทางของลำแสงทั้งสองมาคำนวณผ่านทาง
ความสัมพันธ์เรขาคณิตเพื่อคำนวณหาพิกัดตำแหน่ง 3 มิติ วิธีการนี้ทำให้ระบบวัดพิกัดตำแหน่ง 3 มิติ
ไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุเป้าหมายโดยตรง และการคำนวณพิกัดตำแหน่งไม่อิงอยู่บนสมการทาง
คณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ เป็นผลทำให้ความผิดพลาดในการวัดไม่ขึ้นอยู่กับแบบจำลองของหุ่นยนต์
และอีกทั้งยังมีความเร็วในการทำงานสูงและมีพื้นที่การทำงานกว้าง การพัฒนาระบบวัดพิกัดตำแหน่ง
3 มิติ แบบเลเซอร์ 2 สถานีรวมถึงการออกแบบโครงสร้างของระบบ การออกแบบระบบทางกลที่ใช้ใน
การขับเคลื่อนกระจกสะท้อนแสง การออกแบบระบบควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อควบคุมแนวลำแสงให้ชี้
ไปที่เป้าหมายตลอดเวลา การคำนวณพิกัดตำแหน่ง 3 มิติ ของระบบ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด และ
การควบคุมในเวลาจริง วิทยานิพนธ์ได้แสดงสมรรถนะการทำงานของระบบและแสดงให้เห็นว่าระบบ
สามารถวัดพิกัดตำแหน่ง 3 มิติได้

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต..... *กรรณกร มานะ*
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2551.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม..... *จ/จ*

4870576521: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : LASER POSIOTNING SYSTEMS / CONTROL SYSTEM DESIGN / TRACKING CONTROL

JARUBOOT KANANAI : DEVELOPMENT PF A 3D POSITION MEASURING SYSTEM USING 2 LASER STATIONS. ADVISOR:ASSC.Prof RATCHATIN CHANCHAREON, CO-ADVISOR: ASST.Prof. SUPAVUT CHANTRANUWATHANA,Ph.D., 171 pp.

Nowadays, robotics technology plays an important role in industry. Industrial robots improve productivity, working environment, and improve precision and quality where needed. This thesis presents 3D position measurement system that improves accuracy of robotic positioning system. The proposed 3D position measurement system uses two laser beams controlled to point to a target. Then, the directions of these two beams are used to compute the 3D position based on geometric relation. Using optical technique, the 3D position measurement system requires no direct contact to the target and the calculation does not depend on a mathematical model of a robot and thus its accuracy is free from the robot model. Furthermore, the speed of measurement and the working space are also improved. The development of 3D position measurement system using two laser stations includes the design of the structure, the mechanical system to drive the mirror, the feedback control system to control the direction of the laser beam, the calculation, the electronics, and the real time control. This thesis demonstrates the performance of the proposed 3D position measurement system and demonstrates that it can measure 3D position of the target.



Department : Mechanical Engineering Student's Signature: *[Handwritten Signature]*
Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature: *[Handwritten Signature]*
Academic Year : 2008 Co-Advisor's Signature: *[Handwritten Signature]*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.รัชทิน จันทรเจริญ และ ผศ.ดร.ศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ท่านกรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่าน เพื่อให้คำแนะนำปรึกษาด้านการออกแบบ การควบคุม วิธีการเขียน และ คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งจัดหาทุนอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับเงินสนับสนุนในการจัดซื้ออุปกรณ์ และวิทยานิพนธ์นี้คงไม่มีทางประสบความสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดา ในทุกๆด้านไม่ว่าด้านเงินทุน คำแนะนำ รวมทั้งกำลังใจและความห่วงใยที่มีให้มา ในที่นี้ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณ อ.วิรัช วงษ์ไพบูลย์ สำหรับการให้คำปรึกษาความรู้ทางด้านไฟฟ้า และขอขอบคุณสำหรับทุกๆท่านที่อยู่แวดล้อมผู้วิจัย ไม่ว่าจะเป็นเพื่อนๆ นักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท ปริญญาเอก แม่บ้านและเจ้าหน้าที่ที่ได้แนะนำและให้ความช่วยเหลือต่างๆแก่กันเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	5
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	6
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	6
บทที่ 2 ปรัชญาวิศวกรรม	7
2.1 ความสำคัญของระบบ LPS.....	7
2.2 ประวัติ และ สถานภาพปัจจุบัน	8
บทที่ 3 หลักการทำงานของระบบ LPS	13
3.1 หลักการทำงานของระบบ LPS.....	13
3.2 หลักการคำนวณตำแหน่ง 3 มิติ แบบ Triangulation	15
3.3 หลักการประมาณค่าความผิดพลาด ของ LPS แบบ Triangulation.....	17
3.3.1 ความผิดพลาด ของ x-y	17
3.3.2 ความผิดพลาด ในแนวแกน z.....	19
3.4 การถอดถอยแบบเชิงเส้น	20
บทที่ 4 การออกแบบ LPS เบื้องต้น	23
4.1 ออกแบบลักษณะโดยรวมและโครงสร้างของ LPS	23
4.2 การเลือกอุปกรณ์	25
4.2.1 ชุดหัวเลเซอร์ฮีเลียมนีออน	25
4.2.2 ชุด Beam splitter (BS).....	26
4.2.3 ชุด Photo Sensitive Diode.....	27
4.3 ชุด Tracker.....	28
4.4 อุปกรณ์ควบคุม	30

บทที่ 5	ต้นแบบ LPS 1	32
5.1	ต้นแบบ LPS 1	32
5.2	อุปกรณ์ควบคุมของต้นแบบ LPS 1	37
บทที่ 6	ระบบควบคุมและการทดสอบ ต้นแบบ LPS 1	40
6.1	ระบบควบคุมสำหรับ LTS ของต้นแบบ LPS 1	40
6.2	การปรับแต่งระบบควบคุม LTS ของต้นแบบ LPS1	41
6.2.1	ผลการปรับระบบควบคุมลูบควบคุมมุม (ลูบใน)	42
6.2.2	ผลการปรับระบบควบคุมลูบควบคุมตำแหน่งแสงบน PSD (ลูบนอก)	44
6.3	ความสามารถในการติดตาม Retro-reflector	46
6.3.1	ความเร็วในการติดตามที่ระยะ 1 m	46
6.3.2	ความเร็วในการติดตามที่ระยะ 5.8 m	47
6.3.3	การติดตาม Retro-reflector ในสองแกนพร้อมๆกัน	50
6.4	ความสามารถในการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector	52
6.4.1	ความสามารถในการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector เมื่อมีการเลื่อนอุปกรณ์ LTS ทุกๆตำแหน่งของ Retro-reflector ที่ทำการวัด (ผลชุดที่ 1)	54
6.4.2	ความสามารถในการวัดตำแหน่ง เมื่อมีการเลื่อนอุปกรณ์ LTS ครั้งเดียว (ผลชุดที่ 2)	56
บทที่ 7	ต้นแบบ LPS 2	59
7.1	ต้นแบบ LPS 2	59
7.2	อุปกรณ์ควบคุมของ ต้นแบบ LPS 2	66
บทที่ 8	ระบบควบคุมและการทดสอบ ต้นแบบ LPS 2	70
8.1	ระบบควบคุมสำหรับ LTS ของต้นแบบ LPS 2	70
8.2	การปรับแต่งระบบควบคุม ของต้นแบบ LPS 2	71
8.2.1	ผลการปรับระบบควบคุมลูบควบคุมมุม (ลูบใน)	71
8.2.2	ผลการปรับระบบควบคุมลูบควบคุมตำแหน่งแสงบน PSD (ลูบนอก)	80
8.3	ความสามารถในการติดตาม Retro-reflector	83
8.3.1	ความเร็วในการติดตามที่ระยะ 1 m	83
8.3.2	การติดตาม Retro-reflector ในสองแกนพร้อมๆกัน	92
8.4	ความสามารถในการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector	94
บทที่ 9	สรุปผลงานการวิจัย และข้อเสนอแนะ	99
9.1	ต้นแบบของ Local Positioning System 1 (LPS 1)	99

9.2 ต้นแบบของ Local Positioning System 2 (LPS 2)	100
รายการอ้างอิง.....	102
ภาคผนวก	104
ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์	105
ภาคผนวก ข โปรแกรม Matlab®- Simulink®, xPC target	124
ภาคผนวก ค การเพิ่มความถูกต้องในการวัดตำแหน่งของ Encoder แบบ Sine wave	132
ภาคผนวก ง แผนผังวงจรไฟฟ้า.....	143
ภาคผนวก จ บทความที่รับการตีพิมพ์.....	153
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	171



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การติดตั้งกระจกสะท้อนมุมฉาก(Retro-reflector)	2
รูปที่ 1.2 แสดงการทำงานของ กระจกสะท้อนมุมฉาก (Retro-reflector)	2
รูปที่ 1.3 ระบบการทำงานของ LPS แบบสถานีเดี่ยว (Single-Station).....	3
รูปที่ 1.4 ระบบการทำงานของ LPS แบบหลายสถานี (Multi-Station).....	4
รูปที่ 2.1 Laser Tracker LTD640	10
รูปที่ 2.2 FARO Laser Tracker XI V2.....	10
รูปที่ 3.1 ระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์ (Local Positioning System) หรือ LPS	13
รูปที่ 3.2 ทางเดินเยื้องศูนย์กลางของแสง	14
รูปที่ 3.3 ทางเดินทับกันของแสง.....	14
รูปที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆของแนวแสงในการคำนวณหาตำแหน่งของ Retro-reflector	15
รูปที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆในการคำนวณหาตำแหน่งของ Retro-reflector.....	16
รูปที่ 3.6 แผนภาพและตัวแปรที่ใช้.....	17
รูปที่ 3.7 ค่าความผิดพลาดสูงสุดในแนวรัศมี เมื่อ $z = 0$	19
รูปที่ 3.8 แผนภาพและตัวแปรที่ใช้.....	20
รูปที่ 3.9 ค่าความผิดพลาดในแนวแกน z	20
รูปที่ 3.10 การถอดถอยแบบเชิงเส้นโดยการประดิษฐ์ฟังก์ชันเส้นตรงจากชุดข้อมูลที่กำหนดมาให้ ...	21
รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบ LPS.....	24
รูปที่ 4.2 ชุดหัวเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน.....	26
รูปที่ 4.3 การยิงแบ่งลำแสงโดยใช้ Beam splitter	26
รูปที่ 4.4 การยอมให้ลำแสงผ่าน Beam splitter.....	27
รูปที่ 4.5 การยิงลำแสงผ่านชุด Beam splitter	27
รูปที่ 4.6 PSD.....	28
รูปที่ 4.7 ชุด Tracker ของ LPS 1ง	29
รูปที่ 4.8 ชุด Tracker ของ LPS 2.....	29
รูปที่ 4.9 ภาพตัดของ ชุด Tracker ของ LPS 2.....	30
รูปที่ 5.1 หลักการทำงานของต้นแบบ LPS 1	32
รูปที่ 5.2 ต้นแบบ ระบบ LTS ของต้นแบบ LPS 1	33
รูปที่ 5.3 Tracking Mirror System.....	34

รูปที่ 5.4 อุปกรณ์จับยึดกระจก.....	34
รูปที่ 5.5 ชุดจับยึด Beam Splitter ของอุปกรณ์ LTS ของต้นแบบ LPS 1	35
รูปที่ 5.6 ชุดจับยึด PSD ของอุปกรณ์ LTS ของต้นแบบ LPS 1	35
รูปที่ 5.7 ชุดบังคับกระจกติดตามของอุปกรณ์ LTS ของต้นแบบ LPS 1 (ด้านหลัง).....	36
รูปที่ 5.8 การปรับแต่งแนวแสงเลเซอร์ขาเข้า.....	36
รูปที่ 5.9 การปรับแต่งแนวแสงเลเซอร์ขากลับ	37
รูปที่ 5.10 ส่วนควบคุมของระบบติดตาม ต้นแบบ LPS 1.....	38
รูปที่ 5.11 ระบบต่างๆที่ใช้สำหรับควบคุม ต้นแบบ LPS 1.....	39
รูปที่ 5.12 กล่องระบบไฟฟ้าของอุปกรณ์ LTS (สำหรับ LTS หนึ่งชุด).....	39
รูปที่ 6.1ระบบควบคุมแบบสองรูป ของชุดควบคุมกระจกในแนว Azimuth.....	41
รูปที่ 6.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth	43
รูปที่ 6.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth (รูปขยายของรูปที่ 6.2).....	43
รูปที่ 6.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude	44
รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude (รูปขยายของรูปที่ 6.4).....	44
รูปที่ 6.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการของแกน Azimuth.....	45
รูปที่ 6.7 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการของแกน Altitude	45
รูปที่ 6.8 ค่ามุม Azimuth ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	46
รูปที่ 6.9 ค่ามุม Altitude ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	47
รูปที่ 6.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน x (Azimuth) ในการทดสอบความเร็วที่ 5.8 m	48
รูปที่ 6.11 ค่ามุม Azimuth ในการทดสอบความเร็วที่ 5.8 m	48
รูปที่ 6.12 ค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน y (Altitude) ในการทดสอบความเร็วที่ 5.8 m	49
รูปที่ 6.13 ค่ามุม Altitude ในการทดสอบความเร็วที่ 5.8 m	49
รูปที่ 6.14 ค่ามุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน (ข้อมูลชุดที่หนึ่ง). 50	
รูปที่ 6.15 ค่าความเร็วเชิงมุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน (ข้อมูลชุดที่หนึ่ง).....	51
รูปที่ 6.16 ค่ามุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน (ข้อมูลชุดที่สอง). 51	

รูปที่ 6.17 ค่าความเร็วเชิงมุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน (ข้อมูลชุดที่สอง)	52
รูปที่ 6.18 การจัดวางตำแหน่งต่างๆในการทดลองวัดตำแหน่ง Retro-reflector.....	53
รูปที่ 6.19 ตำแหน่ง Retro-reflector เทียบกับแกน X-Y (ผลชุดที่ 1).....	54
รูปที่ 6.20 ค่าผิดพลาดในการวัดจากระนาบ x-y (ผลชุดที่ 1).....	55
รูปที่ 6.21 ค่าตำแหน่งที่วัดได้เทียบกับตำแหน่งในระนาบ x-y (ผลชุดที่ 1).....	55
รูปที่ 6.22 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y (ผลชุดที่ 1).....	56
รูปที่ 6.23 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y เทียบกับตำแหน่งที่วัด (ผลชุดที่ 1).....	56
รูปที่ 6.24 ตำแหน่ง Retro-reflector เทียบกับแกน X-Y (ผลชุดที่ 2).....	57
รูปที่ 6.25 ค่าผิดพลาดในการวัดจากระนาบ x-y (ผลชุดที่ 2).....	57
รูปที่ 6.26 ค่าตำแหน่งที่วัดได้เทียบกับตำแหน่งในระนาบ x-y (ผลชุดที่ 2).....	58
รูปที่ 6.27 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y (ผลชุดที่ 2).....	58
รูปที่ 6.28 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y เทียบกับตำแหน่งที่วัด (ผลชุดที่ 2).....	58
รูปที่ 7.1 ต้นแบบ LPS 2.....	59
รูปที่ 7.2 ระบบ ต้นแบบ LPS 2 (อุปกรณ์จริง).....	60
รูปที่ 7.3 ระบบ LTS Module-R	61
รูปที่ 7.4 Tracking Mirror System.....	61
รูปที่ 7.5 อุปกรณ์จับยึดกระจก.....	62
รูปที่ 7.6 ชุดจับยึด Beam Splitter ของอุปกรณ์ LTS ต้นแบบ LPS 2	63
รูปที่ 7.7 ชุดจับยึด PSD ของอุปกรณ์ LTS ต้นแบบ LPS 2.....	63
รูปที่ 7.8 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 1.....	64
รูปที่ 7.9 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 2.....	64
รูปที่ 7.10 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 3.....	65
รูปที่ 7.11 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 4.....	65
รูปที่ 7.12 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 5.....	66
รูปที่ 7.13 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 6.....	66
รูปที่ 7.14 ระบบต่างๆที่ใช้สำหรับควบคุม ต้นแบบ LPS 2.....	68
รูปที่ 7.15 ส่วนควบคุมของระบบติดตาม	68
รูปที่ 7.16 ระบบต่างๆที่ใช้สำหรับควบคุม ต้นแบบ LPS 2.....	69
รูปที่ 8.1 ระบบควบคุมแบบสองลูบ ของชุดควบคุมกระจกในแนว Azimuth.....	71

รูปที่ 8.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth Module-R..... 72

รูปที่ 8.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth Module-R (รูปขยายของรูปที่ 8.2) 73

รูปที่ 8.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude Module-R..... 73

รูปที่ 8.5 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude Module-R (รูปขยายของรูปที่ 8.4) 74

รูปที่ 8.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth Module-L 74

รูปที่ 8.7 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth Module-L (รูปขยายของรูปที่ 8.6) 75

รูปที่ 8.8 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude Module-L 75

รูปที่ 8.9 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude Module-L (รูปขยายของรูปที่ 8.8) 76

รูปที่ 8.10 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Azimuth Module-R 76

รูปที่ 8.11 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Azimuth Module-R (รูปขยายของรูปที่ 8.10) 77

รูปที่ 8.12 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Altitude Module-R 77

รูปที่ 8.13 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Altitude Module-R (รูปขยายของรูปที่ 8.12) 78

รูปที่ 8.14 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Azimuth Module-L 78

รูปที่ 8.15 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Azimuth Module-L (รูปขยายของรูปที่ 8.14) 79

รูปที่ 8.16 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Altitude Module-L 79

รูปที่ 8.17 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Altitude Module-L (รูปขยายของรูปที่ 8.16) 80

รูปที่ 8.18 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการของแกน Azimuth Module-R 81

รูปที่ 8.19 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการของแกน Altitude Module-R.....	81
รูปที่ 8.20 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการของแกน Azimuth Module-L	82
รูปที่ 8.21 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการของแกน Altitude Module-L	82
รูปที่ 8.22 ค่าแรงดันไฟฟ้า PSD ในแกน x ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	84
รูปที่ 8.23 ค่าแรงดันไฟฟ้า PSD ในแกน y ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	85
รูปที่ 8.24 ค่ามุม Azimuth ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	85
รูปที่ 8.25 ค่าแรงดันไฟฟ้าใน PSD แกน x ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	86
รูปที่ 8.26 ค่าแรงดันไฟฟ้าใน PSD แกน y ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	87
รูปที่ 8.27 ค่ามุม Altitude-ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	87
รูปที่ 8.28 ค่าแรงดันไฟฟ้า PSD ในแกน x ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	88
รูปที่ 8.29 ค่าแรงดันไฟฟ้า PSD ในแกน y ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	89
รูปที่ 8.30 ค่ามุม Azimuth ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	89
รูปที่ 8.31 ค่าแรงดันไฟฟ้าใน PSD แกน y ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	90
รูปที่ 8.32 ค่าแรงดันไฟฟ้าใน PSD แกน x ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	91
รูปที่ 8.33 ค่ามุม Altitude ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m	91
รูปที่ 8.34 ค่ามุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกนของ LTS Module-R	92
รูปที่ 8.35 ค่าความเร็วเชิงมุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน ของ LTS Module-R	93
รูปที่ 8.36 ค่ามุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกนของ LTS Module-L	93
รูปที่ 8.37 ค่าความเร็วเชิงมุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกนของ LTS Module-L	94
รูปที่ 8.38 การจัดวางตำแหน่งต่างๆในการทดลองวัดตำแหน่ง Retro-reflector.....	95
รูปที่ 8.39 ตำแหน่ง Retro-reflector เทียบกับแกน X-Y	96
รูปที่ 8.40 ค่าผิดพลาดในการวัดจากระนาบ x-y	97
รูปที่ 8.41 ค่าตำแหน่งที่วัดได้เทียบกับตำแหน่งในระนาบ x-y)	98

รูปที่ 8.42 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y	98
รูปที่ 9.1 ต้นแบบ Local Positioning System 1 (LPS 1)	100
รูปที่ 9.2 ต้นแบบ Local Positioning System 2 (LPS 2)	101
รูปที่ ก.1 คุณสมบัติของ Laser-line dielectric mirror	107
รูปที่ ก.2 Laser-line Non-polarizing Cube Beam splitters	108
รูปที่ ก.3 Power supply drawing	109
รูปที่ ก.4 Photo Sensitive Diode	111
รูปที่ ก.5 แผนภาพเชิงกล	112
รูปที่ ก.6 แผนภาพวงจรไฟฟ้า	112
รูปที่ ก.7 Ball Mount Retro-reflector	113
รูปที่ ก.8 Laser Protective Spectacles	113
รูปที่ ก.9 Card PCI-9112	115
รูปที่ ก.10 Card PCI-8133	116
รูปที่ ก.11 Card PCI-6308	117
รูปที่ ก.12 Servo star CD cx03	118
รูปที่ ก.13 Servo star CD cx03	119
รูปที่ ก.14 Kollmorgen Motor รุ่น RBE 01210	120
รูปที่ ก.15 Kollmorgen Motor รุ่น RBE 02110	120
รูปที่ ก.16 Encoder รุ่น CM-300	121
รูปที่ ก.17 Encoder รุ่น CP-300	122
รูปที่ ข.1 ระบบพลศาสตร์ ที่ต้องการควบคุม	125
รูปที่ ข.2 จำลองระบบการควบคุมระดับน้ำด้วย Simulink Block Diagram	125
รูปที่ ข.3 หน้าต่างแสดงการควบคุมการทำงานของ XPC บน Host PC	126
รูปที่ ข.4 IO Block Library ที่มีใช้ใน Simulink Library	127
รูปที่ ข.5 การเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลจาก Block Diagram ไปสู่ข้อมูลที่ใช้ใน xPC Target	127
รูปที่ ข.6 การเชื่อมต่อระหว่าง Host PC และ Target PC	129
รูปที่ ข.7 หน้าต่างการติดตั้งค่าตัวแปรในการใช้ xPC Target	130
รูปที่ ข.8 หน้าจอแสดงผลของ Target PC	131
รูปที่ ค.1 สัญญาณที่ได้จาก Encoder แบบ Incremental	133

รูปที่ ค.2 การนับสัญญาณการเคลื่อนที่ จากสัญญาณ A, B.....	134
รูปที่ ค.3 วงจรการคำนวณตำแหน่งจากสัญญาณ Sinusoidal A, B.....	135
รูปที่ ค.4 การคำนวณตำแหน่งละเอียดจากสัญญาณ A, B ที่ใช้.....	137
รูปที่ ค.5 ผลการจำลองเมื่ออุปกรณ์ทำงานแบบอุดมคติ	138
รูปที่ ค.6 ผลการจำลองเมื่ออุปกรณ์ทำงานแบบไม่อุดมคติ.....	139
รูปที่ ค.7 ผลการจำลองเมื่ออุปกรณ์ทำงานแบบไม่อุดมคติ ที่มีการปรับระบบการคำนวณแล้ว.....	140
รูปที่ ค.8 ค่ามุม Azimuth ที่วัดได้จาก Counter card และจากการคำนวณโดยใช้ sine wave	141
รูปที่ ค.9 ค่ามุม Azimuth ที่วัดได้จาก Counter card และจากการคำนวณโดยใช้ sine wave (ขยาย ส่วน A ในรูปที่ ค.8)	142
รูปที่ ค.10 ค่ามุม Azimuth ที่วัดได้จาก Counter card และจากการคำนวณโดยใช้ sine waveขยาย ส่วน B ในรูปที่ ค.8)	143

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	6
ตารางที่ 2.1 แสดงวิวัฒนาการของการศึกษาระบบ LPS.....	8
ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบ Laser Tracking ของ Leica และ FARO .	11
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของ LPS เพื่อใช้ในการออกแบบ	24
ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของ Laser-line Dielectric Mirror	106
ตารางที่ ก.2 รายละเอียดคุณสมบัติของ Laser-line Non-polarizing Cube Beam splitters รุ่น 16NP.4 ของบริษัท Newport.....	108
ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของ He-Ne Laser Power Supply	109
ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติของ He-Ne Laser Head	110
ตารางที่ ก.5 คุณสมบัติของ Photo Sensitive Diode	111
ตารางที่ ก.6 คุณสมบัติของ Ball Mount Retro-reflector.....	112
ตารางที่ ก.7 คุณสมบัติของ Laser Protective Spectacle.....	113
ตารางที่ ก.8 คุณสมบัติของอลูมิเนียม 7022.....	114
ตารางที่ ก.9 คุณสมบัติของ Card Ad-link PCI-9112	115
ตารางที่ ก.10 คุณสมบัติของ Card Ad-link PCI-8133	116
ตารางที่ ก.11 คุณสมบัติของ Card Ad-link PCI-6308	117
ตารางที่ ก.12 คุณสมบัติของ Kollmorgen Amplifier รุ่น SERVO STAR CD cx03.....	118
ตารางที่ ก.13 คุณสมบัติของ Kollmorgen Amplifier รุ่น SERVO STAR CD cx03.....	119
ตารางที่ ก.14 คุณสมบัติของ Kollmorgen Motor รุ่น RBE 01210	120
ตารางที่ ก.15 คุณสมบัติของ Kollmorgen Motor รุ่น RBE 02110	120
ตารางที่ ก.16 คุณสมบัติของ Motor Encoder รุ่น CM-300 ของ บริษัท computer Optical Product	121
ตารางที่ ก.17 คุณสมบัติของ Encoder รุ่น CP-300 ของ บริษัท computer Optical Product.....	122

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย หุ่นยนต์ในรูปแบบต่างๆ ได้ถูกนำมาทำงานในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต, เพื่อทำงานในที่อันตรายแทนมนุษย์ และเพื่อทำงานบางประเภทที่ต้องใช้ความแม่นยำสูง

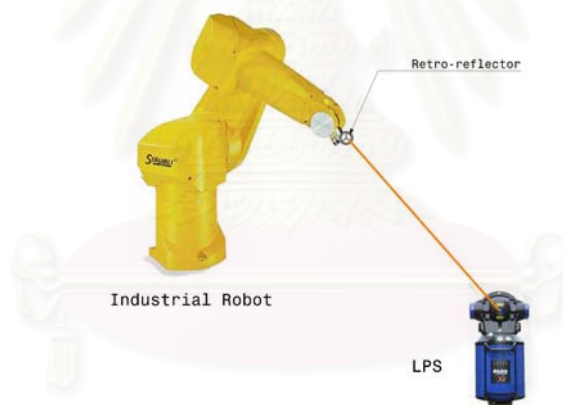
ในงานบางอย่างจำเป็นต้องใช้หุ่นยนต์ที่มีความสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ เช่น ในอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์ หุ่นยนต์ที่ทำงาน Laser Cutting โดยหุ่นยนต์จะติดตั้ง อุปกรณ์ไว้ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ แล้วทำการ ควบคุมปลายแขนของหุ่นยนต์ไปยังจุดที่จะทำงาน เพื่อทำการตัดให้ได้งานตัดที่มีคุณภาพ ซึ่งจำเป็นต้องใช้หุ่นยนต์ที่มีความสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ

การที่หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำนั้น ระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์จำเป็นต้องทราบตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ ที่ถูกต้อง โดยทั่วไปแล้วหุ่นยนต์จะสามารถทราบตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ได้ ด้วยวิธี การคำนวณผ่าน Forward kinematics ซึ่งการคำนวณผ่าน Forward kinematics เป็นการโอนย้ายความสัมพันธ์ของตำแหน่งแกนกลจากการอ้างอิงเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ(Joint) ใน Joint Space มาเป็นการอ้างอิงเชิงเส้น 3 มิติแกน X ,Y, และ Z ใน Cartesian Space เพื่อบอกตำแหน่งปลายแขนกลเทียบกับฐานของหุ่นยนต์ (Base Frame) โดยค่าตัวแปรที่นำมาใช้ใน Forward kinematics ได้มาจากการคำนวณมาจากอุปกรณ์ตรวจจับที่ได้ติดตั้งไว้ที่แกนหมุนของมอเตอร์แต่ละตัว เช่น Encoder แต่ค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณผ่าน Forward kinematics นั้น มีความไม่แน่นอนหลายประการ อาทิ เช่น การเยื้องของแกนหมุน(axis misalignment), การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (inertia change) และ transmission backlash เป็นต้น

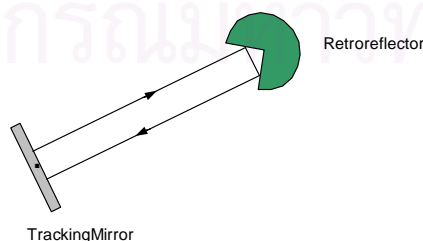
จากความไม่แน่นอนหลายประการที่ได้กล่าวมาในข้างต้น การวัดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จากการคำนวณผ่าน Forward kinematics นั้นมีความไม่แม่นยำ ทำให้เกิดแนวคิดที่จะหาเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง และสามารถวัดได้ทั้ง ตำแหน่ง, ความเร็ว, orientation และต้องไม่ไปรบกวนกับการทำงานของหุ่นยนต์ เพื่อนำเครื่องมือนั้นมาวัดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์แล้วนำค่าที่ได้ไปประมาณค่าหาตัวแปรที่ไม่ทราบ ใน kinematics model เพื่อนำไปชดเชยในการควบคุม จึงมีการเสนอแนวคิดของ ระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์ (Local-Positioning-System) หรือ LPS ขึ้นมา

การที่ LPS จะสามารถทำงานได้นั้น ต้องติดตั้ง กระจกสะท้อนมุมฉาก (Retro-reflector) ไว้ตรงตำแหน่งที่ต้องการวัดดังรูปที่ 1.1 คือเมื่อมีลำแสงเข้าวิ่งไปกระทบกับRetro-reflector ลำแสงนั้นจะ

สะท้อนออกมาในแนวขนานกับแนวลำแสงที่วิ่งเข้า ดังรูปที่ 1.2 เมื่อติดตั้ง Retro-reflector ไว้ตรงตำแหน่งที่ต้องการวัดแล้ว จากนั้นจะทำยิงลำแสงเลเซอร์ จากระบบออกเลเซอร์(Laser Head) ไปยังกระจกควบคุม(Tracking Mirror) สะท้อนเข้าไปสู่ Retro-reflector ดังรูปที่ 1.2 ขณะที่ Retro-reflector อยู่กับที่ ลำแสงเลเซอร์จะตกกระทบบที่จุดกึ่งกลางของ Retro-reflector เมื่อ Retro-reflector เคลื่อนที่ออกไปจะทำให้ลำแสงเลเซอร์เอียงศูนย์กลางออกไป เซนเซอร์วัดระยะเอียงของแสง (Photo Sensitive Diode หรือ PSD) จะอ่านค่าที่ระยะลำแสงที่เอียงออกไปแล้วส่งระยะเอียงที่ยังระบบควบคุมเพื่อปรับกระจก (Tracking Mirror) ให้บิดไป เพื่อปรับลำแสงเลเซอร์ให้วิ่งเข้าสู่จุดกึ่งกลางของ Retro-reflector จากการทำงานนี้จะทำให้ระบบสามารถติดตามเป้าหมายที่เคลื่อนที่ออกไปได้ ระบบLPSจะสามารถวัดตำแหน่งของเป้าหมายได้ โดยการวัดระยะห่างระหว่าง Tracking Mirror กับ กระจกสะท้อนมุมฉาก (Retro-reflector) แล้วนำมาคำนวณกับค่ามุมบิดของ Tracking Mirrorการวัดระยะห่างระหว่าง Tracking Mirror กับ Retro-reflector ทำได้โดยการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทาง Interferometer โดยการทำงานของ Interferometer จะทำการเปรียบเทียบ เฟสของลำแสงเลเซอร์อ้างอิง กับ ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมา คำนวณออกมาเป็นระยะทางที่ห่างออกไป



รูปที่ 1.1 การติดตั้งกระจกสะท้อนมุมฉาก(Retro-reflector)

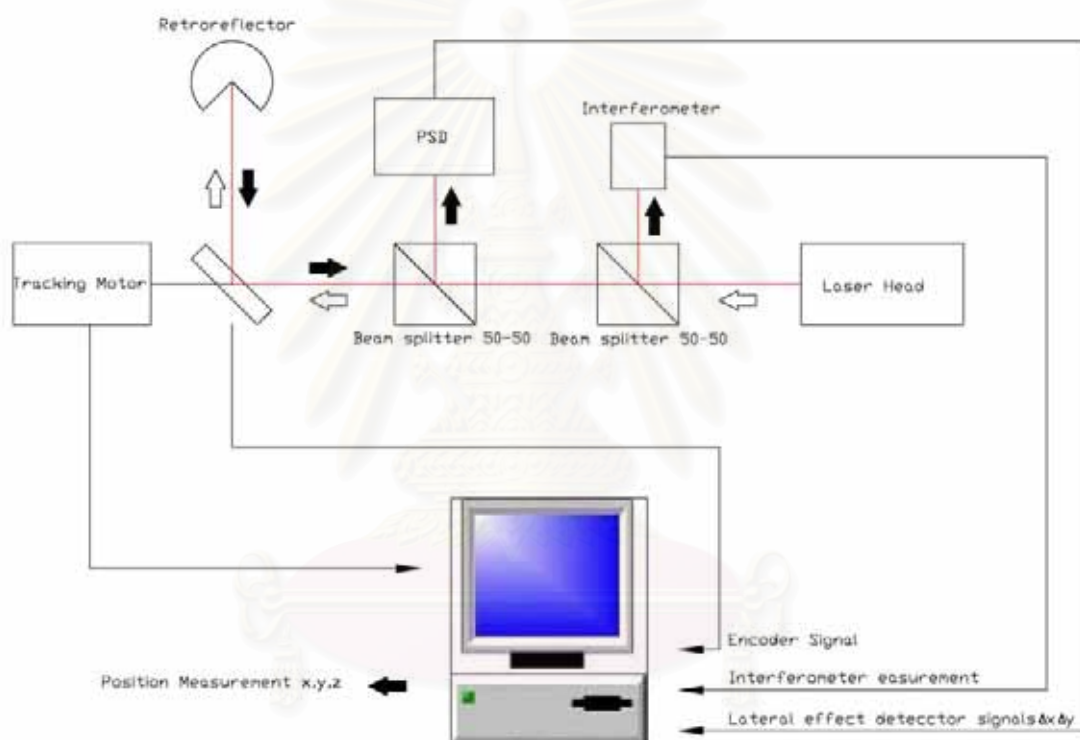


รูปที่ 1.2 แสดงการทำงานของ กระจกสะท้อนมุมฉาก (Retro-reflector)

ปัจจุบันระบบ LPS สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ แบบสถานีเดียว (Single-station) ซึ่งประกอบด้วยหัวเลเซอร์ตัวเดียว และใช้ laser interferometer หรือ Absolute Distance Meter, ADM

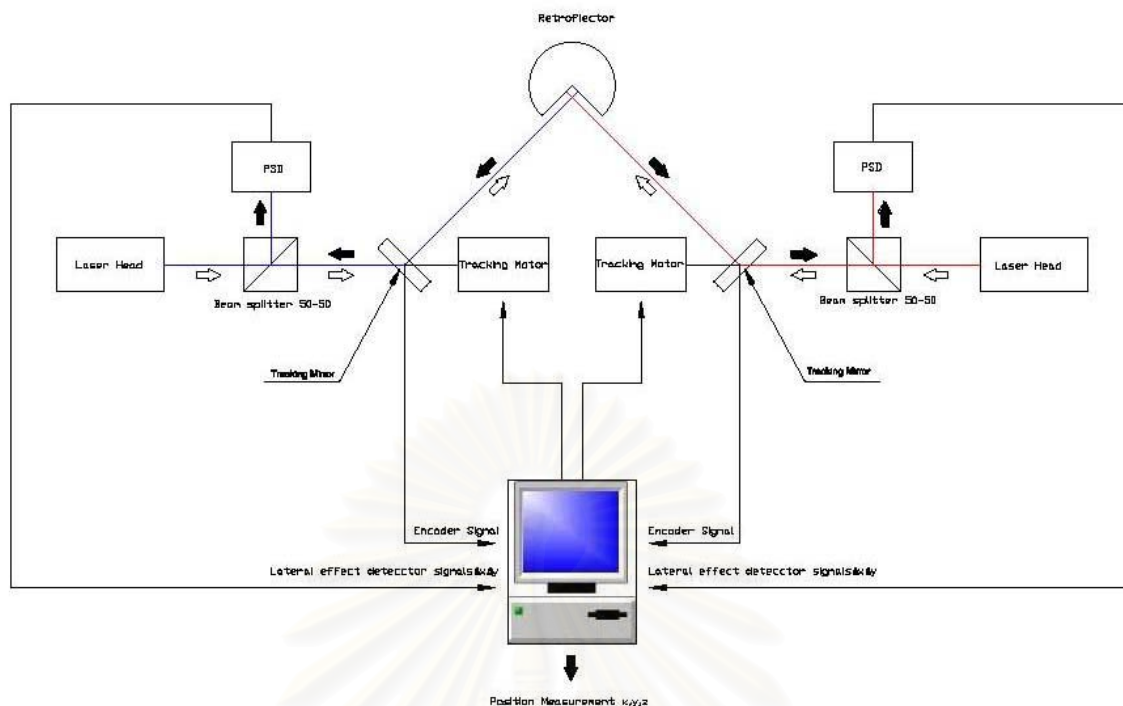
สำหรับวัดระยะห่างระหว่าง กระจกสะท้อนมุมฉาก (Retro-reflector) กับ Tracking Mirror แล้วนำค่าระยะที่วัดได้ มาคำนวณกับค่ามุมที่อ่านค่าได้จาก Tracking Mirror ได้เป็นค่าระยะทางที่วัด ดังรูปที่ 1.3

อีกระบบคือ ระบบหลายสถานี(Multi-station) จะมีTracking Mirror 2 ตัวในการทำงาน โดยจะใช้ค่ามุมที่วัดได้จาก Tracking Mirror มาคำนวณกับระยะห่างของ Tracking Mirror ทั้งสองตัว เป็นค่าระยะทางที่วัด ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.3 ระบบการทำงานของ LPS แบบสถานีเดียว (Single-Station)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.4 ระบบการทำงานของ LPS แบบหลายสถานี (Multi-Station)

ในระบบแบบสถานีเดียว(Single-station) นั้นมีการพัฒนาจนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมได้แล้ว โดยมีความสามารถในการวัดตำแหน่งมีความแม่นยำมากมีขนาดที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนย้ายและสามารถทำงานได้ในปริมาตรการทำงาน (workspace) ที่มาก เช่น การผลิตเครื่องบินโดยสารที่ต้องใช้ความแม่นยำสูงมาก ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมมีผู้ผลิตหลายราย ผลิตระบบ LPS เช่น บริษัท Leica, บริษัท FARO และบริษัท Romer เป็นต้น แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านราคาจึงทำให้มีการใช้อย่างจำกัด

การพัฒนา LPS ในปัจจุบัน จึงเน้นไปที่การลดราคาของระบบ เช่นจัดสร้าง LPS แบบหลายสถานี (Multi-station) นั้นมีราคาถูก เนื่องจากไม่ต้องใช้ Interferometer ซึ่งมีราคาแพงมาใช้ในการวัดระยะ ได้มีคณะวิจัยทำการออกแบบและสร้าง LPS แบบหลายสถานี (Multi-Station) ขึ้นมาแต่มีเป็นเพียงระบบทดสอบเบื้องต้น คือที่ระยะ 50 cm มีค่าความคลาดเคลื่อนถึง 0.2 mm [2] ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนมาก มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ Stepper ที่มีความแม่นยำต่ำ ทำให้ความแม่นยำในการควบคุมแกนหมุนมีน้อย จากปัญหานี้ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะปรับปรุงการทำงานระบบโดยทำการปรับปรุงการออกแบบระบบใหม่ โดยทำการปรับเปลี่ยนมอเตอร์ที่ขับ Tracking Mirror มาเป็นมอเตอร์แบบ Brushless โดยทำการขับมอเตอร์แบบ Direct Drive ข้อดีของการขับมอเตอร์แบบ Direct

Drive คือ การตอบสนองของระบบจะดีกว่าการขับผ่านเกียร์ทด เนื่องจากไม่มี backlash ที่เกิดจากเกียร์ทด และติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดมุม (Encoder) แบบ sine wave ซึ่งมีความละเอียดสูงถึง 524,288 pulses/revolution ทำให้ระบบนั้นสามารถควบคุมได้แม่นยำมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.ศึกษา ออกแบบและสร้างระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์ (Laser Positioning System) แบบหลายสถานี (Multi-station) เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่ง 3 มิติ ของชิ้นงาน

2.ศึกษา พัฒนาระบบควบคุมสำหรับระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์ (Laser Positioning System) แบบหลายสถานี (Multi-station) และทดสอบการทำงานเบื้องต้น พร้อมหาสมรรถนะ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.ทำการศึกษาออกแบบ พัฒนาและจัดสร้าง ระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์(Laser Positioning System) แบบหลายสถานี (Multi-station) พร้อมทั้งระบบควบคุมพร้อมทั้งวงจรอิเล็กทรอนิกส์

2.ทำการศึกษาออกแบบ พัฒนาโปรแกรมควบคุมระบบในเวลาจริง

3.ระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์(Laser Positioning System) แบบหลายสถานี (Multi-station) มีปริมาตรการทำงานของระบบ (Work space) มีขนาด 4x4x4 m

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนหลักโดยแสดงอยู่ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)					
	1 - 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12	13 - 15	16 - 18
1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง						
2. กำหนดแนวทางในการแก้ปัญหา						
3. ออกแบบและพัฒนาชุดควบคุมที่ใช้ในการทดลอง						
4. พัฒนาแนวคิดและวิธีการในการแก้ปัญหา						
5. ทดสอบ วิเคราะห์ และรวบรวมผล						
6. จัดทำวิทยานิพนธ์						

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สร้างองค์ความรู้ในการออกแบบ ระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์ (Laser Positioning System) แบบหลายสถานี (Multi-station)
2. ได้แนวคิดในการออกแบบระบบ Tracking Control ควบคุมมุมบิดของกระจก
3. ผู้วิจัยในอนาคตสามารถนำหลักการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์หรือพัฒนาต่อได้
4. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงได้หลายอย่าง เช่น การวัดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

2.1 ความสำคัญของระบบ LPS

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย หุ่นยนต์ในรูปแบบต่างๆ ได้ถูกนำมาทำงานในอุตสาหกรรมหลายด้าน เช่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต, เพื่อทำงานในที่ที่อันตรายแทนมนุษย์ และเพื่อทำงานบางประเภทที่ต้องใช้ความแม่นยำสูง

ในงานบางอย่างจำเป็นต้องใช้หุ่นยนต์ที่มีความสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ เช่น ในอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์ หุ่นยนต์ที่ทำงาน Laser Cutting โดยหุ่นยนต์จะติดตั้ง อุปกรณ์ไว้ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ แล้วทำการควบคุมปลายแขนของหุ่นยนต์ไปยังจุดที่จะทำงาน เพื่อทำการตัดให้ได้งานตัดที่มีคุณภาพ ซึ่งจำเป็นต้องใช้หุ่นยนต์ที่มีความสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ

การที่หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำนั้น ระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์จำเป็นต้องทราบตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ที่ถูกต้อง โดยทั่วไปแล้วหุ่นยนต์จะสามารถทราบตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ได้ด้วยวิธีการคำนวณผ่าน Forward kinematics ซึ่งการคำนวณผ่าน Forward kinematics เป็นการโอนย้ายความสัมพันธ์ของตำแหน่งแขนกลจากการอ้างอิงเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ (Joint) ใน Joint Space มาเป็นการอ้างอิงเชิงเส้น 3 มิติแกน X, Y, และ Z ใน Cartesian Space เพื่อบอกตำแหน่งปลายแขนกลเทียบกับฐานของหุ่นยนต์ (Base Frame) โดยค่าตัวแปรที่นำมาใช้ใน Forward kinematics ได้มาจากการคำนวณมาจากอุปกรณ์ตรวจจับที่ได้ติดตั้งไว้ที่แกนหมุนของมอเตอร์แต่ละตัว เช่น Encoder แต่ค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณผ่าน Forward kinematics นั้น มีความไม่แน่นอนหลายประการ อาทิ เช่น axis misalignment, inertia change และ transmission backlash เป็นต้น

จากความไม่แน่นอนหลายประการที่ได้กล่าวมาในข้างต้น การวัดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จากการคำนวณผ่าน Forward kinematics นั้นมีความไม่แม่นยำ ทำให้เกิดแนวคิดที่จะหาเครื่องมือที่มีความละเอียดสูง และสามารถวัดได้ทั้ง ตำแหน่ง, ความเร็ว, orientation และต้องไม่ไปรบกวนกับการทำงานของหุ่นยนต์ เพื่อนำเครื่องมือนั้นมาวัดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์แล้วนำค่าที่ได้ไปประมาณค่าหาตัวแปรที่ไม่ทราบ ใน kinematics model เพื่อนำไปชดเชยในการควบคุม จึงมีการเสนอแนวคิดของ ระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์ (Local Positioning System) หรือ LPS ขึ้นมา

2.2 ประวัติ และ สถานภาพปัจจุบัน

ระบบ LPS ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ประมาณ ปี ค.ศ. 1985 เพื่อใช้ในการเพิ่ม ความแม่นยำของระบบหุ่นยนต์ ทั้งนี้เพราะตำแหน่งปลายของแขนหุ่นยนต์นั้นได้จากการคำนวณจากเครื่องมือวัดตำแหน่ง เช่น encoder ที่แกนหมุนของมอเตอร์แต่ละตัว แต่การคำนวณนี้มีความไม่แน่นอนจากปัจจัยหลายประการ ทำให้เป็นการยากที่จะรวบรวมมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งปลายของแขนหุ่นยนต์ให้มีความถูกต้องสูง เช่น ค่า backlash ในระบบเกียร์ การเปลี่ยนรูปร่างและความยาวของแขนหุ่นยนต์ ความไม่แน่นอนเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงตลอด ขึ้นกับการรับน้ำหนัก ตำแหน่งของแต่ละชิ้นส่วน และแรงที่เกิดขึ้นจากการทำงาน(load) ระบบ LPS จึงได้ถูกคิดขึ้น โดยจะสามารถวัดตำแหน่งของปลายของแขนหุ่นยนต์ได้ โดยไม่ขึ้นกับการทำงานของหุ่นยนต์ โดยการพัฒนาระบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงวิวัฒนาการของการศึกษาระบบ LPS

Year	Research Activities
1981-3	Robotic control with joint control method and calculate the necessary joint angle rotation (PID control)
1983-4	Adaptive control method for increasing the accuracy by reducing effects of the system variations
1985	LPS research started for robot end point measurements Single station design which uses the interferometer for distance detection Multi station design which uses the triangulation method for distance calculation
1990	Applications of LPS system for industrial objects such shipping measuring and tools calibration
1991	Improving measurement accuracy of end-point orientation
1992	Investigation on usage of mirror reflectors and ultra sensitive optical encoders
1993	Usage of 3D LPS kinematics to improve (tracking) stability of the LPS
1994	3D shape measurement applications of large industrial objects
1996	Improving LSP servo system (tracking performance)

[ที่มา: รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการรูปแบบใหม่ของเทคโนโลยีการผลิตเชิงหุ่นยนต์ขั้นสูง]

ปัจจุบันระบบ LPS สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ แบบ Single-station ซึ่งประกอบด้วยหัวเลเซอร์ตัวเดียว และใช้ laser interferometer หรือ Absolute Distance Meter, ADM เพื่อวัดระยะของปลายแขนหุ่น อีกระบบคือ ระบบ multi-station จะใช้ความสัมพันธ์ทางkinematics และการคำนวณแบบ triangulation เพื่อคำนวณหาระยะทางของปลายแขนหุ่นยนต์ ในระบบแบบ single-station นั้นมีการพัฒนาจนสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมได้แล้ว โดยมีความสามารถในการวัดตำแหน่งมีความแม่นยำมาก มีขนาดที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนย้ายและสามารถทำงานได้ในปริมาตรการทำงาน (workspace) ที่มาก เช่น การผลิตเครื่องบินโดยสารที่ต้องใช้ความแม่นยำสูงมาก

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมมีผู้ผลิตหลายราย ผลิตระบบ LPS เช่น บริษัท Leica, บริษัท FARO และบริษัท Romer เป็นต้น ซึ่งก็มีลักษณะโดยรวมคล้ายกัน เพราะมีจุดประสงค์ในทิศทางเดียวกันคือ ความถูกต้องแม่นยำในการวัดตำแหน่ง เพียงแต่ต่างกันในส่วนของการออกแบบ และการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ทำอย่างไรถึงจะสามารถหาเส้นขอบของส่วนประกอบได้ ทำอย่างไรให้วัดรูปร่างผิววัตถุได้ถูกต้องและรวดเร็ว ทำอย่างไรตัว tracker ถึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อต้องการความแม่นยำสูงและใช้เวลาสั้นที่สุด แล ทำอย่างไรให้ผู้ปฏิบัติงานใช้งานได้ง่ายที่สุด อย่างเช่นบริษัท ROMER นั้นก็มีลักษณะคล้ายกันกับอีกสองบริษัท แต่นำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มระยะเวลาการทำงานของระบบวัดตำแหน่งแบบแขน (Portable Measuring Arm) [<http://links.epanorama.net/links/laser.html>] เพราะระบบแขนกลมีข้อจำกัดด้านความยาวของแขน การนำระบบLPSมาวัดตำแหน่งฐานของระบบแขนกลอีกที ทำให้สามารถเพิ่มระยะเวลาการทำงานได้ ซึ่งระบบแบบนี้มีข้อดีในแง่ของการวัดในตำแหน่งที่แสงเลเซอร์ไม่สามารถเข้าถึง เช่น สามารถวัดชิ้นงานทั้งด้านหน้าและด้านหลังในคราวเดียว

ความสามารถพื้นฐานของระบบแบบ Single-station ก็คือความสามารถในการวัดระยะทางโดยผู้ผลิตเหล่านี้โดยส่วนใหญ่จะวัดระยะทางโดยใช้ระบบ Interferometer หรือ ระบบ Absolute Distance Meter (ADM) ซึ่งทั้งสองระบบมีราคาสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบที่มีการวัดระยะทางโดยระบบ ADM จะมีราคาสูงกว่าเพราะ สามารถวัดระยะทางต่อเนื่องได้ แม้แสงเลเซอร์จะถูกบดบังไปชั่วขณะ รายละเอียดต่างๆ ของ LPS ของ LEICA และ FARO ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งรายละเอียดนี้ก็จะนำไปใช้ประกอบการกำหนดความสามารถของระบบที่กำลังจะพัฒนาขึ้น



รูปที่ 2.1 Laser Tracker LTD640

[<http://www.leica-geosystems.com>]



รูปที่ 2.2 FARO Laser Tracker XI V2

[<http://www.faro.com>]

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบ Laser Tracking ของ Leica และ FARO

Model	Leica LTD640	Faro XI
Measurement range	40 m	70m
Maximum Range		
Horizontal	360°	±270°
Vertical	±45°	+75° to-50°
Measuring and Tracking performance	3,000 point/second	10,000 sample/sec
Measure rate	1,000 point/second	N/A
Measure rate output	>4 m/s	N/A
Tracking speed lateral	>6 m/s	>4 m/s
Tracking speed radial	>2g	N/A
Acceleration lateral	Unlimited	N/A
Acceleration radian	0.14 arcsec	2 arcsec
Angular resolution	10μm+5μm/m	18μm+3μm/m
Angle accuracy	1μm	0.5μm
Distance resolution		
Laser Interferometer sensor		
Wave length	633 nm	N/A
Safety Class	21 CFR: Safety Class I : IEC/EN : class 1	N/A

การพัฒนาาระบบ LPS ในปัจจุบันนั้น จะมีส่วนหนึ่งอยู่ที่การลดราคาของระบบ เนื่องจากระบบเลเซอร์แบบ Single-station ที่ขายในท้องตลาดมีราคาสูงจึงยังไม่มีผู้นิยมนำมาใช้มากนัก วิธีหนึ่งก็คือการใช้ระบบ Multi-station ซึ่งมีโอกาสที่จะราคาต่ำกว่าเพราะไม่จำเป็นต้องใช้ระบบวัดระยะแบบ interferometer หรือ ระบบ ADM ซึ่ง พบว่าสามารถให้ค่าความแม่นยำในเวลาจริง ได้ละเอียดถึง 10^{-6} เมตร โดยค่าความละเอียดจะขึ้นกับ tracking angle rotation และ measurement beam offset (ดูการทำงานของระบบในบทต่อไป) แต่ในการวัดมุมโดยวิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ข้อแรก ถ้าแสงเลเซอร์ต้องสามารถถึงสะท้อนไปที่ตัว Retro-reflector หรือ ที่ tracking error sensor ได้ ถ้าระบบ tracking control เข้าเกินไปอาจจะทำให้ระบบ tracking ดังกล่าวตามไม่ทัน ทำให้ไม่สามารถควบคุมระบบได้ ข้อสอง การหาตำแหน่งของปลายแขนหุ่นต้อง สามารถทำได้ในเวลาจริง ดังนั้นการ tracking และ การ

คำนวณหาตำแหน่ง ต้องใช้ตัวประมวลสัญญาณแบบดิจิทัล [Gander 94] นอกจากนี้แล้วก็มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวัดค่าทางมุมบิด (orientation) ของปลายแขนหุ่น เช่น การนำระบบ vision system เช่น ใช้ CCD camera มาวิเคราะห์การตัดกันของลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนมา เพื่อหา orientation ในระบบแบบหลายสถานี (Multi-station) ก็ได้มีผู้พัฒนาขึ้น ข้อดีของระบบนี้คือจะมีราคาประหยัด เนื่องจากไม่ต้องใช้ interferometer ในการวัดระยะ แต่ระบบที่พัฒนาขึ้นมาเป็นเพียงระบบทดสอบเบื้องต้น ทำให้ผลการวัดของระบบที่ระยะ 50 cm มีค่าความผิดพลาดถึง 0.2 mm ซึ่งถือว่ามากเนื่องการใช้ Stepper มอเตอร์ในการขับเคลื่อนที่มีความละเอียดต่ำ ทำให้ต้องมีการควบคุมแบบมี zero band เพื่อจะทำให้กระบอญ่อยู่กับที่ ในกรณีนี้ ค่าoffset ที่บ่อนกลับเข้ามา มีค่าไม่มากพอที่จะหมุนกระบอญ่ไปซดเซย ซึ่งจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ใช้ช่วงที่มี zero band



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

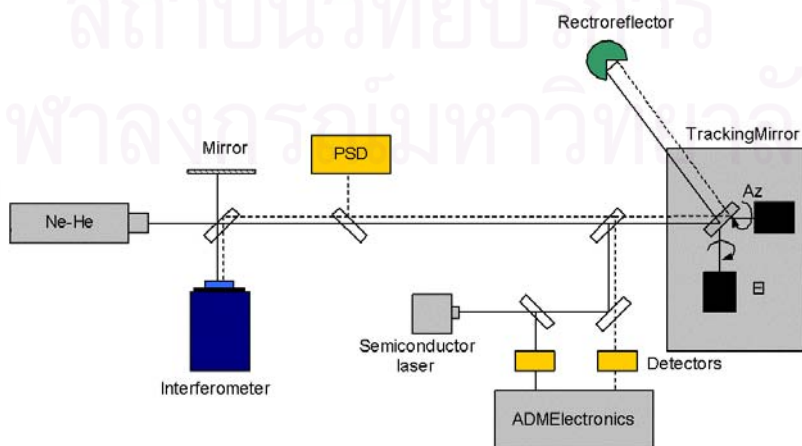
บทที่ 3

หลักการการทำงานของระบบ LPS

การทำงานของระบบ LPS จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แบบ Single Station และ แบบ Multi-Station หลักการทำงานของทั้งสองระบบ มีความคล้ายคลึงกัน แต่มีความแตกต่างกัน ตรงที่แบบ Single Station นั้นใช้ ADM (Absolute Distance Meter) หรือ Interferometer ในการวัดระยะ ส่วนแบบ Multi-station นั้น ใช้หลักการ Triangulation ในการคำนวณหาระยะ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

3.1 หลักการทำงานของระบบ LPS

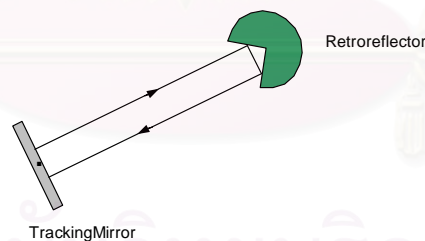
ระบบการทำงานของ LPS จะอาศัยการวัดมุมจากการบิดของระบบ tracking จำนวน 2 มุม คือ มุมในแนวนอน (Azimuth) และมุมในแนวตั้ง (Altitude) กับระยะห่างจากจุดหมุนกระจกกับตัวสะท้อน (Retro-reflector) โดยอุปกรณ์ชุด LPS จะยิงลำแสงเลเซอร์ ผ่าน Beam splitter ไปยังกระจกสะท้อน (Retro-reflector) ที่ติดกับวัตถุ และลำแสงจะสะท้อนจากกระจกสะท้อน (Retro-Reflector) กลับมาในแนวขนานกับทางเดิม ลำแสงที่สะท้อนกลับมาจะถูกแบ่งด้วย Beam Splitter ไปยังอุปกรณ์ PSD เพื่อใช้ในการวัดค่า offset ของแสงขาไปและขากลับ และ แสงอีกส่วนจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์วัดระยะ เช่น interferometer หรือ ADM (Absolute Distance Meter) เพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทางของตัว tracker กับ Retro-reflector รูปที่ 3.1 เป็นรูปของระบบนำร่องที่ใช้หัวยิงเลเซอร์แบบ He-Ne laser โดยลำแสงเลเซอร์จะถูกยิงไปกระทบ Retro-reflector ลำแสงเลเซอร์จะสะท้อนกลับมายังตัว interferometer (หรือ ตัว Absolute Distant Meter) เพื่อใช้ในการวัดระยะ จากนั้นก็นำมุมบิดของกระจก ที่วัดจากอุปกรณ์วัดมุม มาประกอบในการคำนวณตำแหน่ง (coordinate) ของ Retro-reflector ที่จะต้องนำไปติดกับวัตถุที่ต้องการจะวัดตำแหน่ง



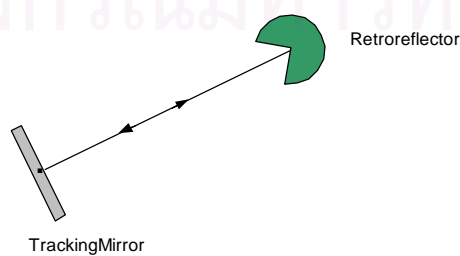
รูปที่ 3.1 ระบบวัดพิกัดตำแหน่งแบบเลเซอร์ (Local Positioning System) หรือ LPS

การวัดระยะนั้น ตัว Interferometer เป็นอุปกรณ์มาตรฐานทั่วไปในงานอุตสาหกรรม ทำงานโดยอาศัยการแทรกสอดของแสง สำหรับ interferometer แบบ Michelson ลำแสงที่ออกมาจากตัวกำหนดจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นลำแสงอ้างอิง ส่วนที่เหลือจะไปตกกระทบบัวสะท้อนแสง แล้วจึงกลับมาเพื่อรวมกับลำแสงอ้างอิง ทำให้เกิดปรากฏการณ์แทรกสอดของแสงขึ้น การนับจำนวน fringe ที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงนั้นจะถูกแปลงให้เป็นระยะทางที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเริ่มต้น(ตำแหน่งอ้างอิง)ได้ ส่วน ADM เป็นอุปกรณ์ที่ให้ค่าระยะสัมบูรณ์ และไม่ต้องมีการปรับเทียบตำแหน่งอ้างอิง แต่จะทำให้ระบบมีราคาสูงขึ้นมา

นอกจากนี้แล้วระบบก็จะต้องสามารถบังคับให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบัว Retro-reflector ตลอดเวลาได้ ถึงแม้ว่า Retro-reflector จะมีการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ข้อมูล offset ของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมา เพราะลำแสงจะสะท้อนกลับมาจาก Retro-reflector ในแนวขนานกับทางเดิม ดังในรูปที่ 3.2 โดยที่ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของ Retro-reflector ก็จะมีอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างแสงเลเซอร์ขาไป และที่สะท้อนกลับมา ซึ่งก็สามารถวัดได้จาก อุปกรณ์ PSD (Position Sensing Diode) ดังในรูปที่ 3.1 ข้อมูลป้อนกลับ (feed back) offset นี้จะใช้ในการปรับกระจกสะท้อนแสง (tracking mirror) เพื่อให้แสงเลเซอร์ตกกระทบบัว Retro-reflector ตลอดเวลา การบังคับกระจกนั้นจะต้องมีการออกแบบเป็นอย่างดี เพราะลักษณะทางพลศาสตร์ ของระบบที่จะขึ้นอยู่กับระยะระหว่าง Retro-reflector และ tracking mirror นอกจากนี้แล้ว ถ้าสามารถบังคับให้แสงที่สะท้อนกลับมามีทิศทางที่ขนานกับทิศทางของต้นกำเนิดแสงได้ เช่นในรูปที่ 3.3 ก็จะทำให้การคำนวณตำแหน่งมีความแม่นยำขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 3.2 ทางเดินเยื้องศูนย์ของแสง



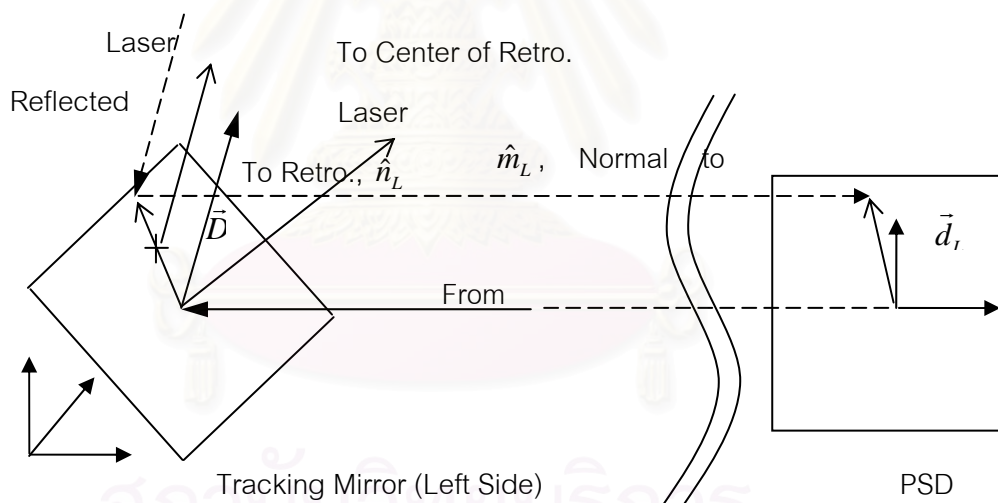
รูปที่ 3.3 ทางเดินทับกันของแสง

จากการทำงานของระบบที่กล่าวไปแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าข้อจำกัดที่สำคัญคือ การทำงานจะต้องไม่มีการขัดขวางทางเดินของแสง ซึ่งจะทำให้ระบบ Interferometer วัดระยะไม่ได้จนกว่าจะมีการ setup ใหม่

3.2 หลักการคำนวณตำแหน่ง 3 มิติ แบบ Triangulation

การคำนวณตำแหน่งจุดกึ่งกลางของ Retro-reflector นั้นสามารถทำได้โดยตรงไปตรงมาสำหรับระบบ ใน 2 มิติโดยวิธี triangulation การคำนวณนั้นง่ายเพราะว่าแสงทั้งสองจะต้องตัดกันเสมอใน 2 มิติ ในส่วนนี้เราจะแสดงการคำนวณจุดกึ่งกลางของ Retro-reflector ใน 3 มิติ ที่ลำแสงเลเซอร์จาก tracker ทั้ง 2 ด้านอาจไม่ตัดกัน เนื่องจากความผิดพลาดในการวัดมุมต่างๆของแนวแสงเลเซอร์

การคำนวณนั้นจะต้องนำเอาข้อมูลการสะท้อนกลับที่ได้จาก PSD มาคิดด้วย หลักสำคัญคือ ใน 3 มิติ นั้น จุดกึ่งกลางของ Retro-reflector จะอยู่ในแนวกึ่งกลางระหว่างลำแสงเลเซอร์ขาไปกับขากลับ แนวกึ่งกลางนี้สามารถหาได้จากแนวลำแสงเลเซอร์ขาไปโดย การคำนวณจากมุมบิดของกระจก, ตำแหน่งของกระจก และ ค่า offset จาก PSD



รูปที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆของแนวแสงในการคำนวณหาตำแหน่งของ Retro-reflector

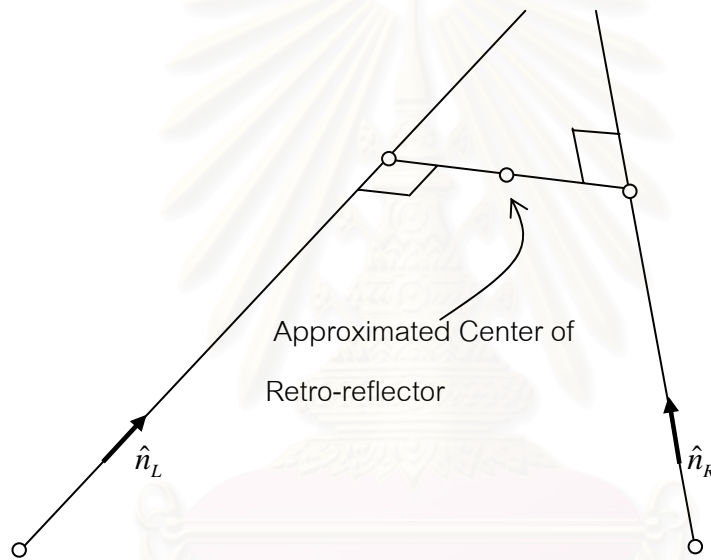
เราเริ่มการคำนวณที่กระจกข้างซ้ายดังในรูปที่ 3.4 การคำนวณนั้นเริ่มจากการหา จุด P_L และแนวเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{n}_L ซึ่ง 2 จุดนี้จะกำหนดเส้นตรงที่ผ่านจุดกึ่งกลางของ Retro-reflector แนว \hat{n}_L สามารถหาได้จากการสะท้อน ของกระจกจากมุม \hat{m}_L และแนวลำแสงเลเซอร์จากหัวเลเซอร์ (ในที่นี้เท่ากับ \hat{i}) จากการหมุนของมอเตอร์แต่ละตัวของ tracking mirror จะได้มุม \hat{m}_L จากมุมตกเท่ากับมุมสะท้อนจะ หา \hat{n}_L ได้จาก

$$\frac{(\hat{n}_L + i)}{2} = (i \cdot \hat{m}_L) \hat{m}_L \quad (3.1)$$

ส่วนจุด P_L หาได้จาก จุด M_L ที่รู้ค่า บวกกับครึ่งหนึ่งของเวกเตอร์ \vec{D}_L เวกเตอร์ \vec{D}_L นี้ก็หาได้จาก การ project vector \vec{d}_L ลงบน plane ตั้งฉากกับ เวกเตอร์ \hat{m}_L คือ

$$P_L = M_L + 0.5(\vec{d}_L - \vec{d}_L \cdot \hat{m}_L \hat{m}_L) \quad (3.2)$$

เส้นตรงที่สร้างจากจุด P_L กับ แนวเวกเตอร์ \hat{n}_L ของกระจกข้างซ้าย จะตัดกันที่จุดกึ่งกลางของ Retro-reflector กับเส้นที่สร้างจาก จุด P_R กับ แนวเวกเตอร์ \hat{n}_R ของกระจกข้างขวา ซึ่งจะนำมาคำนวณได้ แต่ในการทำงานนั้นคาดว่าทั้งสองเส้นตรงนี้จะไม่ตัดกันพอดี เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการวัด จึงจะต้องมีการหาจุดที่ใกล้ทั้งสองเส้นมากที่สุดซึ่งจะมีเพียงจุดเดียวดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆในการคำนวณหาตำแหน่งของ Retro-reflector

ซึ่งทำได้จากการแก้สมการ

$$(P_L - P_A) \cdot (P_A - P_B) = 0 \quad (3.3)$$

$$(P_R - P_B) \cdot (P_A - P_B) = 0 \quad (3.4)$$

โดยที่

$$P_A = P_L + \mu_L \hat{n}_L \quad (3.5)$$

$$P_B = P_R + \mu_R \hat{n}_R \quad (3.6)$$

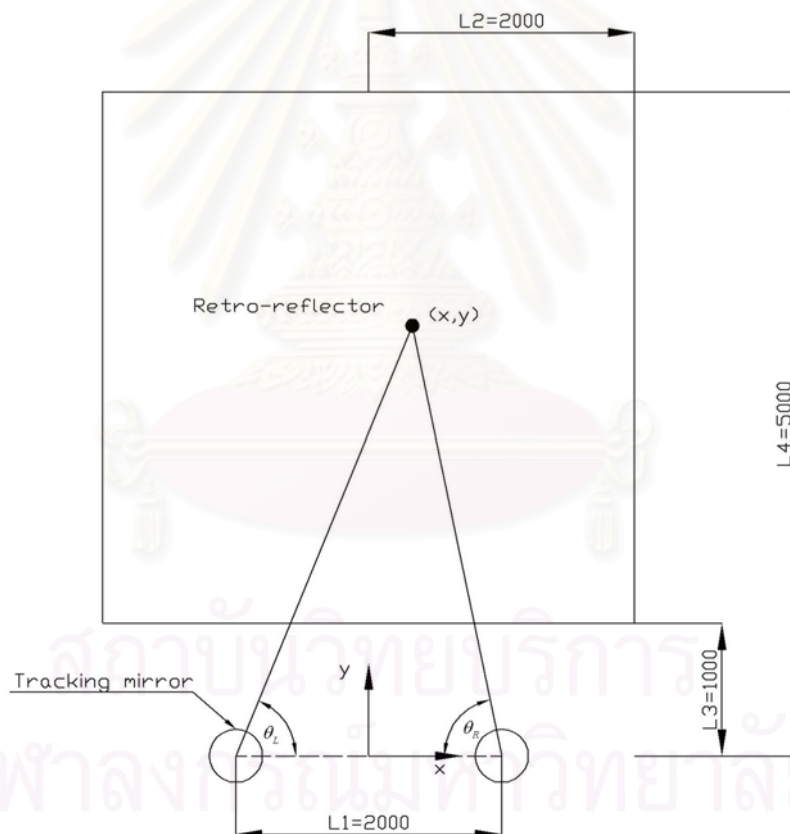
ซึ่งจะหาค่า Unknown 2 ค่าคือ μ_L และ μ_R ได้จาก 2 สมการ จากนั้นจึงนำมาคำนวณ จุดกึ่งกลางของ Retro-reflector จาก $0.5(P_A + P_B)$

3.3 หลักการประมาณค่าความผิดพลาด ของ LPS แบบ Triangulation

การหาประมาณค่าความผิดพลาด ของ LPS แบบ Triangulation นั้นจากหลักการทำงานของระบบ จะเห็นว่าความละเอียดของระบบ นั้นจะขึ้นอยู่กับ ความละเอียดของ optical encoder ที่ใช้ โดยการคำนวณอ้างอิงใช้ optical encoder ที่มีความละเอียด $2048 \times 64 \times 4 = 524,288$ pulses/rev เป็นหลัก โดยค่าความผิดพลาดเป็นการคำนวณแบบอยู่กับที่

3.3.1 ความผิดพลาด ของ x-y

ขั้นแรกเราจะคำนวณหาค่าความผิดพลาดใน ระบบแนวนอน โดยสมมติว่าไม่มีค่าความผิดพลาดในแนว แกน โดยตัวแปรที่ใช้แสดงอยู่ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนภาพและตัวแปรที่ใช้

จากรูปที่ 3.6 คำนวณหาค่า จากรูปที่ 3.6 คำนวณหาค่า θ_R และ θ_L ในรูปของ x และ y

$$\theta_R = \arctan\left(\frac{y}{\frac{L_1}{2} - x}\right) \quad (3.7)$$

$$\theta_L = \arctan\left(\frac{y}{\frac{l_1}{2} - x}\right) \quad (3.8)$$

จากสมการ 3.7 และ 3.8 หาค่า x และ y จะได้

$$l_1 = \frac{y}{\tan \theta_R} + \frac{y}{\tan \theta_L}$$

หรือ

$$y = \frac{l_1}{\frac{1}{\tan \theta_R} + \frac{1}{\tan \theta_L}} \quad (3.9)$$

$$x = \frac{l_2}{2} - \frac{y}{\tan \theta_R}$$

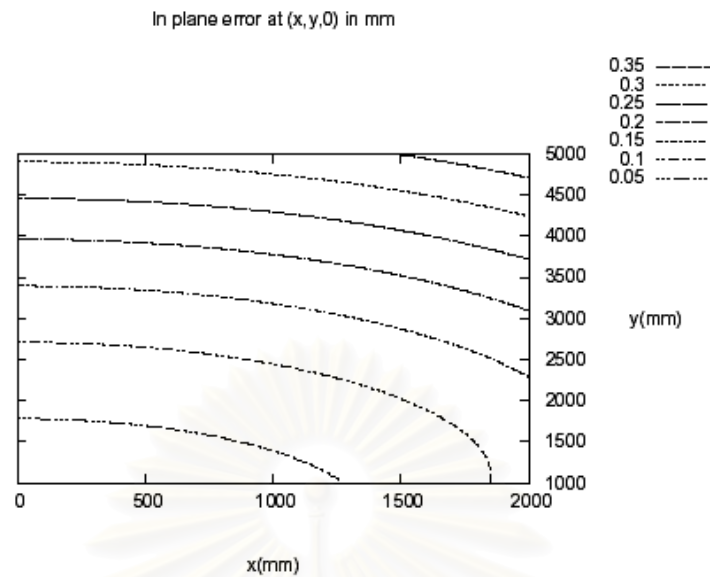
หรือ

$$x = l_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{\tan \theta_L}{\tan \theta_L + \tan \theta_R} \right) \quad (3.10)$$

จากสมการเราสามารถหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง โดยขั้นแรกให้ค่า x และ y มีค่าคงที่ แล้วคำนวณหาค่า θ_R และ θ_L จากนั้นก็คำนวณหาค่าของ x และ y อีกครั้งโดยใช้ค่า θ จากความละเอียดของ encoder โดยบันทึกค่า ค่าผลต่างของรัศมีสูงที่สุดเอาไว้

จากการใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลขให้ผลการคำนวณดังรูปที่ 3.7 แสดงถึงค่าความผิดพลาดสูงสุด ที่จุด (x,y) โดยที่ $l_1 = 2000$ mm, $l_2 = 2000$ mm, $l_3 = 1000$ mm, $l_4 = 5000$ และ ค่าความละเอียดของ encoder = $\frac{2\pi}{(2048 \times 64 \times 4 \times 2)}$ ค่าของencoder ต้องคูณด้วยสอง เนื่องจากระยะของแสงเลเซอร์เปลี่ยนทิศทางไป เป็นสองเท่าของมุมกระจกที่เปลี่ยนไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



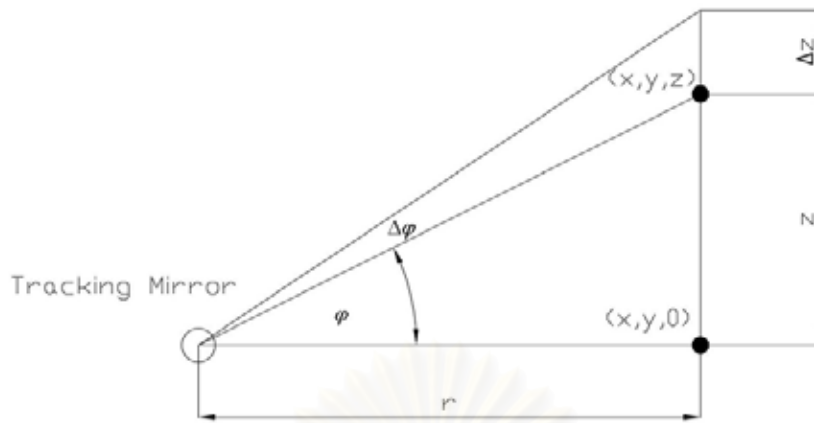
รูปที่ 3.7 ค่าความผิดพลาดสูงสุดในแนวรัศมี เมื่อ $z = 0$

3.3.2 ความผิดพลาด ในแนวแกน z

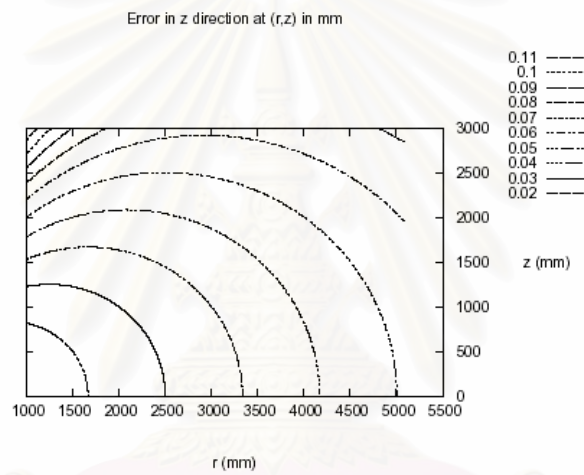
การคำนวณหาค่าความผิดพลาดในแนวแกน z เราสมมติให้ค่าความผิดพลาดในแนวแกน z เป็นอิสระกับค่าความผิดพลาดในระนาบ x-y จากสมมุติฐานนี้เราสามารถนำค่าความผิดพลาดในแนวแกน z ไปรวมกับค่าความผิดพลาดในระนาบ x-y ได้ ทำให้สามารถพิจารณาว่าค่าความผิดพลาดแปรผันกับ รัศมี r จากจุดที่ใกล้กับกระจกมากที่สุด โดยค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 แสดงในสมการต่อไปนี้

$$z = r \tan(\phi) \quad (3.11)$$

ทำซ้ำเช่นเดียวกับการหาค่าความผิดพลาดในระนาบ x-y โดยทำการเลือกค่า r ขึ้นมาแล้วคำนวณหา z , ϕ หลังจากนั้นให้ค่า ϕ เท่ากับค่าละเอียดของ encoder จะสามารถหาค่าของค่าความผิดพลาดสูงสุดในแนวแกน z ได้ โดยแสดงดังรูปที่ 3.9 จากค่าความผิดพลาดของ Encoder สามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดสูงสุดได้ประมาณ 0.72 mm ที่ตำแหน่งขอบของworkspace



รูปที่ 3.8 แผนภาพและตัวแปรที่ใช้



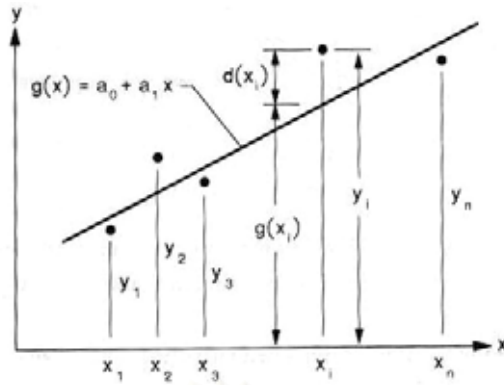
รูปที่ 3.9 ค่าความผิดพลาดในแนวแกน z

3.4 การถดถอยแบบเชิงเส้น

การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear Regression) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้สำหรับการประดิษฐ์ฟังก์ชันเส้นตรงสำหรับชุดของข้อมูลที่กำหนดมาให้รูปที่ 3.10 แสดงชุดของข้อมูลที่ประกอบด้วย $x_i, y_i, i = 1, 2, \dots, n$ นั่นคือมีจำนวนข้อมูลทั้งสิ้น n ข้อมูล ในรูปแบบสมการเส้นตรงในของฟังก์ชัน

$$g(x) = a_0 + a_1 x \tag{3.11}$$

โดย a_0 และ a_1 เป็นค่าคงที่ที่ไม่รู้ค่าและจำเป็นต้องคำนวณหาจากเงื่อนไขที่ว่า สมการเส้นตรงนี้จะก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยที่น้อยที่สุดจากข้อมูลที่กำหนดมาให้



รูปที่ 3.10 การถดถอยแบบเชิงเส้นโดยการประติษฐานฟังก์ชันเส้นตรงจากชุดข้อมูลที่กำหนดมาให้

จากรูปที่ 3.10 เราจะเห็นว่า ณ ตำแหน่ง x_i ของข้อมูลใดๆ ค่าของฟังก์ชัน $g(x)$ ที่ค่าที่แตกต่างไปจากค่าของข้อมูล y_i เท่ากับ $d(x_i)$ ที่ตำแหน่งนั้น นั้นหมายความว่า ค่าความผิดพลาด E ทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากข้อมูลทั้งหมด n ข้อมูล อาจเขียนให้อยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \tag{3.1}$$

ซึ่งในที่นี้เราทำการยกกำลังสองของค่าแตกต่าง $d(x_i)$ ก็เพื่อกำจัดค่าที่อาจมีเครื่องหมายเป็นลบ ดังสมการที่ 3.11 จะให้ความหมายของความผิดพลาดทั้งหมด สมการที่ 3.12 สามารถเขียนได้ว่า

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 \tag{3.13}$$

แทนสมการที่ 3.1 ลงไปในสมการที่ 3.3 จะได้

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2 \tag{3.14}$$

จากสมการเราสามารถหาคำนวนหาตัวแปรไม่รู้ค่า a_0 และ a_1 ที่ต้องการได้โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square) ซึ่งทำจากวิธีการหาค่าต่ำสุด (minimization) ของค่าความผิดพลาดโดยเกี่ยวข้องกับตัวไม่รู้ค่าคือ

$$\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0 \tag{3.15}$$

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0 \tag{3.16}$$

จากเงื่อนไข 3.15 ให้ผลดังนี้

$$n a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right) a_1 = \sum_{i=1}^n y_i \tag{3.17}$$

จากเงื่อนไข 3.16 ให้ผลดังนี้

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i\right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) a_1 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \tag{3.18}$$

จากทั้งสองสมการ 3.17 และ 3.18 สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

เราสามารถใช้อีกของคราเมอร์แก้ระบบสมการนี้ เพื่อหาค่าคงตัว a_0 และ a_1 ได้ดังนี้

$$a_0 = \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.20)$$

$$a_1 = \frac{n(\sum_{i=1}^n x_i y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.21)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การออกแบบ LPS เบื้องต้น

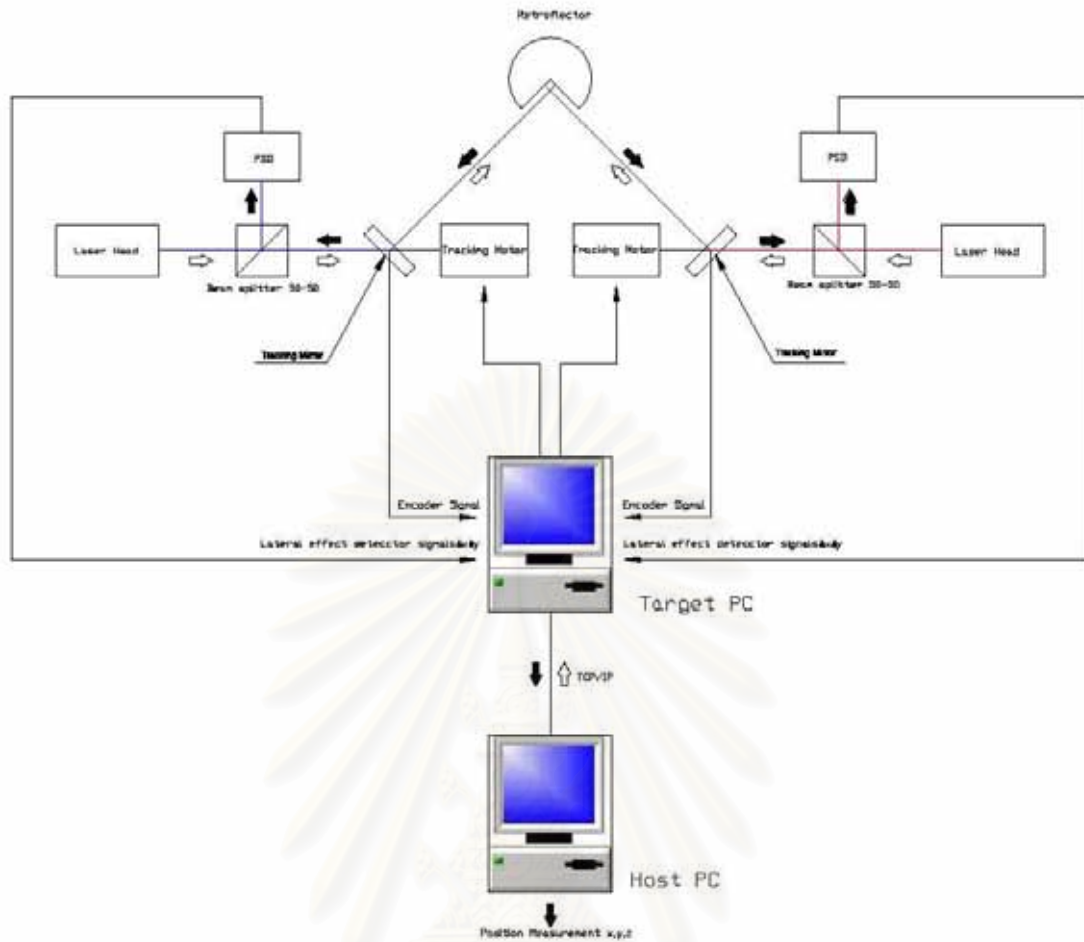
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการออกแบบเครื่องวัดตำแหน่ง LPS โดยจะกล่าวถึงการออกแบบลักษณะและโครงสร้างของ LPS รวมทั้งคุณสมบัติโดยรวมของระบบก่อน และในส่วนต่อไปกล่าวถึง หลักการทำงาน คุณสมบัติ การออกแบบ การเลือกใช้ และออกแบบการจับยึดของอุปกรณ์ด้านแสงต่างๆ

4.1 ออกแบบลักษณะโดยรวมและโครงสร้างของ LPS

เครื่องวัดตำแหน่ง LPS มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ ส่วนของอุปกรณ์ด้านแสง และส่วนของอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งอุปกรณ์ด้านแสงมีหน้าที่สะท้อนแสงเลเซอร์ผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อนำค่าที่อ่านได้มาคำนวณในชุดควบคุม โดยอุปกรณ์ด้านแสงประกอบด้วย ชุดหัวเลเซอร์ ฮีเลียม-นีออน ,ชุด Beam Splitter ,ชุด Tracker และตัว Retro-reflector ในส่วนของอุปกรณ์ด้านควบคุมประกอบด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์จำนวน 2 เครื่อง การ์ดรับส่งข้อมูลแบบ Digital/Analog Converter (DAC) การ์ดรับส่งข้อมูลแบบ Analog/Digital Converter (ADC) และการ์ดนับ Encoder ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 โดยได้วางคุณสมบัติของระบบไว้ดัง ตารางที่ 4.1

ในการออกแบบเครื่องวัดตำแหน่ง LPS นี้เป็นต้องมีการแยกชุด Tracker ออกเป็น 2 ชุดดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งในการออกแบบพื้นฐานอาศัยการค่าความละเอียด (resolution) ของชุด Laser Tracker ของ Leica รุ่น LTD 640 ที่มีค่าความละเอียด(resolution)เท่ากับ 0.14 arc second เมื่อใช้ อุปกรณ์ Interferometer แต่เนื่องจากอุปกรณ์วัดตำแหน่ง LPS ที่จะจัดสร้างนี้ จะใช้วัดตำแหน่งด้วยวิธี Triangulation ซึ่งจะทำให้ค่าความละเอียดมีค่าลดลง อีกทั้งความละเอียดของตัว Encoder มีค่าลดลงจากการออกแบบไว้เบื้องต้น เนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณที่มี ทำให้ระบบมีความละเอียดมีค่าเท่ากับ 1.2 arc second และจากการคำนวณในบทที่ 3 จะพบว่าการคำนวณตำแหน่งแบบ Triangulation จะให้ค่าผิดพลาดสูงสุดประมาณเท่ากับ 0.4 mm (resolution) ที่ระยะ 5 เมตร ที่ระยะระหว่างกระจกติดตามทั้งสองเท่ากับ 2 เมตร

การออกแบบปริมาตรการใช้งาน (Working Space) จะมีปริมาตรการทำงานขนาด 4x4x4 ลูกบาศก์-เมตร ซึ่งต้องอาศัยความเข้มของแสงเลเซอร์ที่เพียงพอ และคุณสมบัติของชุด Tracker ที่เป็นตัวกำหนดความเร็วในการ Track และการบดบังของลำแสง ซึ่งการออกแบบชุด Tracker ดังจะได้อีกต่อไป



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของระบบ LPS

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของ LPS เพื่อใช้ในการออกแบบ

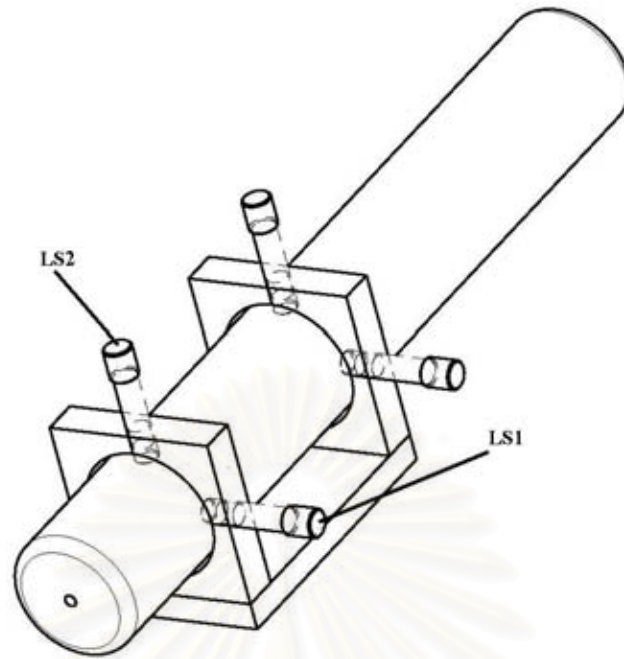
คุณสมบัติ	รายละเอียด
มิติการทำงาน (ของ Retro-reflector)	4 X4X5 ลบ. ม.
ความละเอียด (resolution)	1.2 arc second
Maximum Tracking Acceleration	2 g (at 1 meter distance)
Maximum Tracking Speed	6 m/s (at 1 meter distance)
Laser Class	IIIa
อุณหภูมิที่เหมาะสม	25°C

4.2 การเลือกอุปกรณ์

อุปกรณ์สำหรับ LPS ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับงาน Laser Tracking โดยเฉพาะ ดังนั้นคุณสมบัติของอุปกรณ์จะต้องมีคุณสมบัติพิเศษ ดังนี้

4.2.1 ชุดหัวเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน

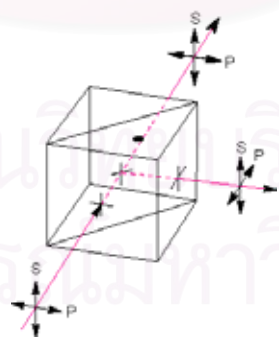
แสงเลเซอร์ที่สามารถใช้ได้นั้นจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้คือ หนึ่งจะต้องความเข้มสูงพอที่จะสร้างจุดของแสงบนอุปกรณ์ PSD (Photo Sensitive Diode) ที่มีความเข้มพอที่จะหาตำแหน่งของจุดได้แม่นยำ โดยตามข้อมูลของ อุปกรณ์ PSD พบว่าการหาตำแหน่งของแสงตกกระทบจะยิ่งถูกต้องมากถ้าแสงยังมีความเข้มสูง (จาก signal to noise ratio) แต่ก็ต้องเลือกแสงเลเซอร์ที่ความเข้มไม่สูงนัก เพื่อความปลอดภัยของบุคลากรและตัว Position Sensing Diode โดยก็ต้องคำนึงถึงด้วยว่าแสงเลเซอร์นั้นจะต้องมีการแบ่งออก 2 ครั้งโดย Beam splitter ซึ่งจะทำให้ความเข้มของแสงลดลงเหลือ 25% นอกจากนี้แล้วขนาดของลำแสงและค่าการบานของลำแสง (Divergence) ก็ต้องเลือกให้เหมาะสมกับระยะการเดินทางของแสงเลเซอร์ โดยที่ไม่ควรจะทำให้เกิดจุดของแสงใหญ่กว่าตัว PSD หรือตัว Retro-reflector มากเกินไป ซึ่งจะทำให้รบกวนการคำนวณตำแหน่งจุดวัดหรือการควบคุมกระจกสะท้อนแสงได้ ทั้งนี้เพราะแสงเลเซอร์ที่มีขนาดนั้นจะไม่สามารถทำให้เป็นแสงขนานได้ 100% และขนาดของลำแสงจะแปรผกผันกับ ค่าการบานของลำแสง (principle of optical invariant) ขนาดนั้นถ้าเล็กเกินไปก็อาจทำอันตรายต่ออุปกรณ์ต่างๆได้ และอาจจะทำให้ค่าความเข้มของแสงแปรเปลี่ยนมากจากผลของรอยต่อของกระจกบน Retro-reflector นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานในระยะเวลายาว (4-5 ชม) โดยไม่มีผลต่อความเข้มแสง แสงเลเซอร์ที่ใช้ในตัววัดตำแหน่ง LPS นี้ จะเป็นชนิด He-Ne ของบริษัท Coherent รุ่น ที่มีขนาดของกำลังเท่ากับ 2 มิลลิวัตต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำแสงมีขนาด 0.79 มิลลิเมตร และค่าการบานของลำแสง (Divergence) เท่ากับ 1 มิลลิเรเดียน สำหรับชุดจับหัวเลเซอร์จะประกอบด้วย ชุด Adjustable Laser Mount ตัว LS1 และตัว LS2 โดยตัว Laser Mount นี้จะสามารถปรับตั้งศูนย์ของหัวเลเซอร์ได้โดยการหมุนสกรูที่หัวจับ ซึ่งต้องปรับให้จุดศูนย์กลางของลำแสงพุ่งเข้ายังจุดศูนย์กลางของ Beam splitter และ กระจกสะท้อนของตัว Tracker ซึ่งชุดหัวเลเซอร์ สามารถแสดงได้ดัง รูปที่ 4.2 ชุดหัวเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน



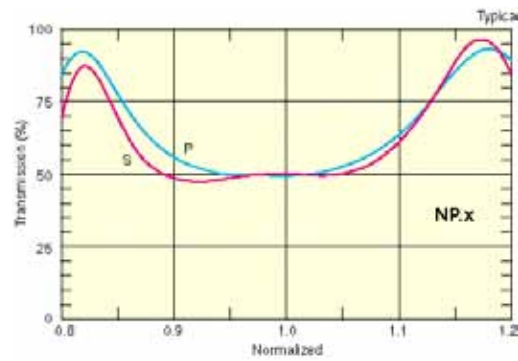
รูปที่ 4.2 ชุดหัวเลเซอร์ซีเลียม-นีออน

4.2.2 ชุด Beam splitter (BS)

การออกแบบชุด (Laser Line) Non-Polarizing Cube Beam splitter หรือ BS ต้องคำนึงถึงการยิงลำแสงให้ตั้งฉากกับผิวของตัว BS เป็นสำคัญ ซึ่งลำแสงที่ผ่านออกไปจาก BS จะเป็นแบบ Non-Polarizing Beam ซึ่งมีแนวแสงที่ตั้งฉากระนาบ S-P ดังแสดงใน รูปที่ 4.3 ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถในการส่งผ่านลำแสงดังแสดงในรูปที่ 4.4 ตามลำดับ

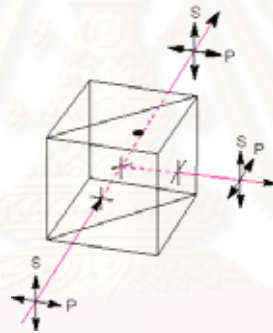


รูปที่ 4.3 การยิงแบ่งลำแสงโดยใช้ Beam splitter



รูปที่ 4.4 การยอมให้ลำแสงผ่าน Beam splitter

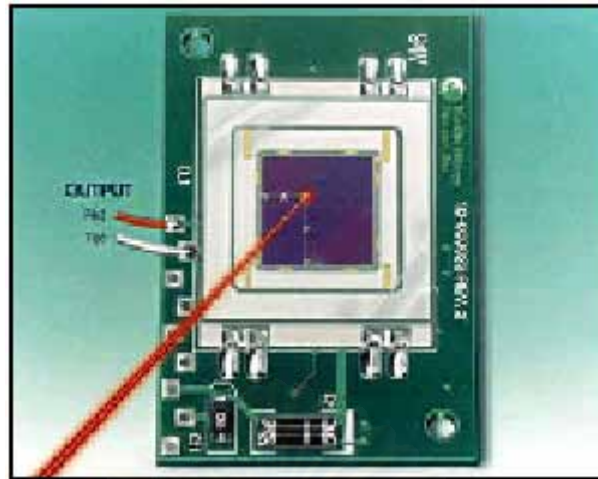
จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถ้าแนวแสงมีความตั้งฉากกับผิวของ BS ใกล้เคียงค่า 1 ซึ่งมีความฉากที่สมบูรณ์ จะทำให้แสงที่ผ่านได้มีค่าเท่ากันคือ 50-50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการออกแบบตัวจับยึดจะทำการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูง และความสูงของฐาน BS2 ถึงจุดศูนย์กลางของ BS จะต้องมีค่าเท่ากับ ศูนย์กึ่งกลางของลำแสงเลเซอร์พอดี ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การยิงลำแสงผ่านชุด Beam splitter

4.2.3 ชุด Photo Sensitive Diode

การทำงานของอุปกรณ์ Photo Sensitive Diode หรือ PSD ของบริษัท Pacific Sensor จะทำการวัดค่าของลำแสงที่เยื้องศูนย์กลางที่มาจากตัว Retro-reflector ซึ่งเราจะใช้ค่าที่วัดได้นี้ นำกลับไปสั่งให้ชุด Tracker หมุนลำแสงไปยังจุดศูนย์กลางของ Retro-reflector โดยตัว PSD มีลักษณะ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 PSD

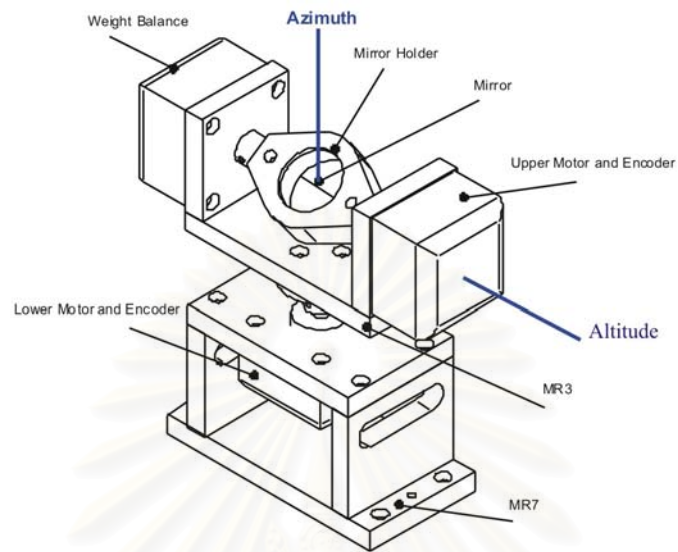
www.pacific-sensor.com

4.3 ชุด Tracker

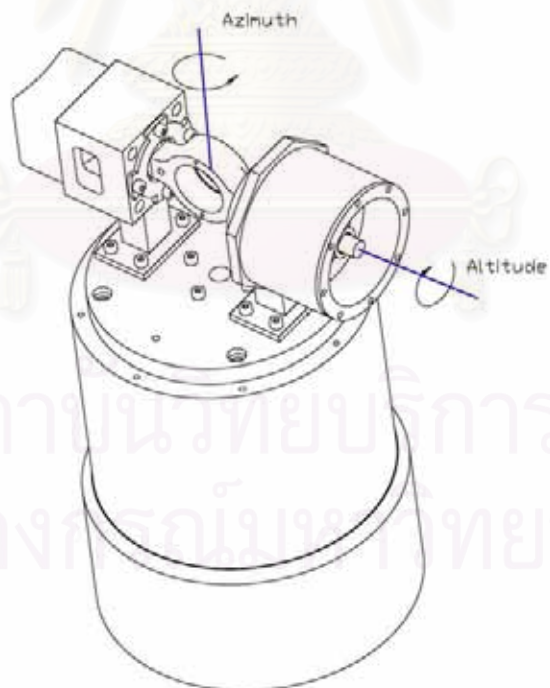
ชุด Tracker มีหน้าที่หลัก 2 อย่างคือ หนึ่ง การบังคับกระจกสะท้อนแสง (dielectric mirror) เพื่อให้แสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดสะท้อนไปยัง Retro-reflector ได้ตลอดเวลา และสองเพื่อวัดมุมบิดของกระจก ที่ใช้ในการคำนวณค่ามุมของแสงเลเซอร์ที่วิ่งไปยัง Retro-reflector เพื่อนำมาคำนวณตำแหน่งของ Retro-reflector อีกที ดังนั้นการออกแบบจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ การออกแบบระบบขับเคลื่อน และการออกแบบระบบวัด

จากการออกแบบ และเลือกอุปกรณ์ที่มีขาย พบว่า ข้อจำกัดของการออกแบบระบบ LPS แบบ triangulation นั้น จะเกิดขึ้นจากระบบวัดมุม (ที่ใช้ในการคำนวณมุมของแสงเลเซอร์) โดยที่อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูงนั้นจะมีราคาสูงมาก นอกจากนี้แล้วก็มีขนาดใหญ่ซึ่งก็จะมีผลถึงราคา และ ขนาดของระบบขับเคลื่อนด้วย จากการหาพบว่าอุปกรณ์ที่เหมาะสมคือ Encoder ของ บริษัท Heidenhain รุ่น RON ที่ความแม่นยำสูงถึง 0.2 arcsec สำหรับบางแบบ แต่เนื่องจากราคาที่สูง และขีดความสามารถของอุปกรณ์ก็อาจจะไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยสมบูรณ์ เพราะข้อจำกัดของการผลิตอุปกรณ์จับยึด และ อุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องอื่นๆ จึงได้เลือกใช้ optical encoder ที่มีราคาต่ำลงมากคือ optical encoder ของบริษัท Optical Encoder Products, Inc. รุ่น CP-300 series โดยมีจำนวน pulse แบบ sine wave เท่ากับ 2048 pulses/revolution ซึ่งจะสามารถขยายได้ถึง 524,288 pulses/revolution หรือ มี resolution เท่ากับ 2.4 arcsec ซึ่งถ้าใช้กับระบบ LPS แบบ Triangulation ที่มีระยะระหว่าง tracker ทั้งสองเท่ากับ 2 m ก็จะมีความแม่นยำน้อยที่สุด 0.72 mm ที่ระยะประมาณ 5 m

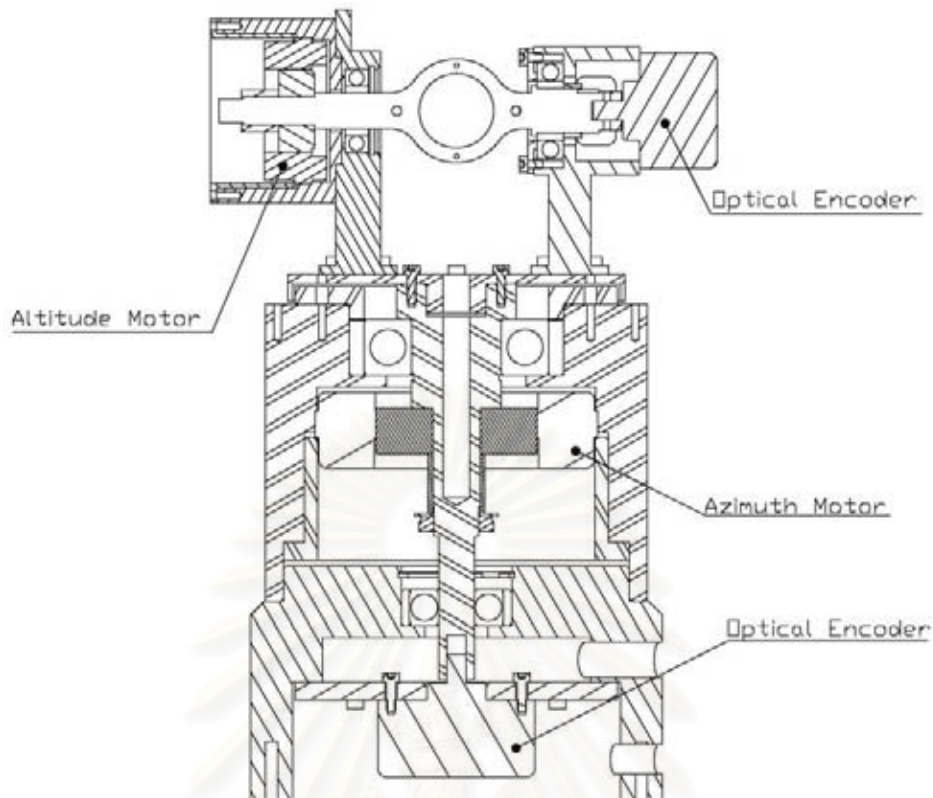
เมื่อได้เลือกอุปกรณ์แล้วก็สามารถนำมาออกแบบระบบทางกลได้ โดยชุด Tracker ประกอบด้วย มอเตอร์พร้อมตัววัดตำแหน่งมุม (Angular Encoder) จำนวน 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.8-รูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 ชุด Tracker ของ LPS 1g



รูปที่ 4.8 ชุด Tracker ของ LPS 2



รูปที่ 4.9 ภาพตัดของ ชุด Tracker ของ LPS 2

4.4 อุปกรณ์ควบคุม

การควบคุมชุด Tracker ให้สามารถสะท้อนลำแสงเลเซอร์ ไปยังตำแหน่งศูนย์กลางของตัว Retro-reflector โดยจะทำการคำนวณระยะการกระจัดเชิงศูนย์กลางที่อ่านได้จากตัว PSD และนำมาควบคุมแกนหมุนของตัว Tracker พร้อมทั้งคำนวณค่าระยะของตัว Retro-reflector ในพิกัด X-Y-Z ไปพร้อมๆ กัน ในการควบคุมอุปกรณ์วัดตำแหน่ง LPS จะทำการควบคุม และคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ xPC Target ที่ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer) จำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องแรกเรียกว่า Host computer และเครื่องที่สองเรียกว่า Target computer โดยแต่ละเครื่องมีส่วนประกอบและหน้าที่ดังนี้

-Host computer ประกอบด้วยโปรแกรมหลักคือ Microsoft OS หรือ Windows โปรแกรมภาษา Visual C++ และโปรแกรม Matlab® 7.0 เครื่อง Host computer จะมีหน้าที่พัฒนาโปรแกรมควบคุมโดยผ่านโปรแกรม xPC Target ของโปรแกรม Matlab® และยังเป็นตัวแสดงผล พร้อมทั้งเก็บค่าจากต่างๆ จากอุปกรณ์วัด (sensors) ในที่นี้คือ ค่าตำแหน่งจากอุปกรณ์วัดตำแหน่ง (Encoder) ,ค่าเบี่ยงเบนของ เลเซอร์ ที่อ่านค่าได้จาก PSD

-Target computer เป็นคอมพิวเตอร์อีกตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่ติดต่อกับการ์ดต่างๆ ซึ่งใช้ติดต่อกับมอเตอร์โดยตรงเครื่อง Target นี้ทำงานได้โดยอาศัยการทำงานบน Real-time Operating System

ของ Matlab® ซึ่งตัวเครื่องคอมพิวเตอร์ Target ต้องการอุปกรณ์หลักสำหรับการเปิด-ปิด และแสดงผล เช่น หน่วยความจำ (อย่างน้อย 8 MB) ช่องอ่านแผ่นดิสก์ หน้าจอแสดงผล และแป้นพิมพ์ ในการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (hardware) สัญญาณขาเข้า (input signal) และสัญญาณขาออก (output signal) จะถูกส่งผ่านการรับส่งข้อมูลแบบอนาล็อกและดิจิทัล ที่ติดตั้งบน PCI slots ของเครื่อง Target ส่วนการสื่อสารกันระหว่างเครื่อง Host และ Target จะถูกส่งผ่านการัด LAN หรือช่องพอร์ตอนุกรม (serial port) ของคอมพิวเตอร์ โดยแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับ LPS ประกอบด้วย Encoder card Signal input card และ Signal output card



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

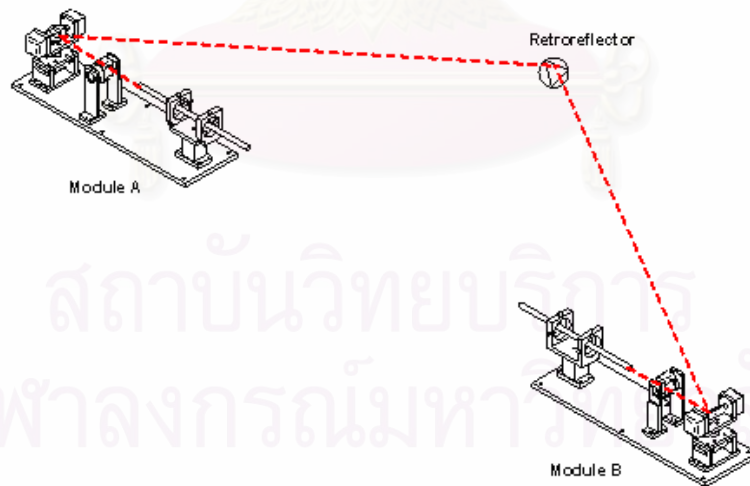
บทที่ 5

ต้นแบบ LPS 1

บทนี้จะนำเสนอผลการสร้างระบบ LPS ต้นแบบตัวที่หนึ่ง สำหรับทดสอบการทำงานเบื้องต้นของ LPS โดยจะใช้ LTS (Laser Tracker System) จำนวนหนึ่งตัวเพื่อใช้ทดสอบการทำงานเบื้องต้นของระบบ สำหรับวิธีการหาตำแหน่งของ Retro-reflector โดยใช้วิธีการคำนวณแบบ Triangulation ดังแสดงในบทที่ 3 ในบทนี้จะนำเสนอถึงภาพรวมของระบบ การตั้งศูนย์ระบบ ระบบควบคุม และผลทดสอบเบื้องต้นของระบบ เพื่อนำผลการออกแบบและทดสอบเบื้องต้นไปใช้ในการพัฒนาต้นแบบ LPS ตัวที่สอง ซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

5.1 ต้นแบบ LPS 1

ระบบต้นแบบ LPS ที่ใช้วิธีการคำนวณแบบ Triangulation นั้นจำเป็นจะต้องใช้ Laser Tracker (LTS) จำนวนสองตัวดังแสดงในรูปที่ 5.1 ในรูปที่ 5.1 ระบบ LTS ทั้งสองแสดงด้วย Module A และ B ระบบ LTS ที่ได้สร้างขึ้นนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 5.2 อุปกรณ์หลักของระบบ LTS ดังแสดงในรูปคือ Laser source, Beam Splitter, PSD, และ ระบบ Tracking Mirror โดยที่การทำงานได้อธิบายแล้วในบทที่แล้ว ระบบ Tracking Mirror นั้นรายละเอียดนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 5.3



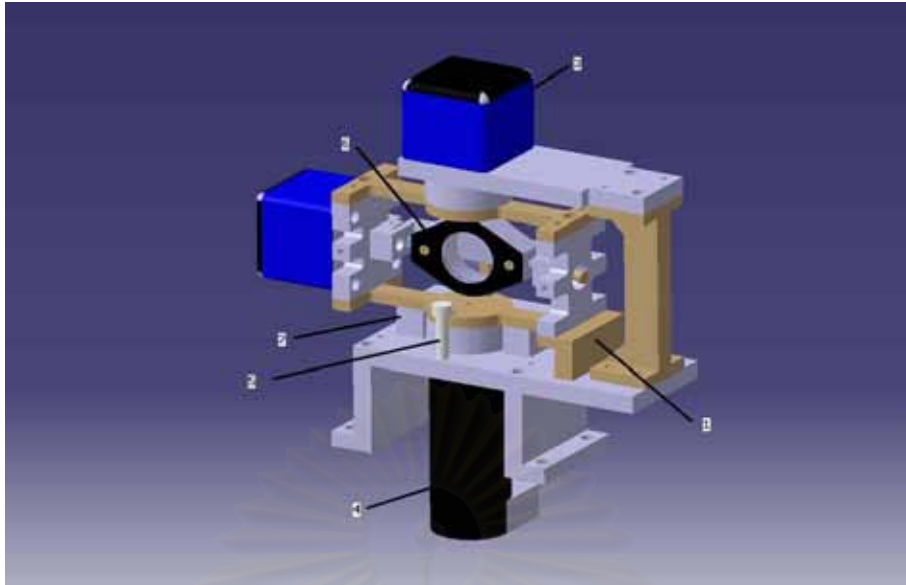
รูปที่ 5.1 หลักการทำงานของต้นแบบ LPS 1

ในรูปที่ 5.3 นี้ เลข 1 แสดงกระจกสะท้อนแสง เลข 2 แสดงมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน Maxon ขนาด 80 W รุ่น EC32 เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนชุดกระจกติดตามตำแหน่งในมุม Azimuth (แกนที่อยู่ในแนวตั้ง) เลข 3 แสดงมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน ของ Optical Encoder รุ่น CM series 300 เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนกระจกในมุม Altitude (แกนที่อยู่ในแนวนอน) เลข 4 นั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบังคับไม่ให้กระจกหมุนมากเกินไป ส่วนเลข 5 และ 6 เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ในการจัดแนวของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นให้ตรงกัน ส่วนในรูปที่ 5.4 นั้นแสดงอุปกรณ์จับยึดกระจกที่ทำขึ้นแทนอุปกรณ์ที่มาพร้อมกับกระจก โดยที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำกว่าและได้ออกแบบให้สมดุล ทั้งนี้เพื่อให้จำเป็นต้องใช้แรงบิดจากมอเตอร์ให้น้อยที่สุดในการควบคุมให้กระจกอยู่ในตำแหน่งคงที่

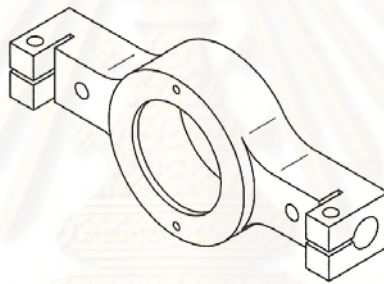


รูปที่ 5.2 ต้นแบบ ระบบ LTS ของต้นแบบ LPS 1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 Tracking Mirror System



รูปที่ 5.4 อุปกรณ์จับยึดกระจก

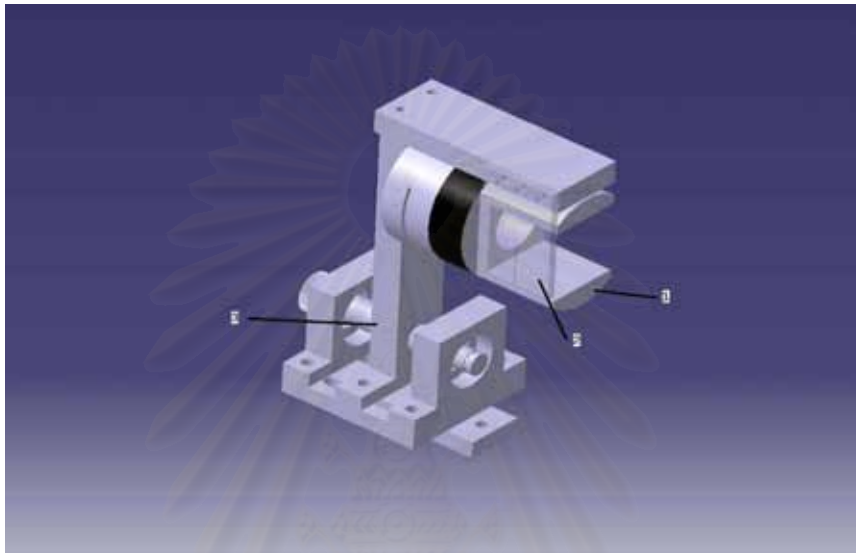
ส่วนอุปกรณ์จับยึด Beam Splitter และ PSD นั้นแสดงในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 โดยที่อุปกรณ์ทั้งสองได้ออกแบบให้สามารถปรับได้โดยใช้สกรูที่แสดงเป็นเลข 3 และ เลข 2 ในรูปที่ 5.5 และรูปที่ 5.6 ซึ่งการปรับนี้จำเป็นในการปรับแต่งแนวแสงเลเซอร์และอุปกรณ์ต่างๆให้ตรงกัน การปรับแต่งแนวแสงเลเซอร์นั้นจะสามารถทำได้ดังนี้

1. ถอดกระจกติดตามออก แล้วใส่อุปกรณ์ ขึ้นส่วนเบอร์ 1 ในรูปที่ 5.7 เพื่อให้ชุดบังคับกระจก อยู่คงที่

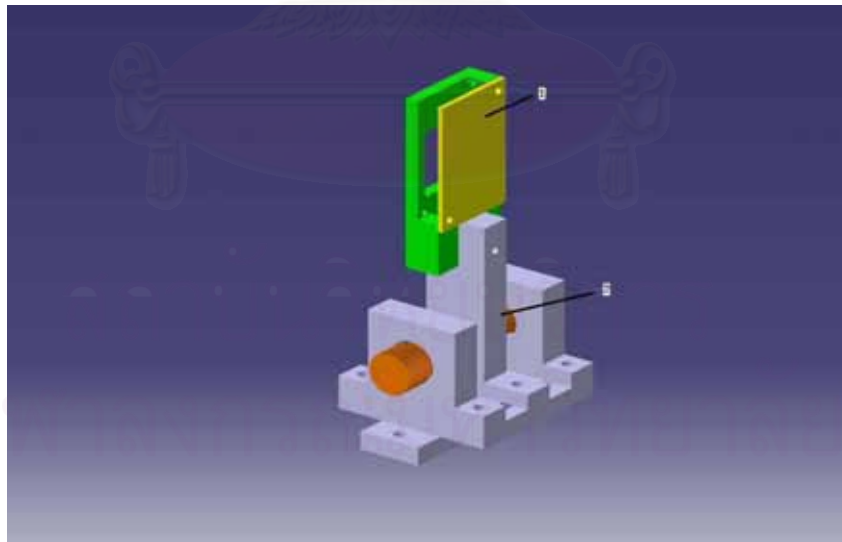
2. เปิดแสงเลเซอร์ แล้วปรับที่ตัวจับยึดแหล่งกำเนิดแสงจน แสงส่องผ่านตลอด ดังในรูปที่ 5.8 โดยใส่ชิ้นส่วนเบอร์ 2 ในรูปที่ 5.5 และปรับจนแสงที่ผ่านมีความเข้มสูงสุด ดังในรูปที่ 5.8 ชิ้นส่วนเบอร์ 2 ที่เป็นแผ่นโลหะนี้จะไม่มีการใช้ในการทำงานจริง

3.จากนั้นนำกระจกใส และ ให้แสงสะท้อนกลับแนวเดิมมากที่สุดคือปรับกระจกจนแสงที่สะท้อนกลับทับกับแสงที่ตกกระทบ โดยดูที่ด้านหลังของ Beam Splitter หรือ ที่แหล่งกำเนิดแสง ดังในรูปที่ 5.9

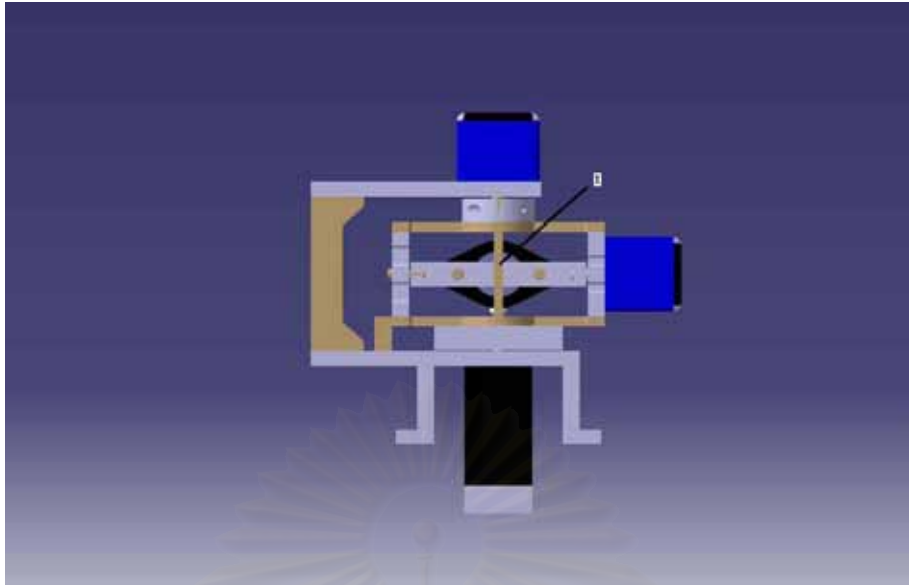
4.ปรับอุปกรณ์ PSD ให้แสงตกบน PSD กลางที่สุด โดยอ่านค่าที่ได้จาก PSD ให้ใกล้ 0 ที่สุด ถ้าไม่สามารถทำได้ ก็จดขนาดสัญญาณไว้ เพื่อใช้ในเป็นค่าชดเชยในระบบควบคุม



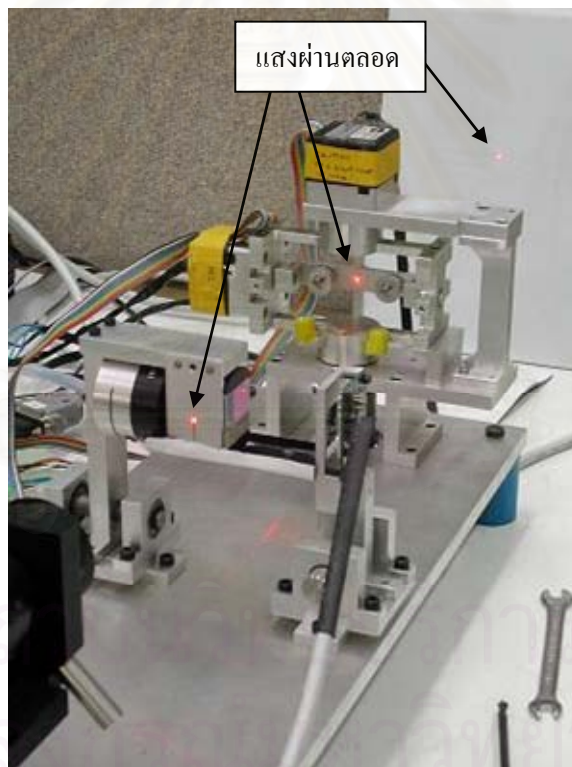
รูปที่ 5.5 ชุดจับยึด Beam Splitter ของอุปกรณ์ LTS ของต้นแบบ LPS 1



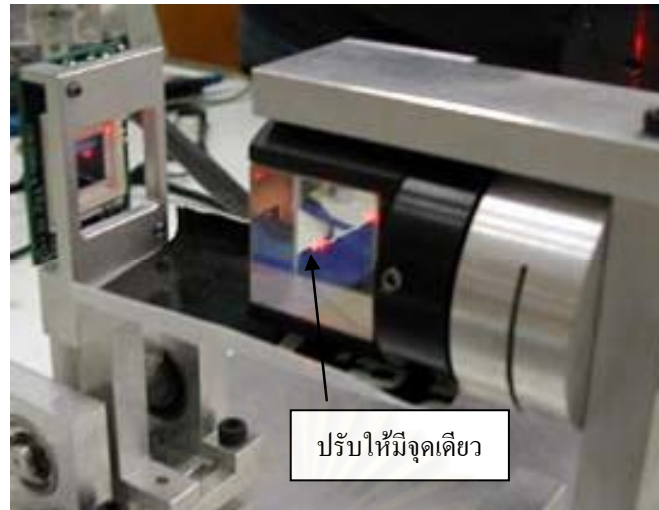
รูปที่ 5.6 ชุดจับยึด PSD ของอุปกรณ์ LTS ของต้นแบบ LPS 1



รูปที่ 5.7 ชุดบังคับกระจกติดตามของอุปกรณ์ LTS ของต้นแบบ LPS 1 (ด้านหลัง)



รูปที่ 5.8 การปรับแต่งแนวแสงเลเซอร์ขาเข้า



รูปที่ 5.9 การปรับแต่งแนวแสงเลเซอร์จากกลับ

5.2 อุปกรณ์ควบคุมของต้นแบบ LPS 1

ระบบต้นแบบ Local Positioning System แสดงดังในรูปที่ 5.10 โดยระบบประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ชิ้นคือ

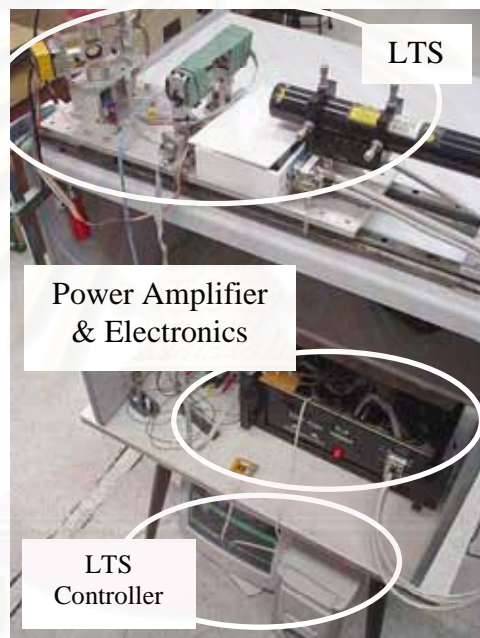
1. ชุดกระจกติดตามด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Tracking System, LTS) แสดงในส่วนที่ผ่านมา
2. ชุดวงจรควบคุมมอเตอร์ (Power Amplifier & Electronics)
3. คอมพิวเตอร์ควบคุม LTS (หรือ Target Computer)
4. คอมพิวเตอร์จัดการ (Supervisor / User interface, หรือ Host Computer, ไม่อยู่ในรูป)

ชุดกระจกติดตามด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Tracking System, LTS) นั้นได้ในส่วนที่ผ่านมา ในส่วนนี้จะอธิบายถึงอุปกรณ์อีกสามชิ้นที่เหลือ

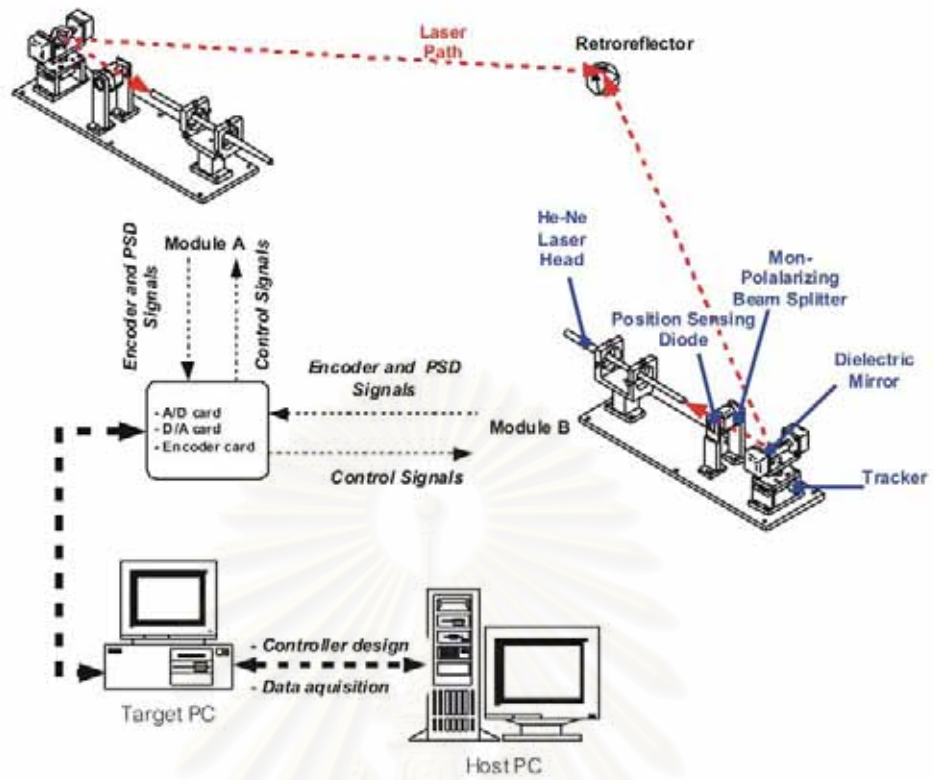
รูปที่ 5.11 แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ และระบบควบคุมที่ใช้ (รายละเอียดอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นอยู่ในภาคผนวก ก) ในรูปนั้นเส้นประแสดงระบบที่เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Software) โดยสามารถปรับได้ตามระบบควบคุมที่ใช้ โดยในการควบคุมมอเตอร์หนึ่งตัวนั้นจะมีสัญญาณต่างๆคือ ค่ามุมสำหรับควบคุมให้มอเตอร์ได้ค่ามุมที่ต้องการ และค่าความคลาดเคลื่อนของแสงเลเซอร์จาก Retro-reflector (Beam offset) ที่ใช้ในการปรับกระจกตามการเคลื่อนที่ของ Retro-reflector ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ใช้อ่านค่า PSD ผ่านทางการ์ด PCI-9112 ส่วนค่ามุมนั้นใช้อ่านค่าผ่าน Encoder card (PCI-8133) และ PCI-9112 Encoder card นั้นใช้สัญญาณ A/B แบบ square wave ซึ่งจำเป็นจะต้องสร้างขึ้นจากวงจร Comparator ที่จัดทำขึ้น แต่สัญญาณนี้ใช้ได้แค่ความละเอียดเท่ากับสี่เท่าของลูกคลื่นต่อรอบของ Encoder (2048x4) เท่านั้น การที่จะวัดค่ามุมให้ได้ละเอียดขึ้นจะต้องใช้ค่าของสัญญาณแบบ Sine wave โดยการอ่านค่า A/B จาก A/D card (PCI-9112) การใช้งานจะต้องนำข้อมูลทั้งสองมารวมกันโดยโปรแกรม (Summing Algorithm) การใช้ค่าจาก A/D เพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถทำได้ที่มีความเร็วสูง และการบวกค่าทั้งสองโดยตรงก็ไม่สามารถทำได้เพราะค่าศูนย์นั้นไม่ตรงกันจากการใช้

วงจร Comparator รายละเอียดต่าง ๆ นั้นแสดงอยู่ใน ภาคผนวก ค เมื่อได้ค่าต่างๆแล้วก็สามารถประมวลผลโดยใช้ระบบควบคุม (Control law) แล้วส่งไปควบคุมมอเตอร์

การส่งสัญญาณไปควบคุมมอเตอร์นั้นจะส่งผ่าน D/A card (PCI-9112) ไปยัง Power Amplifier (Maxon Des 50/5) โดยการควบคุมมอเตอร์จาก Amplifier นี้เป็นแบบ Current mode (Torque mode) ทำให้การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์นั้นง่ายขึ้น มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ Brushless ดังนั้นการควบคุมต้องใช้ข้อมูลตำแหน่งของ Rotor ของมอเตอร์ด้วย Amplifier นี้ใช้สัญญาณ A/B แบบ square wave ซึ่งจำเป็นจะต้องสร้างขึ้นจากวงจร Comparator ที่จัดทำขึ้น วงจรนี้ตัว Amplifier และอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า (Power Supply) นั้นได้จัดสร้างขึ้นรวมกันเป็นกล่องวงจรดังแสดงในรูปที่ 5.12 อุปกรณ์ทั้งสองนี้แสดงเป็นเส้นทึบในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.10 ส่วนควบคุมของระบบติดตาม ต้นแบบ LPS 1



รูปที่ 5.11 ระบบต่างๆที่ใช้สำหรับควบคุม ต้นแบบ LPS 1



รูปที่ 5.12 กล่องระบบไฟฟ้าของอุปกรณ์ LTS (สำหรับ LTS หนึ่งชุด)

บทที่ 6

ระบบควบคุมและการทดสอบ ต้นแบบ LPS 1

ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบระบบควบคุมของต้นแบบ LPS ตัวที่หนึ่ง และการทดสอบระบบ ความสามารถในการติดตามของระบบ และความสามารถในการวัด ซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

6.1 ระบบควบคุมสำหรับ LTS ของต้นแบบ LPS 1

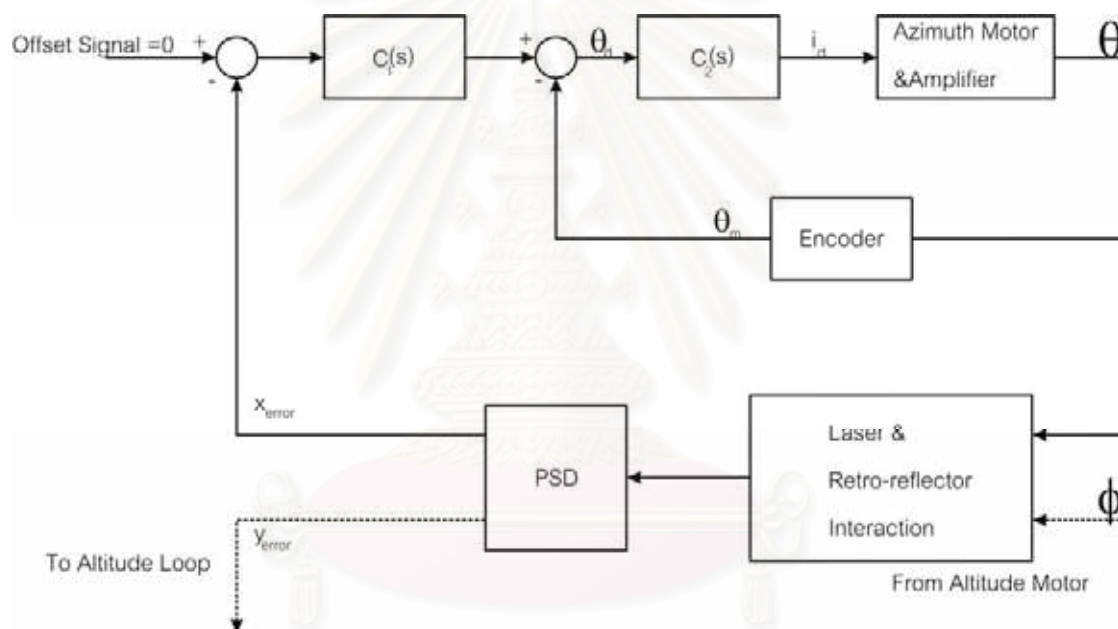
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ความสามารถในการทำงานหลักของระบบ LTS คือการติดตาม Retro-reflector ในส่วนนี้จะแสดงระบบการควบคุมที่ได้พัฒนาและทดสอบจริง จนสามารถทำการติดตาม Retro-reflector ได้

ในขั้นแรกนั้นผู้วิจัยได้นำเอาระบบควบคุมแบบลูปเดียวมาใช้ ระบบแบบลูปเดียวนี้ใช้สัญญาณป้อนกลับที่เป็นค่าคลาดเคลื่อนของแสงจากจุดกึ่งกลาง Retro-reflector (beam offset) มาใช้ในการควบคุมเพียงอย่างเดียว แต่จากการทดลองปรับแต่งเป็นเวลานาน ยังไม่พบว่าระบบจะสามารถทำการติดตามได้ดี ซึ่งจากการที่สังเกต ผู้วิจัยพบว่าการใช้ค่าสัญญาณ PSD เพียงอย่างเดียวในการป้อนกลับนั้นอาจไม่เหมาะสมในกรณีนี้ โดยผู้วิจัยพบว่าเมื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม (PD) ที่ทำให้ระบบเสถียรเมื่อ Retro-reflector อยู่หนึ่งนั้น กระจกติดตามนั้นมีแรงต้านสัญญาณรบกวนน้อยมาก ถ้าผู้วิจัยลองเอามือแตะที่กระจกจะพบว่าแรงต้านจากระบบควบคุมที่จะพยายามทำให้กระจกอยู่นั้นมีน้อยมาก ซึ่งน่าจะเป็นเพราะค่าเกนที่ต่ำของตัวควบคุม PD ซึ่งต้องมีค่าต่ำเพราะระบบมีค่าเกนที่สูงอยู่ในลูปการทำงานของระบบป้อนกลับแล้วคือ เกนจากมุมบิดของกระจกติดตาม (มุมของมอเตอร์ติดตาม) ไปที่ระยะผิดพลาดของลำแสงจากจุดกึ่งกลางของ Retro-reflector ซึ่งวัดจากอุปกรณ์ PSD ทั้งนี้เพราะการบิดกระจกเพียงเล็กน้อยแต่เมื่อมีผลของระยะระหว่างกระจกติดตามไปยัง Retro-reflector เข้ามาอีก ก็ทำให้มีผลระยะผิดพลาดมากได้ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้งานจะพบว่าแรงบิดที่มอเตอร์จะน้อยมาก จนทำให้สัญญาณรบกวนเช่น แรงเสียดทาน หรือ แรงที่เกิดจากความผิดพลาดในการผลิต มีผลต่อการควบคุมมาก

เนื่องจากการทดสอบระบบควบคุมที่ใช้สัญญาณ PSD เพียงอย่างเดียวนั้นได้ผลไม่เป็นที่พอใจ ทางคณะผู้วิจัยได้พัฒนาระบบควบคุมที่ใช้สัญญาณมุมของกระจกเข้าร่วมด้วย โดยได้จัดระบบควบคุมในแต่ละแกนออกเป็นลูปป้อนกลับซ้อนกันสองลูป คือลูปในเป็นลูปป้อนกลับของมุมของมอเตอร์ และ ลูปนอกเป็นลูปของการป้อนกลับด้วยสัญญาณจาก PSD ดังในรูปที่ 6.1 โดยในรูปนี้แสดงระบบการทำงานของระบบควบคุมในแนวแกน Azimuth (ค่ามุม θ)

ใน รูปที่ 6.1 นี้สิ่งที่ต้องการคือ ต้องการให้ค่าความผิดพลาดของแสงจากกึ่งกลางของ Retro-reflector ที่วัดจากอุปกรณ์ PSD เป็นค่า x_{error} และ y_{error} มีค่าเป็นศูนย์ โดยการปรับแต่งใช้สัญญาณ

กระแสไฟฟ้าที่ต้องการ (i_d) ที่ให้กับอุปกรณ์ขยายกำลัง (Power Amplifier) ทั้งของมอเตอร์ Azimuth และ มอเตอร์ Altitude ที่อุปกรณ์ขยายกำลังนี้ จะมีวงจรถบคุมกระแสไฟฟ้าที่มีแถบกว้างความถี่ (bandwidth) ประมาณ 1k Hz โดยการส่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการนั้น จะส่งที่ความถี่ 0.5 msec (sampling time) ในรูปไบนารีเป็นรูปที่ใช้สัญญาณมุมของมอเตอร์ในการป้อนกลับ โดยใช้อุปกรณ์วัดมุม Encoder ในการอ่านค่า (ที่ความถี่ 0.5 msec เช่นกัน) รูปนี้มีสัญญาณอ้างอิงคือค่ามุมที่ต้องการที่จะส่งมาจากรูปนอกอีกทีหนึ่ง ในรูปในนี้สัญญาณอ้างอิง θ_d จะถูกนำมาลบจากสัญญาณมุมที่วัดได้ (θ_m) แล้วนำไปเป็นสัญญาณเข้าให้แก่ตัวควบคุมแบบ PD ส่วนในรูปนอกนั้นเป็นรูปของการป้อนกลับด้วยสัญญาณจากอุปกรณ์ PSD ค่าที่ได้จาก PSD นี้นำมาใช้ในเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมแบบ PID จะทำการคำนวณออกมาเป็นสัญญาณมุมที่ต้องการ θ



รูปที่ 6.1 ระบบควบคุมแบบสองลูป ของชุดควบคุมกระจกในแนว Azimuth

6.2 การปรับแต่งระบบควบคุม LTS ของต้นแบบ LPS1

ในการเลือกใช้ระบบควบคุมสำหรับ $C_1(s)$ และ $C_2(s)$ ดังในรูปที่ 6.1 นั้นใช้การทดลองปรับแต่งโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID แบบต่างๆ โดยการทดลองปรับแต่งนั้น ใช้วิธีปรับ ลูปในก่อนให้ได้ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ (มุมที่ต้องการ, θ_d) เป็นที่น่าพอใจแล้วจึงปรับลูปนอกบ้าง (ผลตอบสนองต่อค่า offset ที่ต้องการ)

6.2.1 ผลการปรับระบบควบคุมแบบควบคุมมุม (ลูบใน)

การปรับเริ่มที่การปรับในลูบในก่อน ลูบในเป็นลูบที่ใช้ควบคุมมุมของกระจกให้ได้มุมที่ต้องการ ในลูบนี้ระบบควบคุมที่เหมาะสมคือแบบ PD (Proportional and Derivative Controller) โดยค่าที่ได้เป็นค่าแรงบิดที่ต้องการที่มอเตอร์ เพื่อส่งให้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ต่อไป (motor controller and power amplifier) ในการทดลองได้ทำการปรับค่า proportional และ derivative เกินจนได้ค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ของค่ามุมที่ต้องการที่พอใจ โดยผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศา ของแกน Azimuth แสดงในรูปที่ 6.2 และรูปที่ 6.3 ของแกน Altitude แสดงดังในรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 โดยรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.5 เป็นภาพขยายของรูปที่ 6.2 และรูปที่ 6.4 ในทั้งสองรูปนี้เส้นทึบแสดงค่ามุมที่วัดได้โดยใช้สัญญาณ sine wave ของ encoder เข้าร่วมในการคำนวณตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ และจุดกากบาทแสดงค่าที่วัดได้โดยใช้สัญญาณ square wave (ที่ใช้วงจรไฟฟ้าสร้างจากสัญญาณ sine wave อีกที) ค่าที่ได้นี้วัดที่ความถี่ 1 msec.

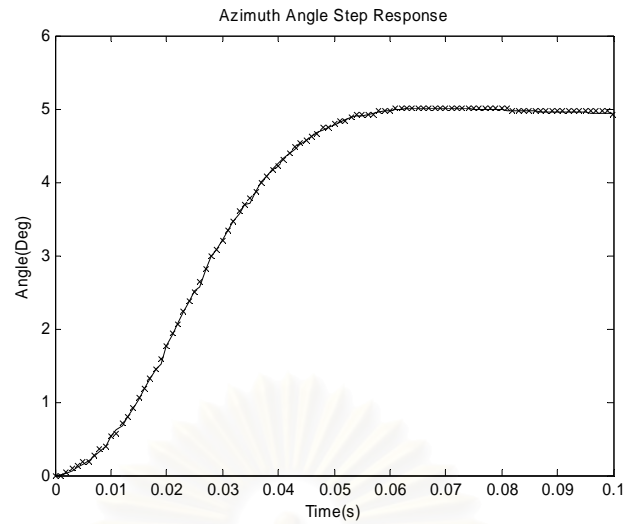
ลักษณะของการตอบสนองของระบบได้คือ

1. ลูบตำแหน่งมุม Azimuth: settling time (t_s) = 0.12 sec, rise time (t_r) = 0.035 sec, % overshoot = 0% และ ค่า steady-state error < 0.1°
2. ลูบตำแหน่งมุม Altitude: settling time (t_s) = 0.04 sec, rise time (t_r) = 0.011 sec % overshoot = 0% และค่า steady-state error = 0.1°

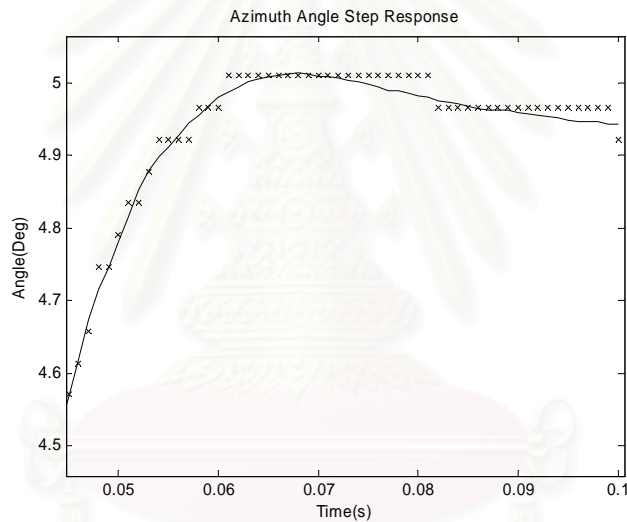
ระบบควบคุมแบบ PD ที่ใช้อยู่ในรูป

$$T = K_p (\theta_d - \theta) + K_d D(z) (\theta_d - \theta)$$

เมื่อ T คือค่าแรงบิดที่ต้องการ, K_p คือค่า proportional gain, θ_d คือค่ามุมที่ต้องการ, θ คือค่ามุมที่วัดได้, K_d คือค่า Derivative gain, $D(z)$ เป็น ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการประมาณการหาค่าอนุพันธ์ของสัญญาณในระบบแบบ digital ค่าที่ใช้ใน Azimuth PD Controller คือ $K_p = 500$, $K_d = 10$, $D(z) = (800z - 800)/(z - 0.6)$ และ ค่าที่ใช้ใน Altitude PD Controller คือ $K_p = 200$, $K_d = 1$, $D(z) = (1333z - 1333)/(z - 0.333)$ (sampling time = 0.5 msec)

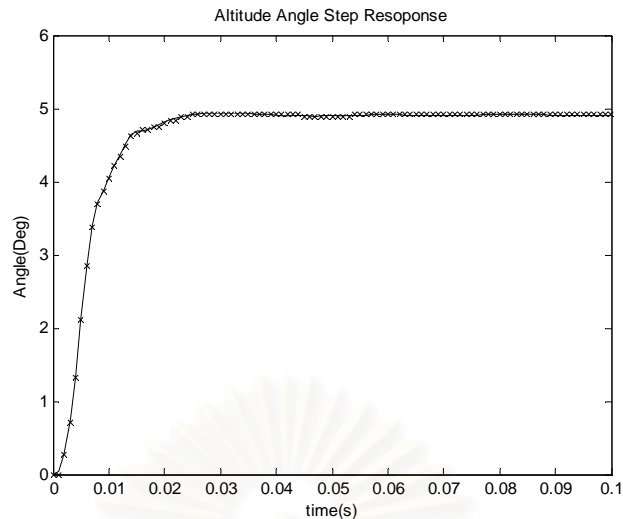


รูปที่ 6.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth

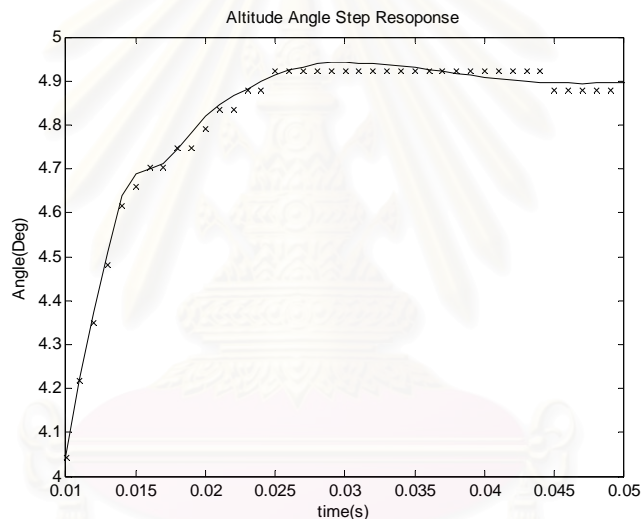


รูปที่ 6.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth (รูปขยายของรูปที่ 6.2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



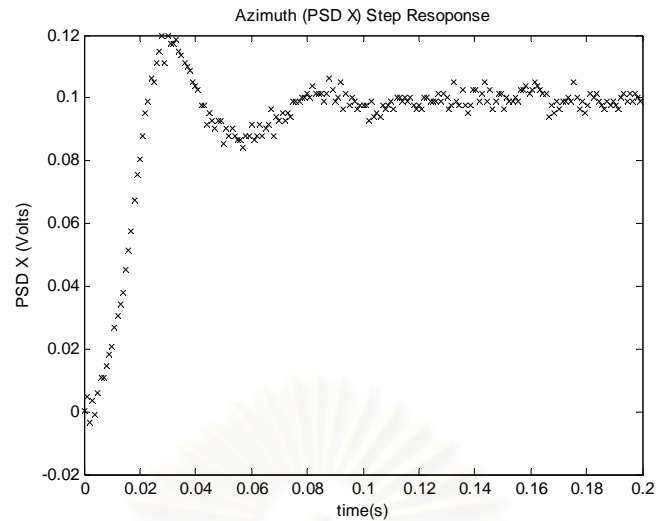
รูปที่ 6.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude



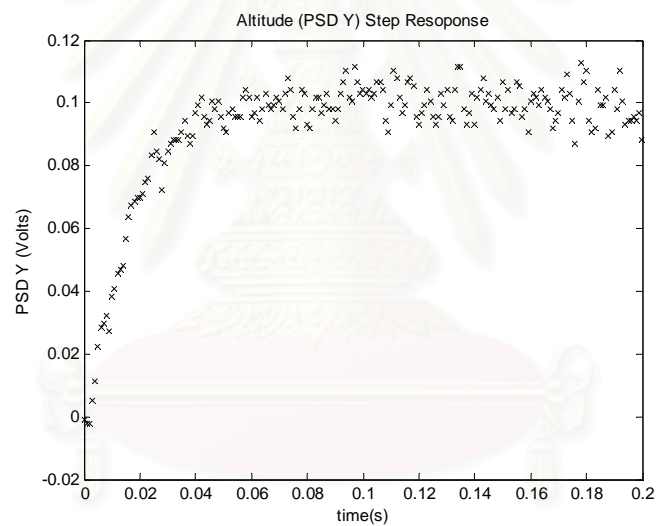
รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude (รูปขยายของรูปที่ 6.4)

6.2.2 ผลการปรับระบบควบคุมลูปควบคุมตำแหน่งแสงบน PSD (ลูปนอก)

ในส่วนนี้เป็นการปรับแต่งลูปนอกต่อจากในส่วนที่แล้ว โดยการปรับนี้จัดวาง Retro-reflector ที่ระยะ ประมาณ 25cm และจัดวางให้ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมาจาก Retro-reflector ตกอยู่ที่กึ่งกลาง PSD พอดี (อ่านค่าตำแหน่งตกได้ 0 Volts) จากนั้นให้สัญญาณตำแหน่งตกกระทบที่ต้องการเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.1 โวลต์ หรือเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ไปของ Retro-reflector เป็นระยะประมาณ 0.25 mm รูปที่ 6.6 และ รูปที่ 6.7 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการ ของแกน Azimuth และ ของแกน Altitude ตามลำดับ



รูปที่ 6.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่
ต้องการ ของแกน Azimuth



รูปที่ 6.7 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่
ต้องการ ของแกน Altitude

จากการปรับค่าพารามิเตอร์ระบบควบคุมที่เหมาะสมคือแบบ PI (Proportional and Integral) โดย
จากการปรับได้ลักษณะของการตอบสนองของระบบคือ

1. ลูบตำแหน่งมุม Azimuth: settling time (t_s) = 0.1 sec, rise time (t_r) = 0.014 sec, % overshoot = 20% และ ค่า steady-state error = 0 volts
2. ลูบตำแหน่งมุม Altitude: settling time (t_s) = 0.06 sec, rise time (t_r) = 0.03 sec % overshoot = 0% และค่า steady-state error = 0 volts

ระบบควบคุมแบบ PI ที่ใช้อยู่ในรูป

$$T = K_p (\Theta_d - \Theta) + K_i D(z) (\Theta_d - \Theta)$$

เมื่อ T คือค่าแรงบิดที่ต้องการ, K_p คือค่า proportional gain, Θ_d คือค่ามุมที่ต้องการ, Θ คือค่ามุมที่วัดได้, K_i คือค่า Derivative gain, $D(z) = 1/(z-1)$ เป็น ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการอินทิเกรตในระบบแบบ digital ค่าที่ใช้ใน Azimuth PI Controller คือ $K_p = 0.1$, $K_i = 50$ และ ค่าที่ใช้ใน Altitude PI Controller คือ $K_p = 0.1$, $K_i = 50$

6.3 ความสามารถในการติดตาม Retro-reflector

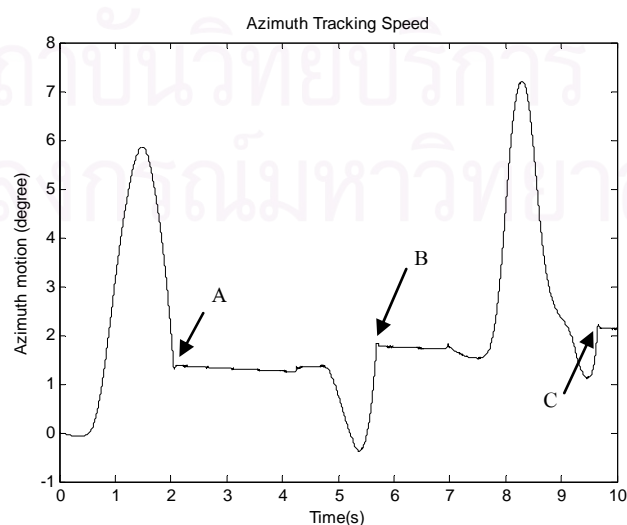
ในส่วนนี้แบ่งเป็น 3 ส่วนย่อย โดยสองส่วนแรกเป็นการวัดความเร็วในทีละแกนคือ แกน Azimuth และ Altitude ซึ่งทำการวัดที่ระยะ 1 เมตร, ที่ระยะ 5.8 เมตร และในส่วนที่สามเป็นการแสดงความสามารถของ LTS ในการติดตาม Retro-reflector ทั้งสองแกนพร้อมๆกัน

6.3.1 ความเร็วในการติดตามที่ระยะ 1 m

ในส่วนนี้แสดงการติดตาม Retro-reflector ที่ระยะ 1 m โดยที่ค่ามุม Azimuth มีค่าประมาณ 45 องศา, และมุม Altitude ประมาณ 10 องศา โดยในการทดสอบนี้ ค่าเกินได้ลดลง 2 เท่า (คูณด้วย 0.5)

ก. ความเร็วในการติดตามในแนว Azimuth

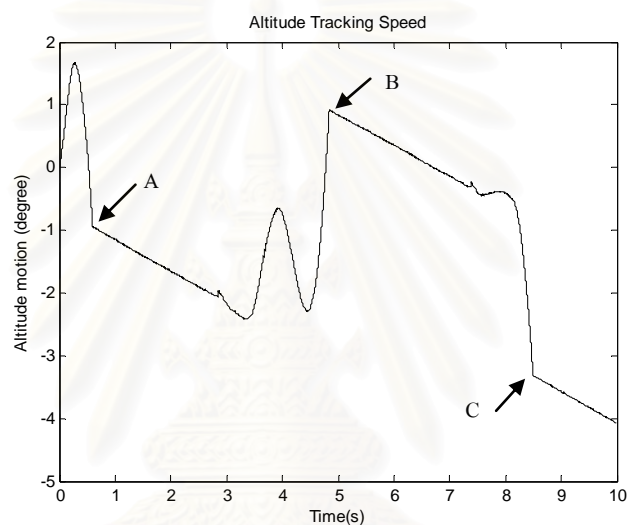
ความเร็วในการติดตามในแนว Azimuth ที่ระยะ 1 เมตร คือ 0.19 m/sec หรือ 19 cm/sec โดยในรูปที่ 6.10 ค่ามุม Azimuth ในรูปจะสามารถสังเกตได้ว่าระบบติดตามไม่สามารถติดตามกระจกได้ที่ 3 ตำแหน่งเวลา ดังแสดงในรูปที่ 6.10 คือจุด A, B และ C จากการคำนวณค่าความชันของกราฟในรูปที่ 6.10 จะได้ความเร็วการหมุนของมุม Azimuth ประมาณ -13.6, 12.1, 7.53 องศาต่อวินาที ที่จุด A, B, และ C ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยคือ 11 องศาต่อวินาที หรือประมาณ 0.19 m/s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 6.8 ค่ามุม Azimuth ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

ข. ความเร็วในการติดตามในแนว Altitude

ความเร็วในการติดตามในแนว Altitude ที่ระยะ 1 เมตร คือ 0.22 m/sec หรือ 22 cm/sec โดยในรูปที่ 6.9 แสดง ค่ามุม Altitude ที่เวลาต่างๆ ในรูปจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระบบติดตามไม่สามารถติดตามกระจกได้ที่ 3 ตำแหน่งเวลา ดังแสดงในรูปที่ 6.9 คือจุด A,B, และ C จากการคำนวณค่าความชันของกราฟในรูปที่ 6.9 จะได้ความเร็วการหมุนของมุม Altitude ประมาณ -12.0, 14.0, และ -11.4 องศาต่อวินาที ที่จุด A, B, และ C ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยคือ 12.5 องศาต่อวินาที หรือประมาณ 0.22 m/s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 6.9 ค่ามุม Altitude ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

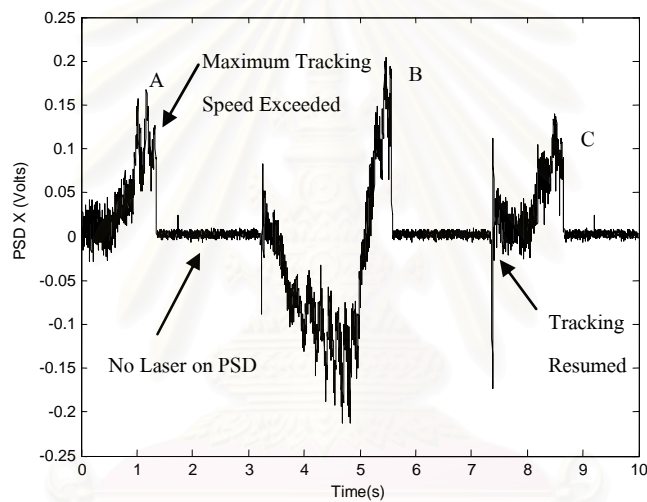
6.3.2 ความเร็วในการติดตามที่ระยะ 5.8 m

ในส่วนนี้แสดงการติดตาม Retro-reflector ที่ระยะ 5.8 m โดยที่ค่ามุม Azimuth มีค่าประมาณ 30 องศา (วัดที่กระจกโดยเริ่มจาก Beam Splitter), และมุม Altitude (วัดขึ้นจากระนาบในแนวระดับ) ประมาณ 20 องศา ในการทดสอบนี้ใช้ Retro-reflector ขนาดหน้าเปิดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.875 นิ้ว (ในส่วนเดิมใช้ 0.25 นิ้ว) เนื่องจากระยะของ Retro-reflector จากกระจกติดตามมีผลต่อระบบควบคุม ในการทดสอบนี้ค่าเกนในรูป PI (ลูปนอก) จึงต้องลดลงเพื่อคงลูปเกนให้คงที่ โดยในการทดสอบนี้ ค่าเกนได้ลดลง 5 เท่า (คูณด้วย 0.2)

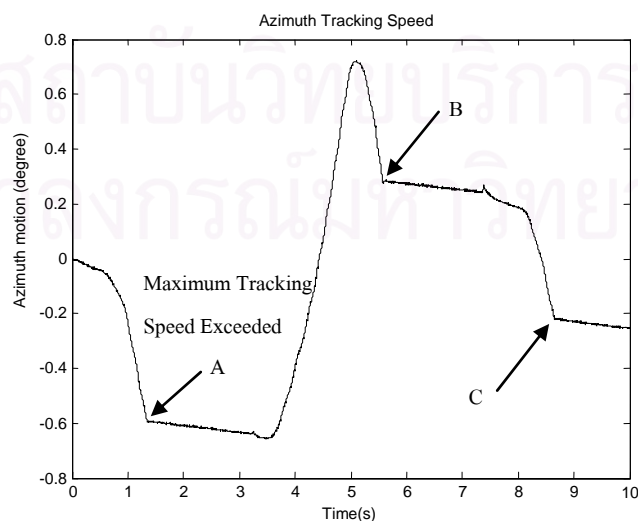
การทดสอบความเร็วนี้ใช้การขยับ Retro-reflector โดยใช้มือของผู้ทดสอบ โดยในการทดสอบใช้การขยับในแนวแกน Azimuth และ Altitude ที่ละแนวเพื่อทดสอบหาความเร็วสูงสุดในแต่ละแกน โดยความเร็วสูงสุดสามารถหาได้จากการหาความชันของกราฟของมุมที่ตำแหน่งเวลาก่อนที่แสงเลเซอร์ตกออกจาก PSD

ก. ความเร็วในการติดตามในแนว Azimuth

ความเร็วในการติดตามในแนว Azimuth ที่ระยะ 5.8 เมตร คือ 0.12 m/sec หรือ 12 cm/sec โดยในรูปที่ 6.10 และรูปที่ 6.11 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน x (Azimuth) และ ค่ามุม Azimuth ตามลำดับ ในรูปทั้งสองจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระบบติดตามไม่สามารถติดตามกระจกได้ที่ 3 ตำแหน่งเวลา ดังแสดงในรูปที่ 6.10 คือจุด A,B, และ C และในรูปที่ 6.11 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่า ลำแสงเลเซอร์ได้ตกออกจาก PSD แล้วที่ตำแหน่งทั้งสามนี้ จากการคำนวณค่าความชันของกราฟในรูปที่ 6.11 จะได้ความเร็วการหมุนของมุม Azimuth ประมาณ -1.13, -1.39, -0.99 องศาต่อวินาที ที่จุด A, B, และ C ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยคือ 1.17 องศาต่อวินาที หรือประมาณ 0.12 m/s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยมีข้อสังเกตว่าค่าความเร็วที่ได้เป็นค่าติดลบทั้งหมด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตำแหน่งของเลเซอร์ นั้นเริ่มที่ตำแหน่งไม่กลาง PSD



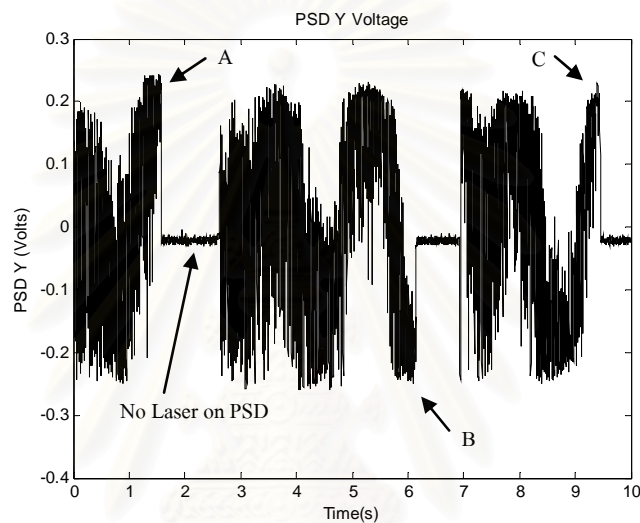
รูปที่ 6.10 ค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน x (Azimuth) ในการทดสอบความเร็วที่ 5.8 m



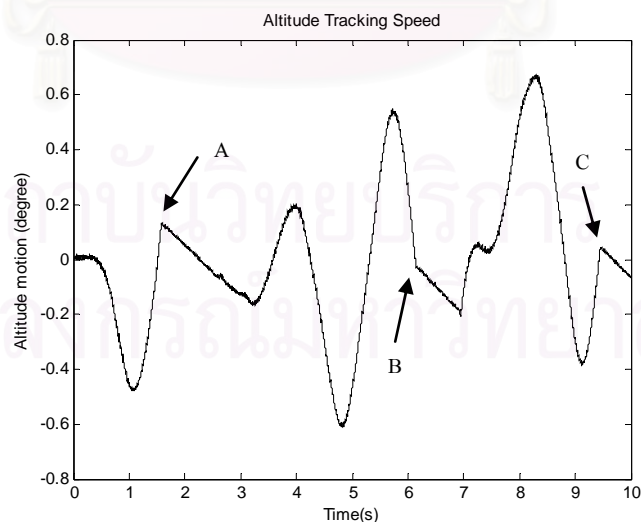
รูปที่ 6.11 ค่ามุม Azimuth ในการทดสอบความเร็วที่ 5.8 m

ข. ความเร็วในการติดตามในแนว Altitude

ความเร็วในการติดตามในแนว Altitude ที่ระยะ 5.8 เมตร คือ 0.2 m/sec หรือ 20 cm/sec โดยในรูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.13 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน y (Altitude) และ ค่ามุม Altitude ตามลำดับ ในรูปทั้งสองจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระบบติดตามไม่สามารถติดตามกระจกได้ที่ 3 ตำแหน่ง เวลา ดังแสดงในรูปที่ 6.12 คือจุด A,B, และ C และในรูปที่ 6.13 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าลำแสงเลเซอร์ได้ตกออกจาก PSD แล้วที่ตำแหน่งทั้งสามนี้ จากการคำนวณค่าความชันของกราฟในรูปที่ 6.13 จะได้ความเร็วการหมุนของมุม Altitude ประมาณ 1.98, -2, 1.85 องศาต่อวินาที ที่จุด A, B, และ C ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยคือ 1.94 องศาต่อวินาที หรือประมาณ 0.2 m/s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 6.12 ค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน y (Altitude) ในการทดสอบความเร็วที่ 5.8 m

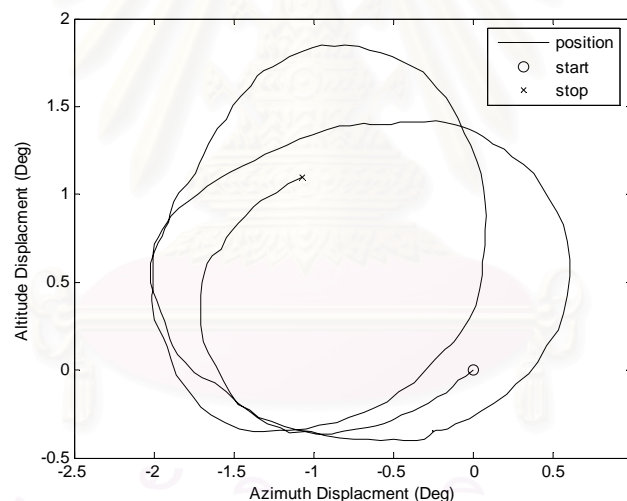


รูปที่ 6.13 ค่ามุม Altitude ในการทดสอบความเร็วที่ 5.8 m

6.3.3 การติดตาม Retro-reflector ในสองแกนพร้อมๆกัน

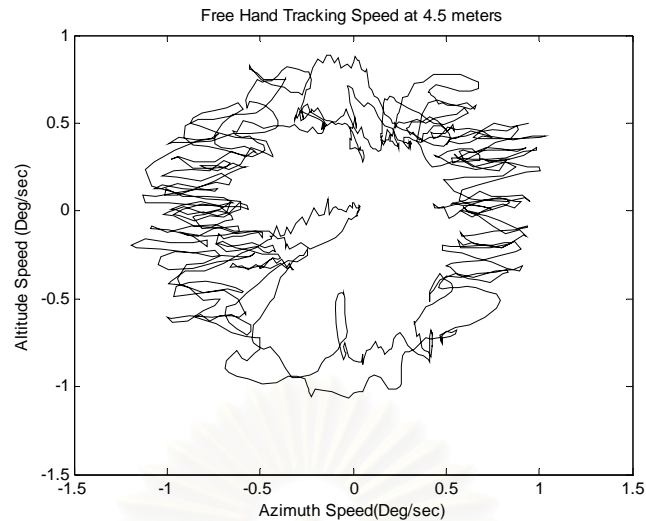
ในส่วนนี้แสดงการติดตาม Retro-reflector ที่ระยะ 4.5 m โดยที่ค่ามุม Azimuth มีค่าประมาณ 30 องศา, และมุม Altitude ประมาณ 20 องศา โดยในการทดสอบนี้ ค่าเกนได้ลดลง 5 เท่า (คูณด้วย 0.2) การทดสอบความเร็วนี้ใช้การขยับ Retro reflector โดยใช้มือของผู้ทดสอบ โดยในการทดสอบใช้การขยับในแนวแกน Azimuth และ Altitude พร้อมๆกันเพื่อทดสอบว่าระบบสามารถทำการติดตามได้ในทั้งสองแกนพร้อมๆกัน โดยจะนำเสนอผลการทดลองสองชุด คือผลการทดลองที่ไม่มี การติดตาม Retro reflector ไม่ทัน และที่มีการติดตามไม่ทัน

ในรูปที่ 6.14 และ รูปที่ 6.15 เป็นผลการทดลองที่ระบบสามารถติดตาม Retro-reflector ได้ตลอดการทดลอง โดยที่ในรูปที่ 6.14 แสดงตำแหน่งมุมทั้งสองของกระจกติดตาม (0.1 sec sampling time) และในรูปที่ 6.15 แสดงค่าความเร็วของมุมทั้งสองนี้ โดยการคำนวณความเร็วใช้ค่ามุม 100 จุด (0.1วินาที) ในการประมาณความเร็วทุกๆ 20 msec ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าความเร็วสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 1.2 องศาต่อวินาทีหรือ 0.094 เมตรต่อวินาทีซึ่งไม่มากกว่าค่าสูงสุดที่ได้ในหัวข้อที่แล้ว



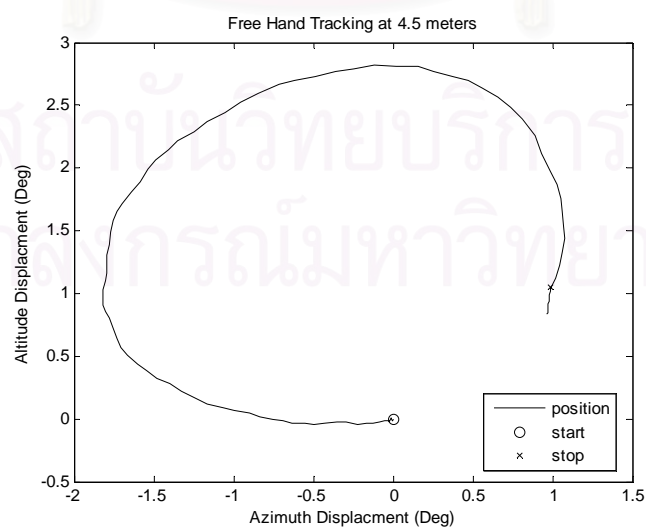
รูปที่ 6.14 ค่ามุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน (ข้อมูลชุดที่หนึ่ง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

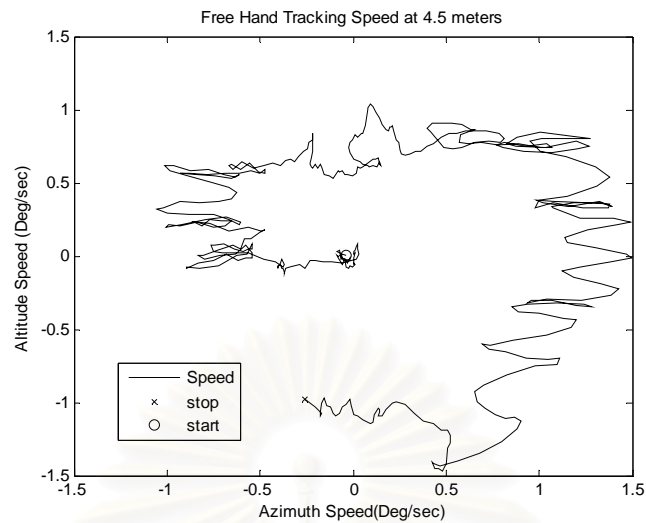


รูปที่ 6.15 ค่าความเร็วเชิงมุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน (ข้อมูลชุดที่หนึ่ง)

ในรูปที่ 6.16 และรูปที่ 6.17 แสดงค่าตำแหน่งมุมทั้งสองของกระจกติดตาม และค่าความเร็วของมุมทั้งสองนี้ ตามลำดับ เช่นเดียวกันแต่ในครั้งนี้ ความเร็วของ Retro-reflector นั้นเร็วกว่าที่ระบบจะสามารถติดตามได้ โดยจะเห็นได้ที่ตำแหน่ง "x" ในรูปที่ 6.16 โดยที่ตำแหน่งนี้ กระจกติดตามกำลังหมุนอยู่ที่ความเร็วประมาณ -1 และ -0.3 องศาต่อวินาทีในแกน Altitude และแกน Azimuth ตามลำดับ หรือประมาณ 0.082 m/s (ผลรวมความเร็วในทั้งสองแกน) โดยมีค่าความเร็วในการติดตามสูงสุดคือ 1.5 องศาต่อวินาที หรือประมาณ 0.12 m/s ซึ่งค่าทั้งสองนี้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้ทำการวัดไว้ในหัวข้อที่แล้ว



รูปที่ 6.16 ค่ามุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน (ข้อมูลชุดที่สอง)

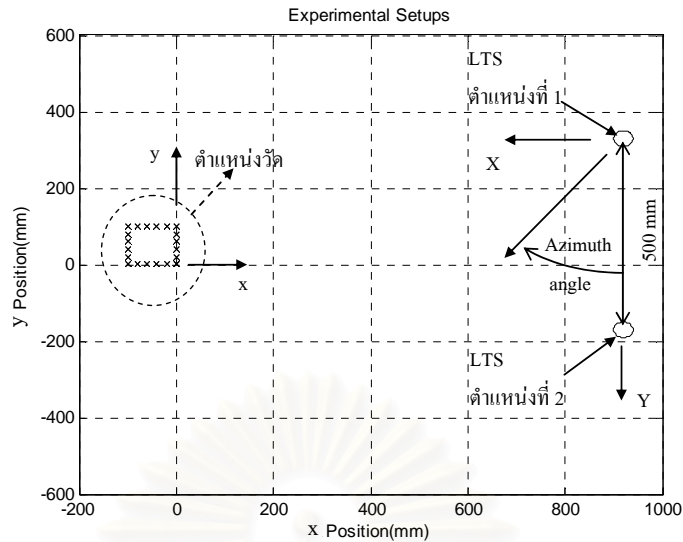


รูปที่ 6.17 ค่าความเร็วเชิงมุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน (ข้อมูลชุดที่สอง)

6.4 ความสามารถในการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector

ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลการทดสอบการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector โดยใช้อุปกรณ์ LTS ที่สร้างขึ้น โดยการวัดนี้ใช้วิธีการ Triangulation โดยวัดมุมของแนวแสงเลเซอร์ที่ชี้ไปที่ Retro-reflector จาก LTS สองตัว แต่ในการทดสอบนี้ใช้การจำลองว่ามี LTS สองชุดด้วยการเลื่อนอุปกรณ์ LTS ที่มีอยู่เพียงชุดเดียวไปมาระหว่างจุดสองจุด ข้อมูลที่จะนำเสนอมีสองชุดคือ ชุดแรกเป็นการวัดตำแหน่งจุดที่ละจุดโดยมีการเลื่อนอุปกรณ์ LTS ทุกตำแหน่งของ Retro-reflector ที่ทำการวัด ผลการทดสอบในชุดนี้อาจพิจารณาว่าเป็นการทดสอบระบบวัดตำแหน่งแบบใหม่ที่ใช้ LTS เพียงตัวเดียวแต่ใช้การขยับ LPS เพื่อให้สามารถวัดตำแหน่งได้จากวิธี Triangulation ส่วนข้อมูลในชุดที่สองใช้การเคลื่อนที่ของ LTS เพียงครั้งเดียวสำหรับการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector ทั้งหมด คือเป็นการวัดแนวแสงไปที่ Retro-reflector ที่ทุกตำแหน่งที่ต้องการวัดทั้งหมด โดยใช้ LTS ที่ตำแหน่งแรกก่อน แล้วจึงทำการย้ายตำแหน่ง LTS เพื่อวัดการวัดแนวแสงไปที่ Retro-reflector ที่ทุกตำแหน่งที่วัดไปแล้ว ผลการทดสอบนี้จะใกล้เคียงการใช้ LTS สองตัวในการวัดตำแหน่ง Retro-reflector มากกว่าในกรณีแรก

การทดสอบทั้งสองทำที่ตำแหน่ง Retro-reflector ต่างๆที่ระยะจากกระจกติดตามของ LTS ประมาณ 1000 mm (1 m) โดยมีระยะห่างระหว่างตำแหน่งของ LTS ทั้งสองเท่ากับ 500mm ตำแหน่งของ Retro-reflector ที่ใช้ในการวัดใช้ การเลื่อนของโต๊ะ x-y ที่มีความละเอียดเท่ากับ 20 ไมครอน (0.02mm) โดยความแม่นยำ (accuracy) ประมาณไว้ที่ อย่างน้อย 10 เท่าคือ 0.2 mm ตลอดช่วงที่ใช้ งาน ตำแหน่งของ Retro-reflector ทำการวัด นั้นเป็นการเคลื่อนที่ละ 20 mm ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา สองรอบ ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีด้านยาวเท่ากับ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 การจัดวางตำแหน่งต่างๆในการทดลองวัดตำแหน่ง Retro-reflector

ข้อสำคัญในการทดสอบนี้คือ ในการทดสอบนี้มิได้มีการวัดระยะและแนวแกนต่างๆ ที่แม่นยำระหว่าง อุปกรณ์ LTS และ ตำแหน่งของRetro-reflector หรือ ตำแหน่งแนวในการเคลื่อนที่ของ Retro-reflector กับแนวการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ LTS ระยะที่ทราบแน่นอนคือระยะในการเคลื่อนที่ของ Retro-reflector เทียบการตำแหน่งแรกเท่านั้น ส่วนในการวัดตำแหน่งโดยใช้ LTS นั้นจะเป็นตำแหน่งของ Retro-reflector เทียบกับตำแหน่งของ LTS ที่ 1 และในแนวแกนของมอเตอร์ปรับกระจกติดตามทั้งสอง ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าจริง จะต้องมีการปรับ(translation and rotation) ของค่าจุดต่างๆที่วัดได้เทียบกับแกนของ LTS ลงไปบนแกนของโต๊ะ x-y แล้วจึงสามารถทำการเปรียบเทียบได้ แต่เนื่องจากค่าระยะและมุมต่างๆของแกนอ้างอิงบน LTS และ โต๊ะ x-y นั้นไม่มีค่าที่แม่นยำ จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลตำแหน่งของ Retro-reflector ที่ได้จากการวัดมาใช้ในการประมาณค่าค่าระยะและมุมต่างๆของแกนอ้างอิงบน LTS เทียบกับ โต๊ะ x-y

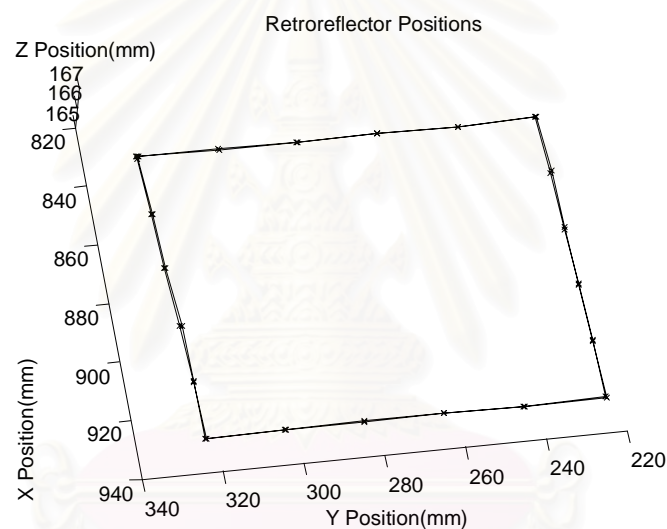
ข้อมูลที่ได้จากการวัดนั้น จะสามารถนำมาหาระนาบของโต๊ะ x-y เทียบกับแกนของ LTS ได้ (Normal Vector) โดยใช้วิธี Least-Square เพื่อให้มีค่าผิดในแนวแกน Z (ตั้งฉากกับแกน X-Y) ของ LTS น้อยที่สุด จากนั้นจึงทำการ project จุดทั้งหมดลงบนระนาบนี้ แล้วทำการหาแนวแกน x และ y ของโต๊ะ x-y โดยประมาณจากจุดในแนวหนึ่ง จากนั้นใช้จุดวัดหนึ่งจุด, แนวหนึ่งแนวนี้ และ normal vector ของระนาบนี้ในการเปลี่ยนแกนอ้างอิงของจุดทั้งหมดจากแกนของ LTS (แกน X-Y) มาเป็นค่าเทียบกับแกนของ โต๊ะ x-y ที่ประมาณขึ้นมา จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าจริงที่วัดได้จาก โต๊ะ x-y

สุดท้ายนี้จำเป็นต้องเน้นว่าค่าที่อ่านได้จากมุมของกระจก คือ มุม Azimuth และ มุม Altitude จะไม่ใช่มุมของแนวแสงที่ชี้ไปที่ Retro-reflector ที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งของ Retro-

reflector ซึ่งการคำนวณแนวแสงนี้จะสามารถทำได้ตามในที่ได้แสดงในบทที่ 3 และค่าตำแหน่งที่ได้จะใช้เป็นตำแหน่งที่ใกล้ที่สุดถึงแนวแสงเลเซอร์จาก LTS ที่สองตำแหน่ง ดังวิธีการคำนวณในบทที่ 3 เช่นกัน

6.4.1 ความสามารถในการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector เมื่อมีการเลื่อนอุปกรณ์ LTS ทุก ๆ ตำแหน่งของ Retro-reflector ที่ทำการวัด (ผลชุดที่ 1)

รูปที่ 6.19 แสดงผลการวัดที่แสดงโดยค่าตำแหน่งอ้างอิงกับแกนของ LTS (X-Y) จากรูปนี้ จะเห็นว่า ระนาบ ของ Retro-reflector นั้นไม่ได้ขนานกับระนาบ X-Y ของ LTS ดังจะเห็นได้จากการที่ค่า Z นั้นมีความแตกต่างประมาณ 2 mm (ดูที่ค่าบนแกน Z)

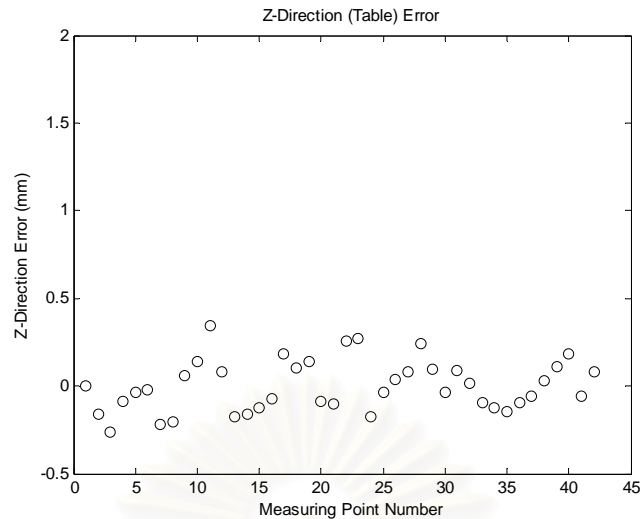


รูปที่ 6.19 ตำแหน่ง Retro-reflector เทียบกับแกน X-Y (ผลชุดที่ 1)

การเปรียบเทียบกับค่าจริงที่วัดบนแกนอ้างอิง x-y จะทำได้ยาก ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาระนาบ x-y เทียบกับ X-Y โดยในที่นี้ใช้สมการ

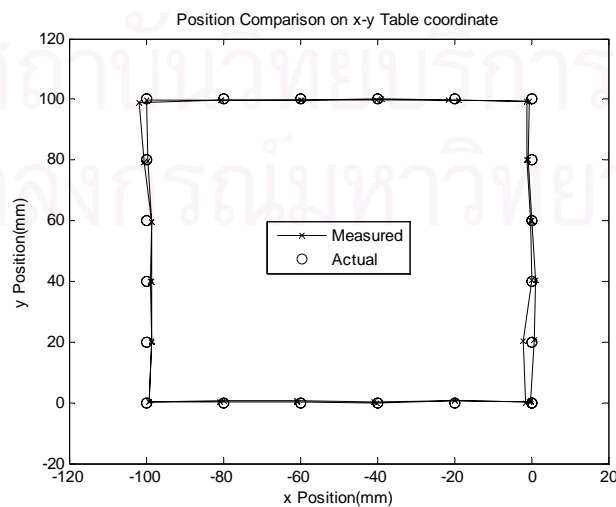
$$Z = aX + bY + c$$

โดยค่า X, Y, Z เป็นค่าตำแหน่งที่วัดได้ในแกน X-Y และ ค่า a, b, c เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นจะสามารถประมาณค่า a, b, c ที่ทำให้ค่ารวมของ $(Z - \hat{Z})^2$ ต่ำที่สุดเมื่อ \hat{Z} เป็นค่าประมาณของ Z ที่คำนวณจากค่าประมาณของ a, b, c จากนั้นจะสามารถคำนวณ normal vector ของระนาบ x-y เทียบกับแกน X-Y ได้ ค่าความแตกต่างในแกน z ของแต่ละจุดก็คือค่า $(Z - \hat{Z})$ นี้เอง ค่านี้ได้ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 6.20 โดยที่ขนาดของค่าผิดพลาดที่มากที่สุดคือ 0.34 mm และขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 0.12 mm

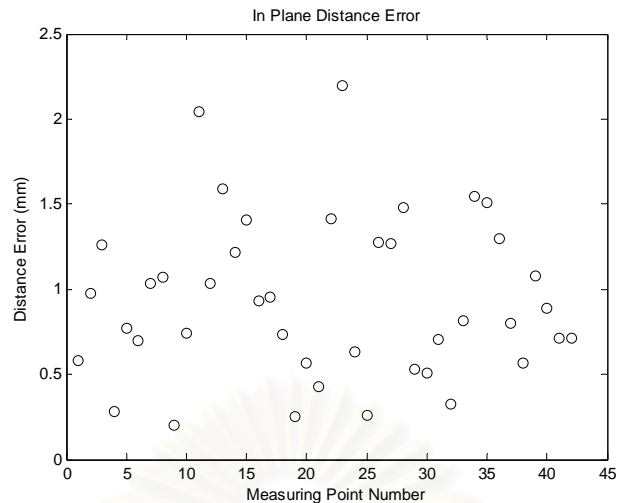


รูปที่ 6.20 ค่าผิดพลาดในการวัดจากระนาบ x-y (ผลชุดที่ 1)

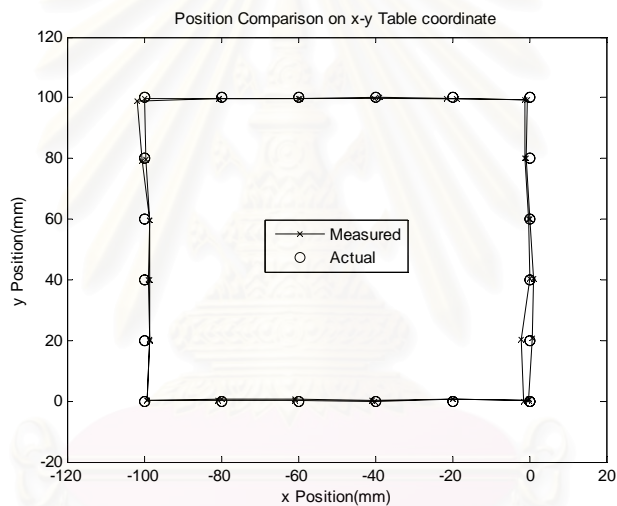
จากระนาบที่ได้ จะสามารถ project จุดทั้งหมดลงบนระนาบที่ได้นี้ คำนี้อยู่เป็นค่าที่วัดเทียบกับแกนอ้างอิง X-Y จากนั้นใช้จุดหนึ่ง (เช่น ใช้จุดแรกเป็นจุด origin ของแกน x-y) และแนวการวัดหนึ่งแนว (เช่น ใช้แนวการวัดแนวแรกเป็นแกน y) เพื่อจัดการย้ายค่าที่อ่านได้บนแกน X-Y มาเทียบกับแกนอ้างอิง x-y ค่าที่ได้แสดงอยู่บนรูปที่ 6.21 โดยที่ตำแหน่ง x เป็นค่าที่วัดได้และตำแหน่ง o เป็นค่าจริง จากนั้นจะสามารถหาค่าผิดพลาดในระนาบนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 6.22 และ รูปที่ 6.23 โดยในรูปแรกแสดงค่าผิดพลาดเมื่อเทียบกับลำดับของจุดที่วัด ซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2.2 mm และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.94 mm ส่วนในรูปที่ 6.23 แสดงค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่วัด โดยที่แสดงเป็นวงกลมที่มีรัศมีเป็นสัดส่วนกับค่าผิดที่ตำแหน่งนั้นๆ แต่จากการพิจารณาไม่พบว่าที่ตำแหน่งวัดไกลจาก LTS จะมีค่าผิดมากกว่าตามที่น่าจะเป็นจนเห็นได้ นอกจากนี้พบว่าค่าผิดพลาดในแนว x-y มากกว่าในแนวตั้งฉาก (z) มากถึง 8 เท่า (0.94/0.12)



รูปที่ 6.21 ค่าตำแหน่งที่วัดได้เทียบกับตำแหน่งในระนาบ x-y (ผลชุดที่ 1)



รูปที่ 6.22 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y (ผลชุดที่ 1)

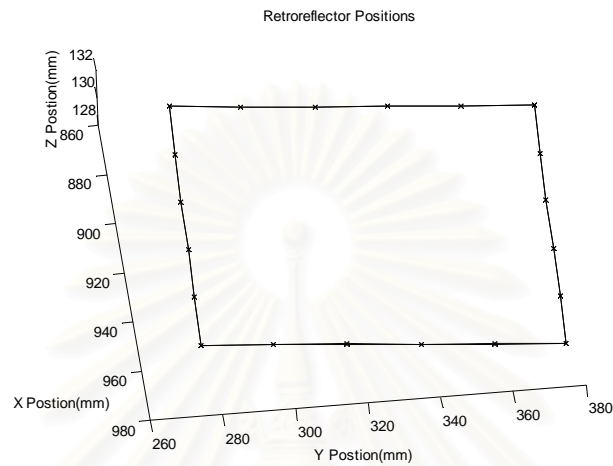


รูปที่ 6.23 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y เทียบกับตำแหน่งที่วัด (ผลชุดที่ 1)

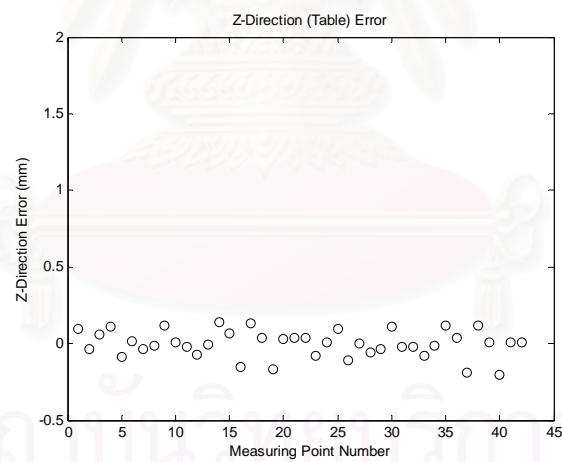
6.4.2 ความสามารถในการวัดตำแหน่ง เมื่อมีการเลื่อนอุปกรณ์ LTS ครั้งเดียว (ผลชุดที่ 2)

ในส่วนนี้แสดงผลในรูปแบบเดียวกันในส่วนที่แล้ว แต่การเคลื่อนที่ของ LTS นั้นทำเพียงครั้งเดียวสำหรับการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector ทั้งหมด รูปที่ 6.24-รูปที่ 6.28 แสดงผลที่ได้จากการทดลองนี้ จากรูปที่ 6.24 และ รูปที่ 6.25 จะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดที่ได้ก็น้อยกว่าที่ได้ในส่วนที่แล้วมาก คือ ค่าผิดพลาดจากระนาบสูงสุด(ในแนวZ) คือ 0.2 mm และค่าเฉลี่ยของขนาดอยู่ที่ 0.066 mm และค่าผิดพลาดในระนาบ x-y ของโต๊ะ x-y มากที่สุดที่ 1.3 mm และที่ค่าเฉลี่ยที่ 0.53 mm ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะน้อยกว่าค่าที่ได้ในส่วนที่แล้วถึงประมาณ 1 เท่าตัว ส่วนในรูปที่ 6.26 แสดงค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่วัด จากรูปนี้ดูคล้ายกับว่าจะมีรูปแบบของความผิดพลาดที่ขึ้นกับตำแหน่งที่วัด แต่ผู้วิจัยยังไม่สามารถอธิบายได้

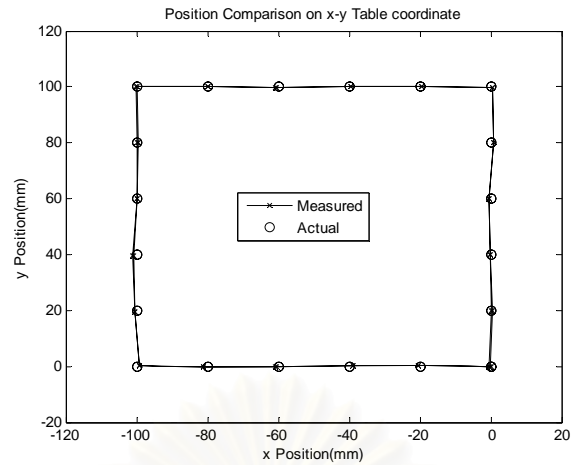
อนึ่งค่าที่ได้นี้นั้น ค่าเฉลี่ยจะมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังแสดงใน ภาคผนวก ค โดยที่ถ้าปรับความละเอียด ของ Encoder เป็น 81920 pulse ต่อรอบ (ดังที่ได้วัดเอาไว้ใน ภาคผนวก ค) จะได้ว่าค่าผิดพลาดที่ระยะประมาณ 1000 m ที่ความสูงประมาณ 150 mm จะมีค่าผิดพลาดได้เท่ากับ 0.5 mm ในแนวแกน z และ เท่ากับ 0.35 ในแนวระนาบ x-y ซึ่งจะใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยผิดพลาดต่างๆในส่วนนี้



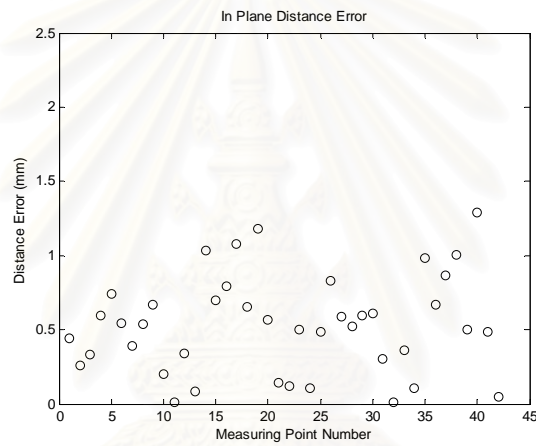
รูปที่ 6.24 ตำแหน่ง Retro-reflector เทียบกับแกน X-Y (ผลชุดที่ 2)



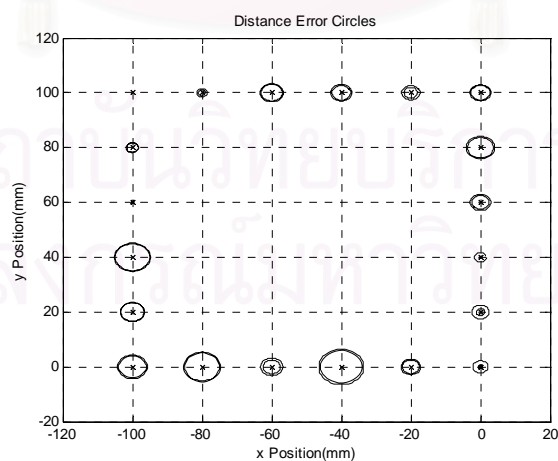
รูปที่ 6.25 ค่าผิดพลาดในการวัดจากระนาบ x-y (ผลชุดที่ 2)



รูปที่ 6.26 ค่าตำแหน่งที่วัดได้เทียบกับตำแหน่งในระนาบ x-y (ผลชุดที่ 2)



รูปที่ 6.27 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y (ผลชุดที่ 2)



รูปที่ 6.28 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y เทียบกับตำแหน่งที่วัด (ผลชุดที่ 2)

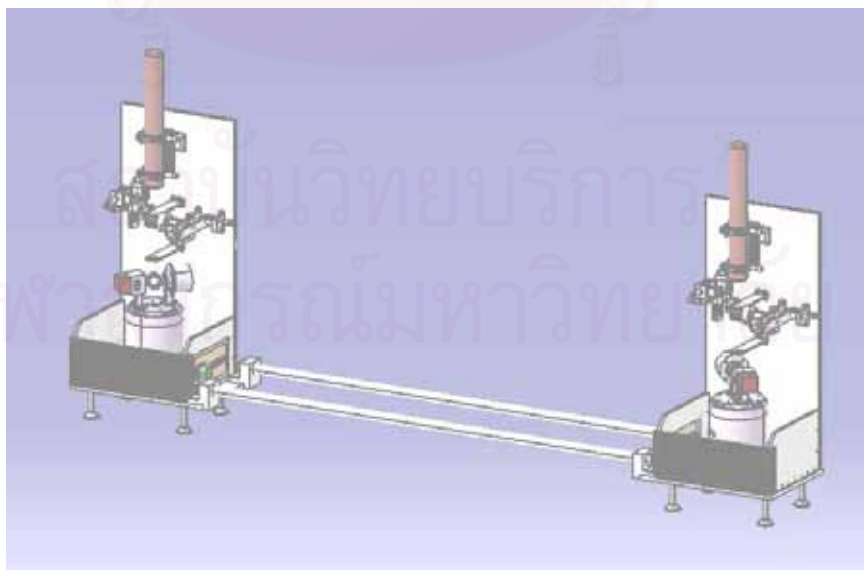
บทที่ 7

ต้นแบบ LPS 2

บทนี้นำเสนอผลการสร้างระบบ LPS 2 ซึ่งได้นำข้อผิดพลาดจากการสร้าง ต้นแบบ LPS 1 มาใช้ในการออกแบบ ในบทนี้จะกล่าวถึง ต้นแบบ LPS 2 การตั้งศูนย์ของแนวเลเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุม

7.1 ต้นแบบ LPS 2

ระบบต้นแบบ LPS 2 มีความคล้ายคลึงต้นแบบตัวแรกที่ได้อ้างอิงมาในบทที่ 4 ต่างกันตรงที่แนวการวางเลเซอร์ ซึ่งจะวางแนวเลเซอร์ดังรูปที่ 7.1 การที่ตำแหน่งการติดตั้งเลเซอร์อยู่ด้านบนจะทำให้ work space ในด้านหน้ามากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับต้นแบบ LPS 2 โดยการทำงานจะเหมือนกัน ในต้นแบบ LPS 2 มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อน azimuth และ altitude จะมีแรงบิด (Torque) ประมาณ 3 เท่า ทำให้ผลการทำงานของต้นแบบ LPS 2 น่าจะมีความเร็วในการติดตาม Retro-reflector (Tracking Speed) มากกว่าต้นแบบ LPS 1 แต่ความแม่นยำในการวัด (accuracy) จะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากใช้ encoder แบบเดียวกัน ซึ่งมีความละเอียดเท่ากัน ระบบ LTS ทั้งสองแสดงด้วย Module R และ Module L ระบบ LTS ที่ได้สร้างขึ้นนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 7.2 อุปกรณ์หลักของระบบ LTS ดังแสดงในรูปคือ Laser source, Beam Splitter, PSD, และระบบ Tracking ระบบ Tracking Mirror นั้นรายละเอียดนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.1 ต้นแบบ LPS 2

ในรูปที่ 7.4 นี้ เลข 1 แสดงกระจกสะท้อนแสง เลข 2 แสดง อุปกรณ์ตรวจวัดมุม Optical encoder รุ่น CP-300 เลข 3 แสดงถึงมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน Kollmorgen รุ่น RBE-0110 เป็น อุปกรณ์ขับเคลื่อนชุดกระจกติดตามตำแหน่งในมุม Altitude (แกนที่อยู่ในแนวนอน) เลข 4 แสดง มอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน ของ Kollmorgen รุ่น RBE-0210 เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนกระจกในมุม Azimuth (แกนที่อยู่ในแนวตั้ง) เลข 4 ส่วนในรูปที่ 7.5 นั้นแสดงอุปกรณ์จับยึดกระจกที่สร้างขึ้นแทน อุปกรณ์ที่มาพร้อมกับกระจก โดยที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยต่ำกว่าและได้ออกแบบให้สมดุล ทั้งนี้ เพื่อให้จำเป็นต้องใช้แรงบิดจากมอเตอร์ให้น้อยที่สุดในการควบคุมให้กระจกอยู่ในตำแหน่งคงที่

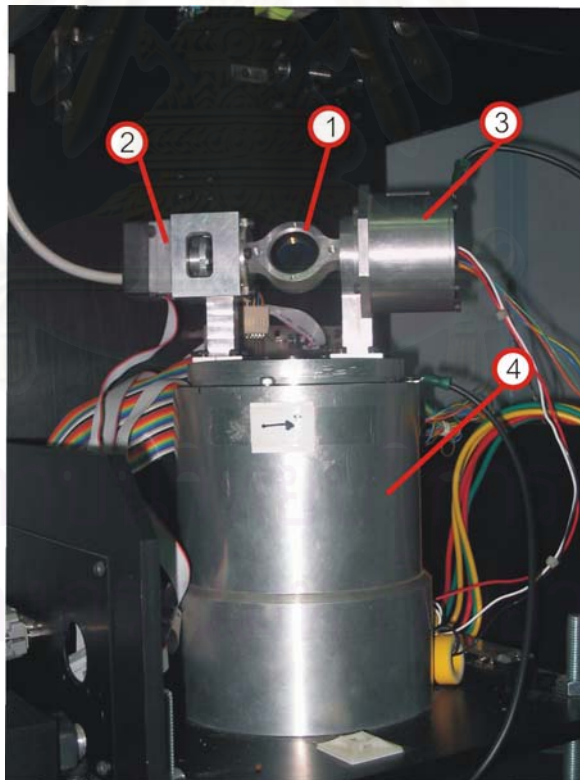


รูปที่ 7.2 ระบบ ต้นแบบ LPS 2 (อุปกรณ์จริง)

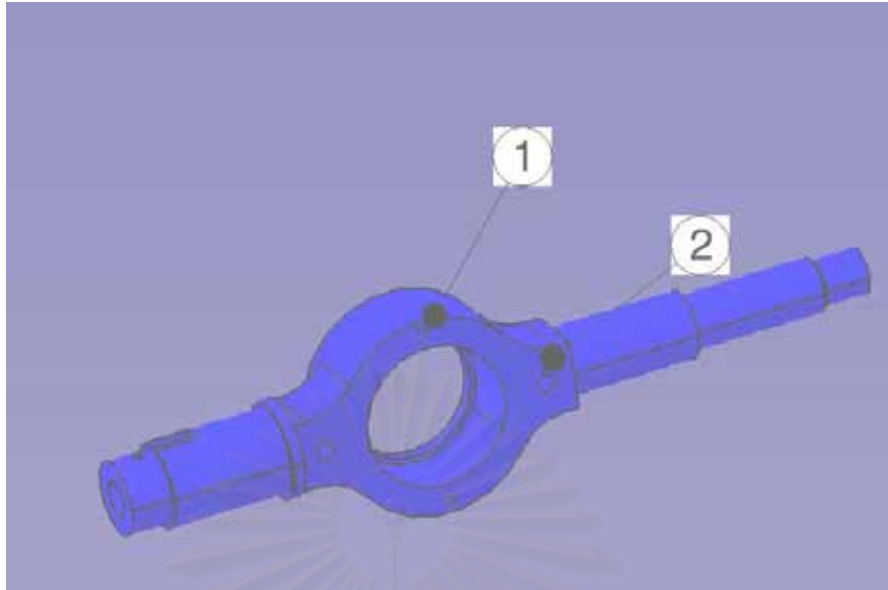
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.3 ระบบ LTS Module-R



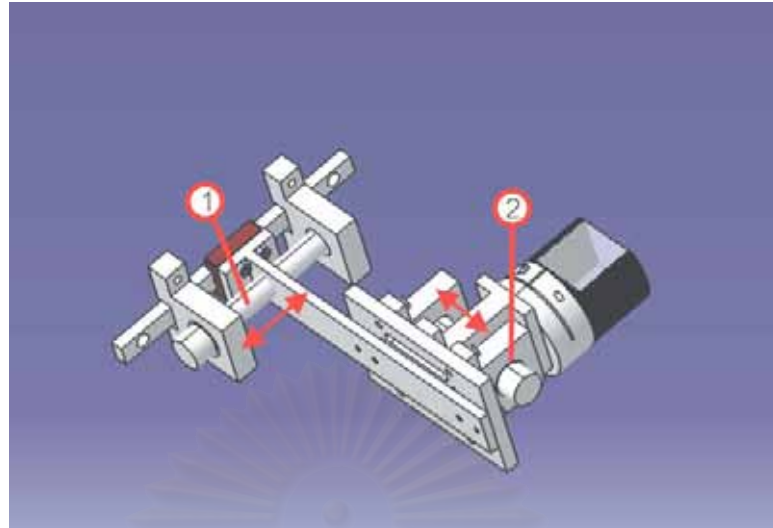
รูปที่ 7.4 Tracking Mirror System



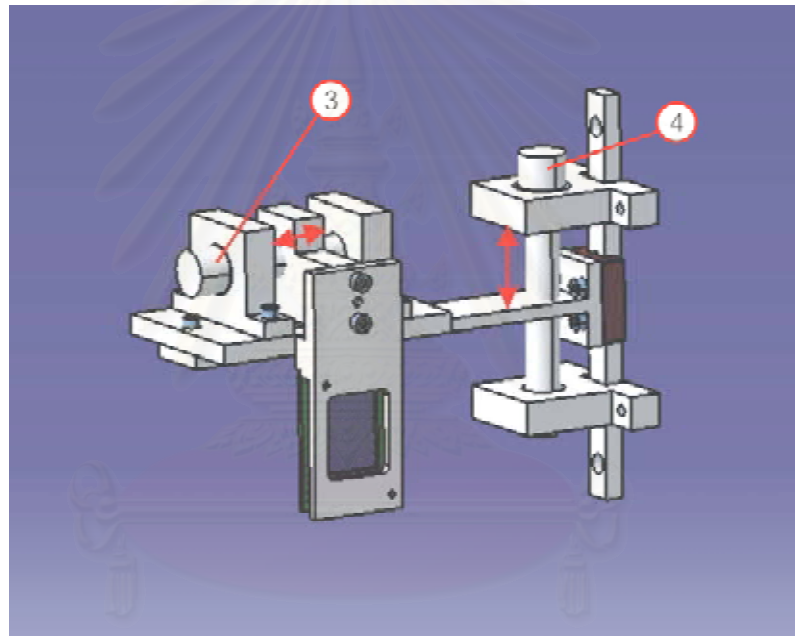
รูปที่ 7.5 อุปกรณ์จับยึดกระจก

ส่วนอุปกรณ์จับยึด Beam Splitter และ PSD นั้นแสดงในรูปที่ 7.6 และ รูปที่ 7.7 โดยที่อุปกรณ์ทั้งสองได้ออกแบบให้สามารถปรับได้โดยใช้สกรูที่แสดงเป็นเลข 1 และเลข 2 ในรูปที่ 7.6 และ รูปที่ 7.7 ซึ่งการปรับนี้จำเป็นในการปรับแต่งแนวแสงเลเซอร์และอุปกรณ์ต่างๆให้ตรงกัน การปรับแต่งแนวแสงเลเซอร์นั้นจะสามารถทำได้ดังนี้

1. ถอดกระจกติดตามออก แล้วใส่อุปกรณ์ ขึ้นส่วนเบอร์ 1 ใน รูปที่ 7.8 และ รูปที่ 7.9
2. เปิดแสงเลเซอร์ แล้วปรับที่ตัวจับยึดแหล่งกำเนิดแสงจน แสงส่องผ่านตลอด ดังในรูปที่ 7.9 และรูปที่ 7.10
3. ใส่ชิ้นส่วนเบอร์ 2 ดังรูปที่ 7.11 และปรับจนแสงที่ผ่านตลอด ชิ้นส่วนเบอร์ 1 และ 2 ที่เป็นแผ่นโลหะนี้จะไม่มีการใช้ในการทำงานจริง
4. จากนั้นนำชิ้นส่วนเบอร์ 3 มาใส่ แล้วปรับให้ แสงทะลุผ่านตลอด ดังรูปที่ 7.12
5. จากนั้นนำกระจกมาใส่ และให้แสงสะท้อนกลับแนวเดิมมากที่สุดคือปรับกระจกจนแสงที่สะท้อนกลับทับกับแสงที่ตกกระทบ โดยดูที่ด้านหลังของ Beam Splitter หรือ ที่แหล่งกำเนิดแสง ดังในรูปที่ 7.13
4. ปรับอุปกรณ์ PSD ให้แสงตกบน PSD กลางที่สุด โดยอ่านค่าที่ได้จาก PSD ให้ใกล้ 0 ที่สุด ถ้าไม่สามารถทำได้ ก็จดขนาดสัญญาณไว้ เพื่อใช้ในเป็นค่าชดเชยในระบบควบคุม

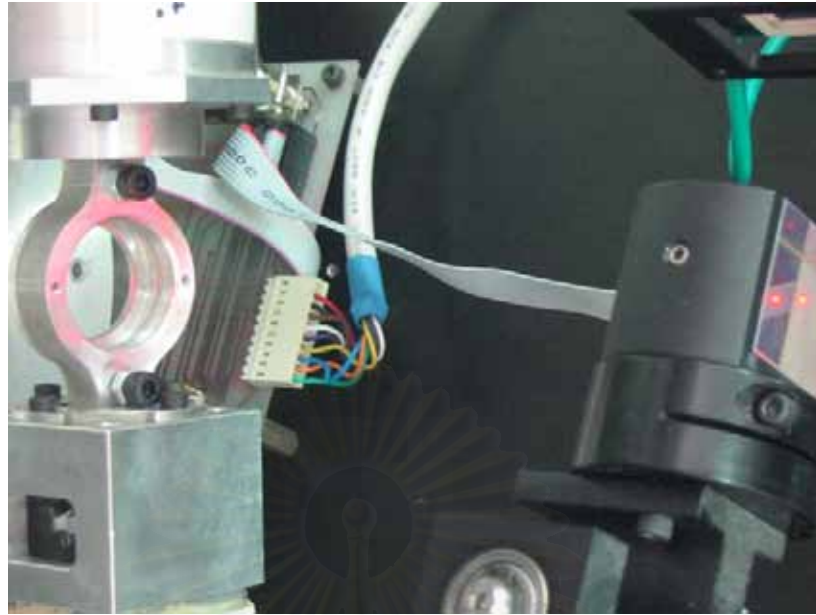


รูปที่ 7.6 ชุดจับยึด Beam Splitter ของอุปกรณ์ LTS ต้นแบบ LPS 2

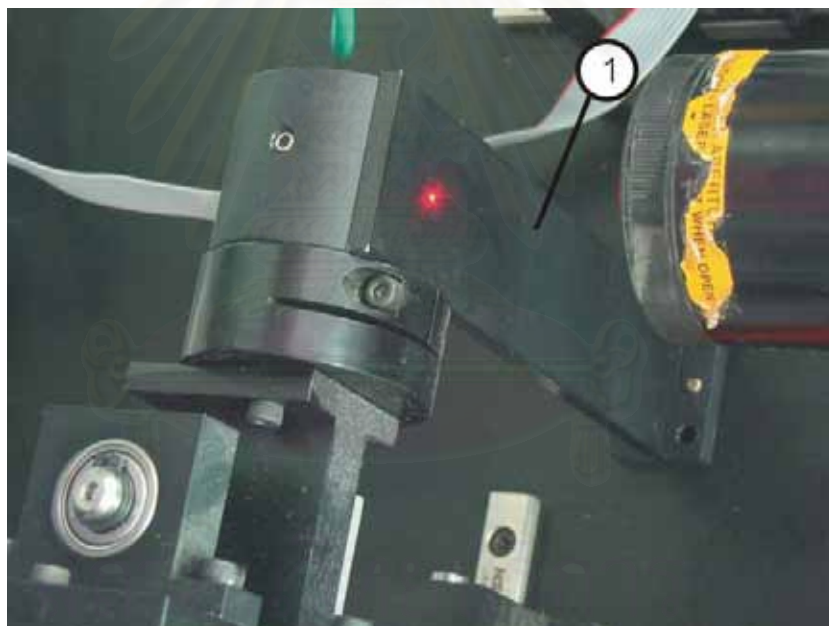


รูปที่ 7.7 ชุดจับยึด PSD ของอุปกรณ์ LTS ต้นแบบ LPS 2

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

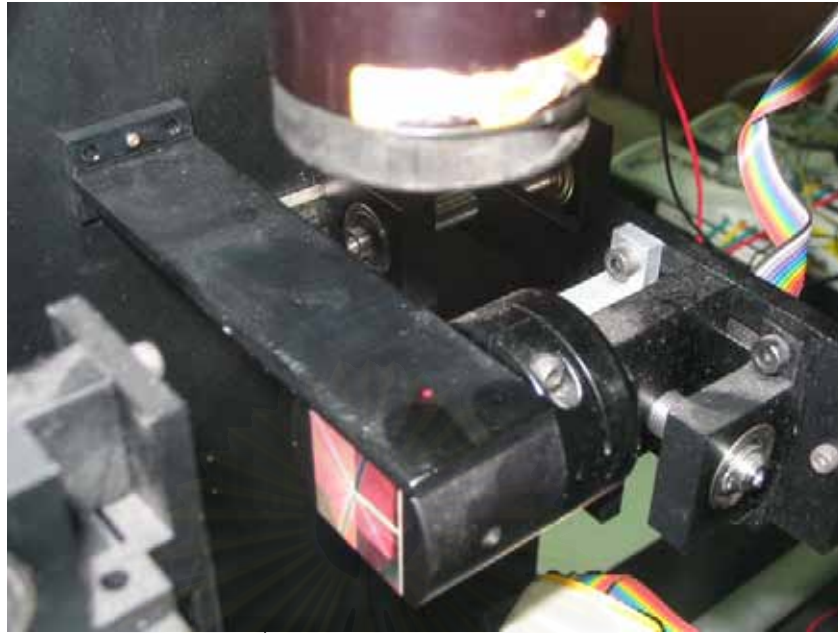


รูปที่ 7.8 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 1

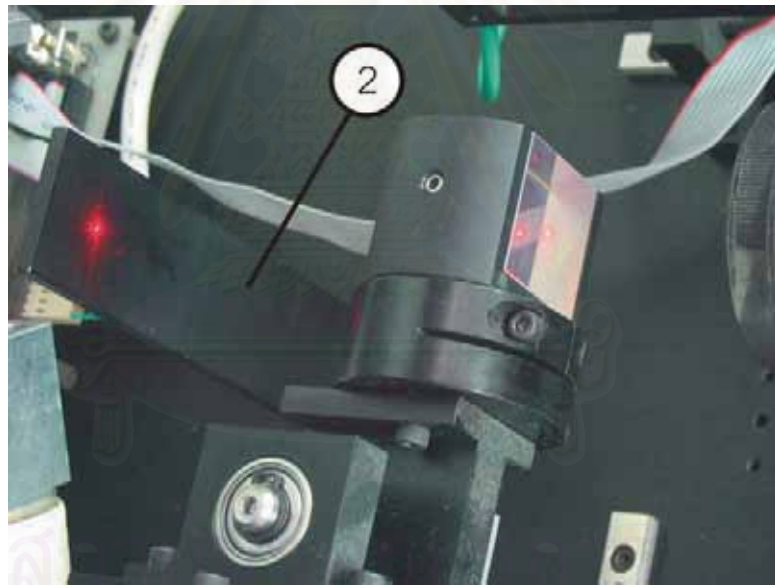


รูปที่ 7.9 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 2

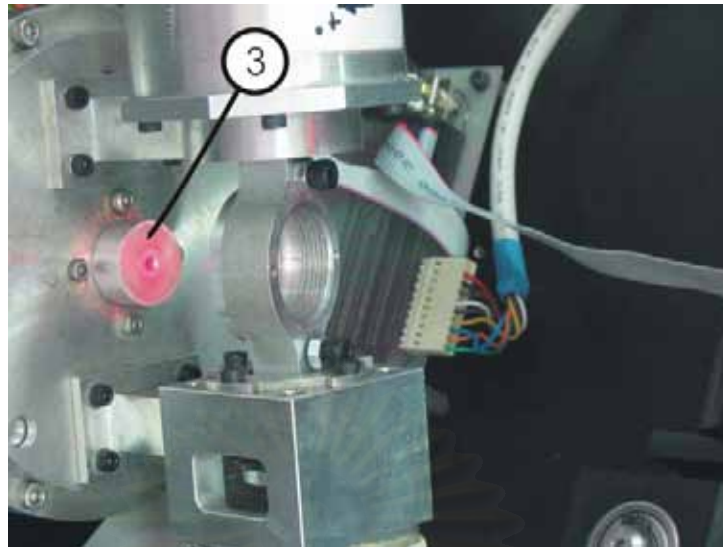
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



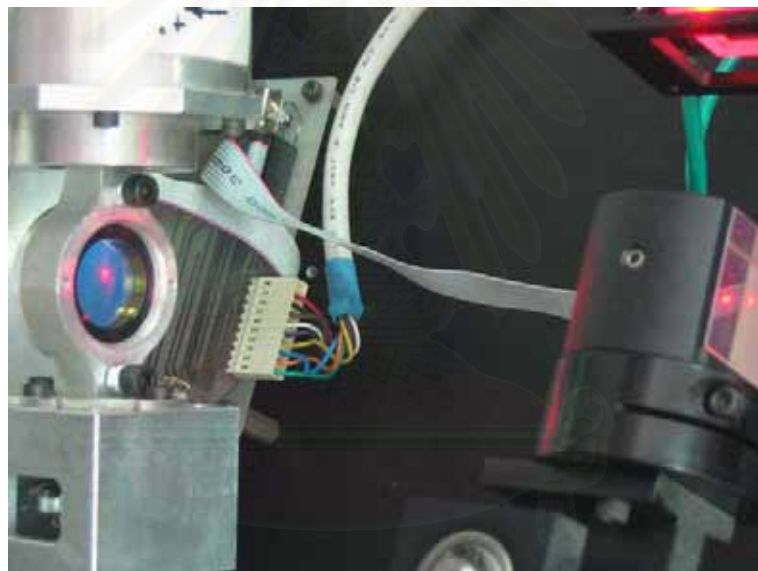
รูปที่ 7.10 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 3



รูปที่ 7.11 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 4



รูปที่ 7.12 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 5



รูปที่ 7.13 การปรับแต่งแนวเลเซอร์ 6

7.2 อุปกรณ์ควบคุมของ ต้นแบบ LPS 2

ดังที่กล่าวมาแล้วระบบต้นแบบ Local Positioning System โดยระบบประกอบไปด้วย อุปกรณ์หลัก 4 ชิ้นคือ

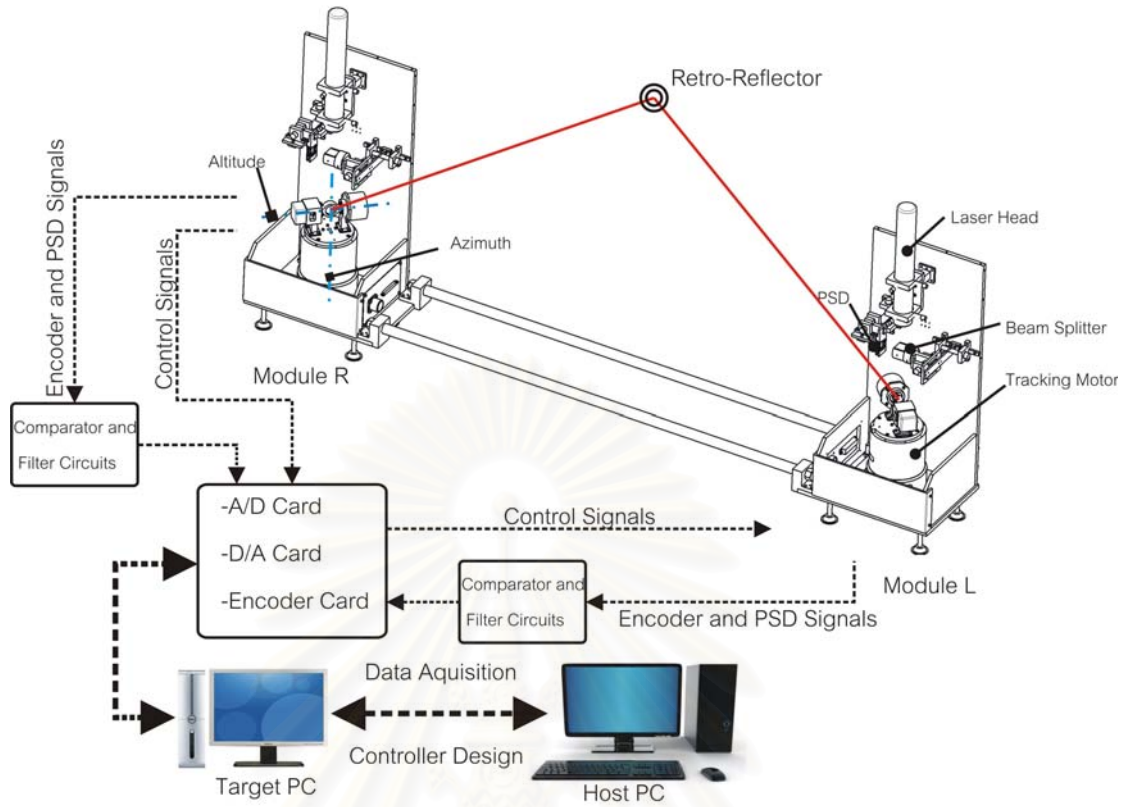
- 1) ชุดกระจกติดตามด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Tracking System, LTS) แสดงในส่วนที่ผ่าน มา
- 2) ชุดวงจรควบคุมมอเตอร์ (Power Amplifier & Electronics)
- 3) คอมพิวเตอร์ควบคุม LTS (หรือ Target Computer)

4) คอมพิวเตอร์จัดการ (Supervisor / User interface, หรือ Host Computer, ไม่อยู่ในรูป)

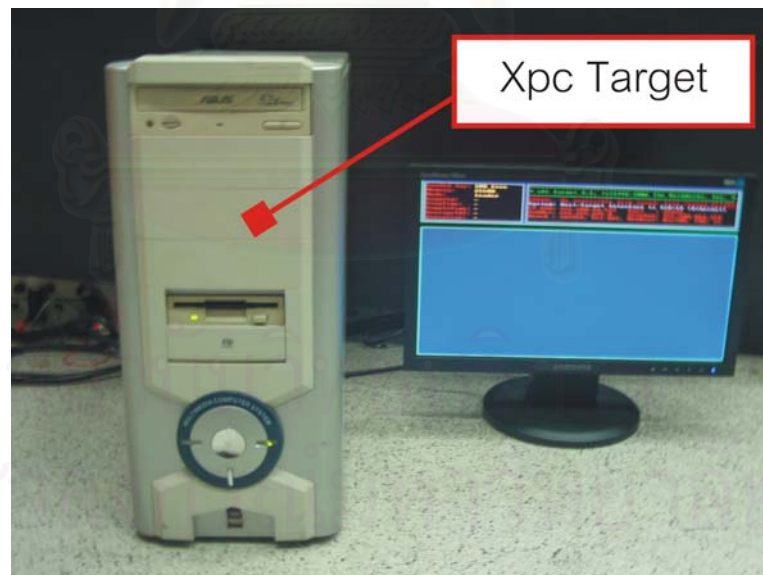
ชุดกระจกติดตามด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Tracking System, LTS) นั้นได้ในส่วนที่ผ่านมา ในส่วนนี้จะอธิบายถึงอุปกรณ์อีกสามชิ้นที่เหลือ

รูปที่ 7.15 และรูปที่ 7.16 แสดงอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ และระบบควบคุมที่ใช้ (รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆนั้นอยู่ใน ภาคผนวก ก) ในรูปนั้นเส้นประแสดงระบบที่เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Software) โดยสามารถปรับได้ตามระบบควบคุมที่ใช้ โดยในการควบคุมมอเตอร์หนึ่งตัวนั้นจะมีสัญญาณต่างๆคือ ค่ามุมสำหรับควบคุมให้มอเตอร์ได้ค่ามุมที่ต้องการ และ ค่าความคลาดเคลื่อนของแสงเลเซอร์จาก Retro-reflector (Beam offset) ที่ใช้ในการปรับกระจกตามการเคลื่อนที่ของ Retro-reflector ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ให้อ่านค่า PSD ผ่านทางการ์ด PCI-9112 ส่วนค่ามุมนั้นให้อ่านค่าผ่าน Encoder card (PCI-8133) และ PCI-9112 Encoder card นั้นใช้สัญญาณ A/B แบบ square wave ซึ่งจำเป็นจะต้องสร้างขึ้นจากวงจร Comparator (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ง) ที่จัดทำขึ้น แต่สัญญาณนี้ใช้ได้แค่ความละเอียดเท่ากับสี่เท่าของลูกคลื่นต่อรอบของ Encoder (2048x4) เท่านั้น การที่จะวัดค่ามุมให้ได้ละเอียดขึ้นจะต้องใช้ค่าของสัญญาณแบบ Sine wave โดยการอ่านค่า A/B จาก A/D card (PCI-9112) การใช้งานจะต้องนำข้อมูลทั้งสองมารวมกันโดยโปรแกรม (Summing Algorithm) การใช้ค่าจาก A/D เพียงอย่างเดียวจะไม่สามารถทำได้ที่ความเร็วสูง และการบวกค่าทั้งสองโดยตรงก็ไม่สามารถทำได้เพราะค่าศูนย์นั้นไม่ตรงกันจากการใช้วงจร Comparator รายละเอียดต่างๆนั้นแสดงอยู่ใน ภาคผนวก ง เมื่อได้ค่าต่างๆแล้วก็สามารถประมวลผลโดยใช้ระบบควบคุม (Control law) แล้วส่งไปควบคุมมอเตอร์

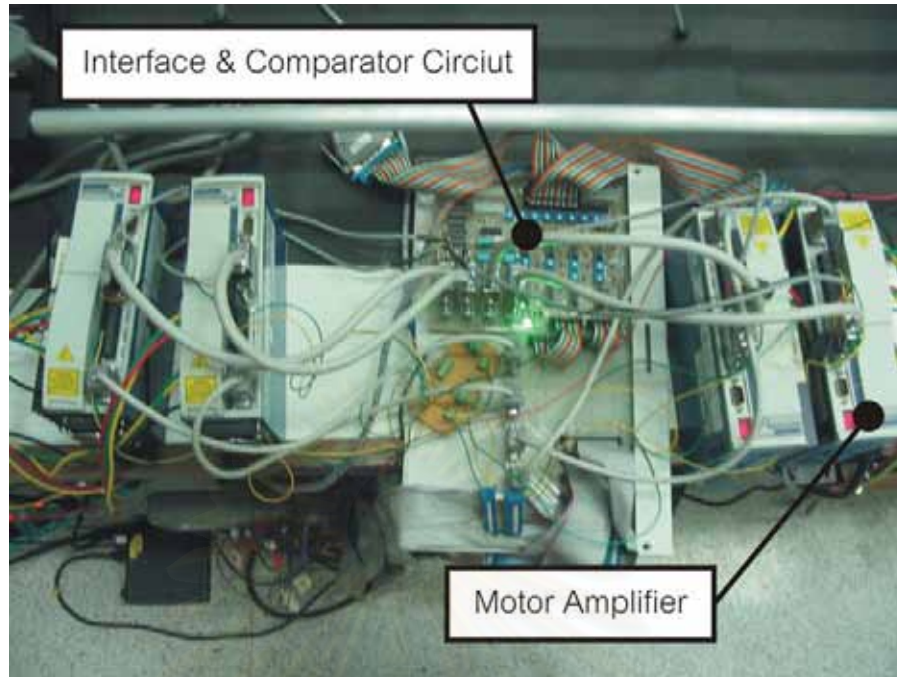
การส่งสัญญาณไปควบคุมมอเตอร์นั้นจะส่งผ่าน D/A card (PCI-6308) ไปยัง Power Amplifier (Kollmorgen Servo Star Series) โดยการควบคุมมอเตอร์จาก Amplifier นั้นเป็นแบบ Current mode (Torque mode) ทำให้การออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์นั้นง่ายขึ้น มอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ Brushless ดังนั้นการควบคุมต้องใช้ข้อมูลตำแหน่งของ Rotor ของมอเตอร์ด้วย Amplifier นั้นใช้สัญญาณ A/B แบบ square wave ซึ่งจำเป็นจะต้องสร้างขึ้นจากวงจร Comparator ที่จัดทำขึ้น วงจรนี้ตัว Amplifier และอุปกรณ์จ่ายไฟฟ้า (Power Supply) นั้นได้จัดสร้างขึ้นรวมกันเป็นกล่องวงจรดังแสดงในรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.14 ระบบต่างๆที่ใช้สำหรับควบคุม ต้นแบบ LPS 2



รูปที่ 7.15 ส่วนควบคุมของระบบติดตาม



รูปที่ 7.16 ระบบต่างๆที่ใช้สำหรับควบคุม ต้นแบบ LPS 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

ระบบควบคุมและการทดสอบ ต้นแบบ LPS 2

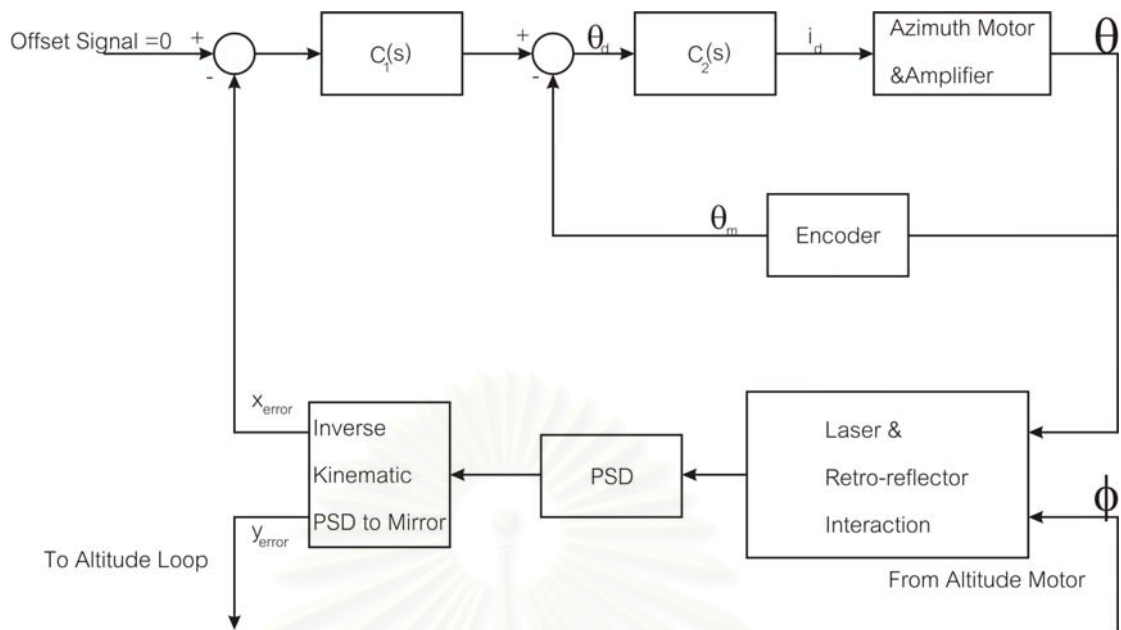
ในบทนี้แสดงผลการทดสอบต้นแบบระบบ LPS 2 โดยจะทดสอบในสามหน้าที่ของระบบ คือ การควบคุมของ LTS ความสามารถในการติดตาม Retro-reflector และการวัดตำแหน่ง

8.1 ระบบควบคุมสำหรับ LTS ของต้นแบบ LPS 2

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ความสามารถในการทำงานหลักของระบบ LTS คือการติดตาม Retro-reflector การทำงานของระบบควบคุมของต้นแบบ LPS 2 นี้ จะคล้ายคลึงกับระบบควบคุมของต้นแบบ LPS 1 แต่จะมีข้อแตกต่างกันเนื่องจากแนวการวางกระจก Beam splitter PSD และ เลเซอร์แตกต่างกัน ทำให้การควบคุมไม่สามารถใช้สัญญาณ PSD มาควบคุมมอเตอร์ในแต่ละแกนโดยตรงได้ ในส่วนนี้จะแสดงระบบการควบคุมที่ได้พัฒนาและทดสอบจริง จนสามารถทำการติดตาม Retro-reflector ได้

ในระบบควบคุมของ ต้นแบบ LPS 2 การควบคุมจะนำสัญญาณ PSD มาคำนวณผ่าน Inverse kinematics ระหว่าง PSD กับกระจกสะท้อน แล้วจึงนำมาควบคุมผ่านรูปควบคุมแบบเดียวกับต้นแบบ LPS 1

ในรูปที่ 8.1 นี้เราต้องการให้ค่าความผิดพลาดของแสงจากกึ่งกลางของ Retro-reflector x_{error} และ y_{error} ให้เป็นศูนย์ ในรูปที่ 8.1 โดยการปรับแต่งใช้สัญญาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องการ (id) ที่ให้กับอุปกรณ์ขยายกำลัง (Power Amplifier) ทั้งของมอเตอร์ Azimuth และ มอเตอร์ Altitude ที่ อุปกรณ์ขยายกำลังนี้ จะมีวงจรถวลกระแสไฟฟ้าที่มีแถบกว้างความถี่ (bandwidth) ประมาณ 16k Hz โดยการส่งค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการนั้น จะส่งที่ความถี่ 1 msec (sampling time) ในรูปนี้เป็นรูปที่ใช้สัญญาณมุมของมอเตอร์ในการป้อนกลับ โดยใช้อุปกรณ์วัดมุม Encoder ในการอ่านค่า (ที่ความถี่ 1 msec เช่นกัน) รูปนี้มีสัญญาณอ้างอิงคือค่ามุมที่ต้องการที่จะส่งมาจากหุ่นยนต์อีกที่หนึ่ง ในรูปนี้สัญญาณอ้างอิง θ_d จะถูกนำมาลบจากสัญญาณมุมที่วัดได้ (θ_m) แล้วนำไปเป็นสัญญาณเข้าให้แกตัวควบคุมแบบ PD ส่วนในรูปนอกนั้นเป็นรูปของการป้อนกลับด้วยสัญญาณจากอุปกรณ์ PSD ค่าที่ได้จาก PSD นำมาผ่านการคำนวณ Inverse kinematic แล้วนำมาใช้ในเป็นสัญญาณเข้าของตัวควบคุมแบบ PI จะทำการคำนวณออกมาเป็นสัญญาณมุมที่ต้องการ θ_d ในส่วนนี้นั้นแสดงให้เห็นแค่ลักษณะการทำงานเท่านั้น สำหรับอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ นั้นได้อธิบายไว้ในบทที่ 7 และในภาคผนวก



รูปที่ 8.1 ระบบควบคุมแบบสองลูป ของชุดควบคุมกระจกในแนว Azimuth

8.2 การปรับแต่งระบบควบคุม ของต้นแบบ LPS 2

ในการเลือกใช้ระบบควบคุมสำหรับ $C_1(s)$ และ $C_2(s)$ ดังในรูปที่ 8.1 ใช้การทดลองปรับแต่งโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PID แบบต่างๆ โดยการทดลองปรับแต่งนั้น ใช้วิธีปรับ ลูปในก่อนให้ได้ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ (มุมที่ต้องการ, θ_d) เป็นที่น่าพอใจแล้วจึงปรับลูปนอกบ้าง (ผลตอบสนองต่อค่า offset ที่ต้องการ)

8.2.1 ผลการปรับระบบควบคุมลูปควบคุมมุม (ลูปใน)

การปรับเริ่มที่การปรับในลูปในก่อน ลูปในเป็นลูปที่ใช้ควบคุมมุมของกระจกให้ได้มุมที่ต้องการ ในลูปนี้ระบบควบคุมที่เหมาะสมคือแบบ PD (Proportional and Derivative Controller) โดยค่าที่ได้เป็นค่าแรงบิดที่ต้องการที่มอเตอร์ เพื่อส่งให้อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ต่อไป (motor controller and power amplifier) ในการทดลองได้ทำการปรับค่า proportional และ derivative เกณฑ์ได้ค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ของค่ามุมที่ต้องการที่พอใจ โดยผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศา ของแกน Azimuth และของแกน Altitude แสดงดังในรูปที่ 8.2-รูปที่ 8.9 ในรูปเส้นทึบแสดงค่ามุมที่วัดได้โดยใช้สัญญาณ sine wave ของ encoder เข้าร่วมในการคำนวณตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์ และจุดตกภาพแสดงค่าที่วัดได้โดยใช้สัญญาณ square wave (ที่ไขว้วงจรไฟฟ้าสร้างจากสัญญาณ sine wave อีกที) ค่าที่ได้นี้วัดที่ความถี่ 1 msec. รูปที่ 8.10-รูปที่ 8.17 แสดงถึงผลตอบสนองกับสัญญาณ sine wave ที่มี amplitude 5 องศา ที่ความถี่ 0.1 Hz

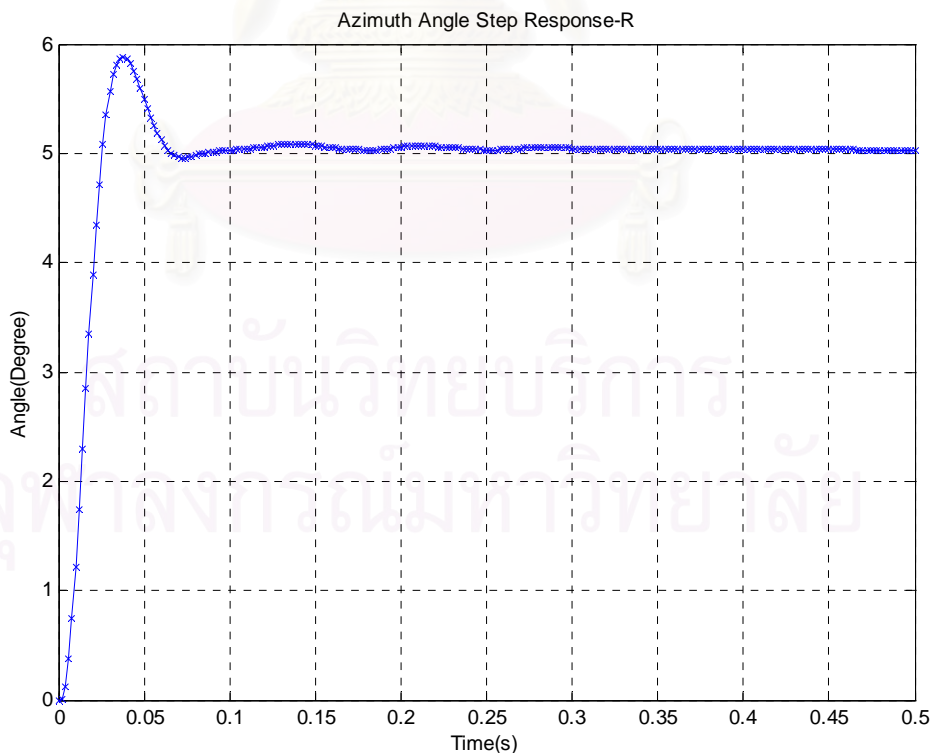
ลักษณะของการตอบสนองของระบบได้คือ

1. ลูบตำแหน่งมุม Azimuth-Module-R: settling time (t_s) = 0.06 sec, rise time (t_r) = 0.018 sec, % overshoot = 17.6% และ ค่า steady-state error < 0.1°
2. ลูบตำแหน่งมุม Altitude- Module-R: settling time (t_s) = 0.044 sec, rise time (t_r) = 0.006 sec % overshoot = 14.91% และค่า steady-state error = 0.1°
3. ลูบตำแหน่งมุม Azimuth- Module-L: settling time (t_s) = 0.06 sec, rise time (t_r) = 0.016 sec, % overshoot = 17.62% และ ค่า steady-state error < 0.1°
4. ลูบตำแหน่งมุม Altitude- Module-L: settling time (t_s) = 0.032 sec, rise time (t_r) = 0.006 sec % overshoot = 5.986% และค่า steady-state error = 0.1°

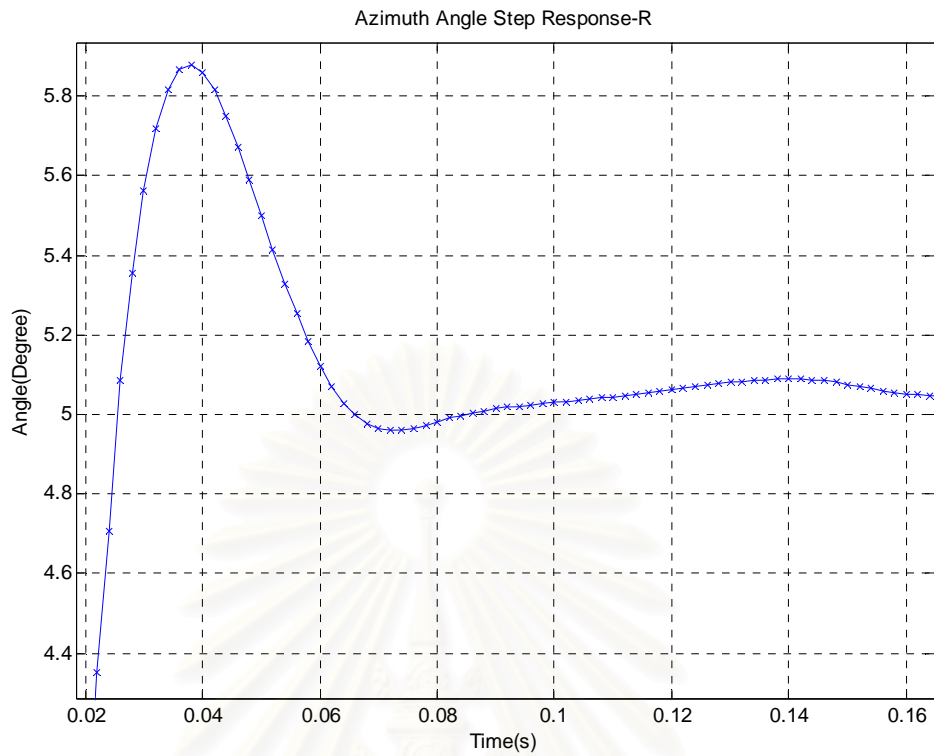
ระบบควบคุมแบบ PD ที่ใช้ในรูปแบบ

$$T = K_p(\theta_d - \theta) + K_d(\dot{\theta}_d - \dot{\theta})$$

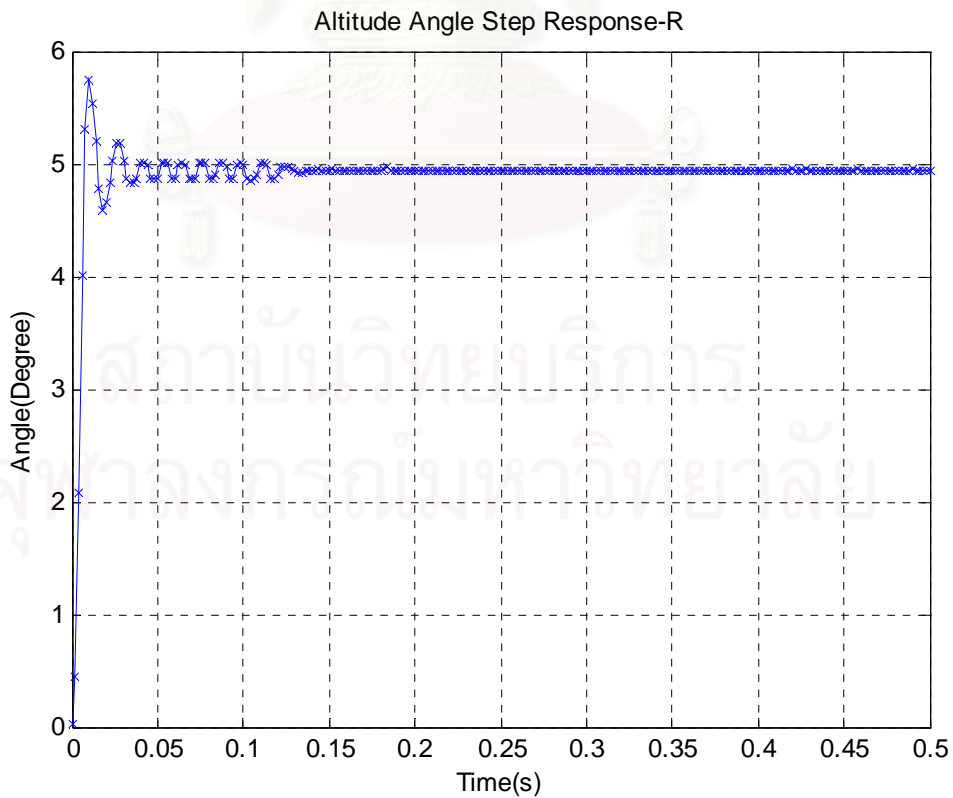
เมื่อ T คือค่าแรงบิดที่ต้องการ, K_p คือค่า proportional gain, θ_d คือค่ามุมที่ต้องการ, θ คือค่ามุมที่วัดได้, K_d คือค่า Derivative gain, ค่าที่ใช้ใน Azimuth PD Controller คือ $K_p = 0.095$, $K_d = 0.001$ และ ค่าที่ใช้ใน Altitude PD Controller คือ $K_p = 0.1$, $K_d = 0.0004$, (sampling time = 0.001 sec)



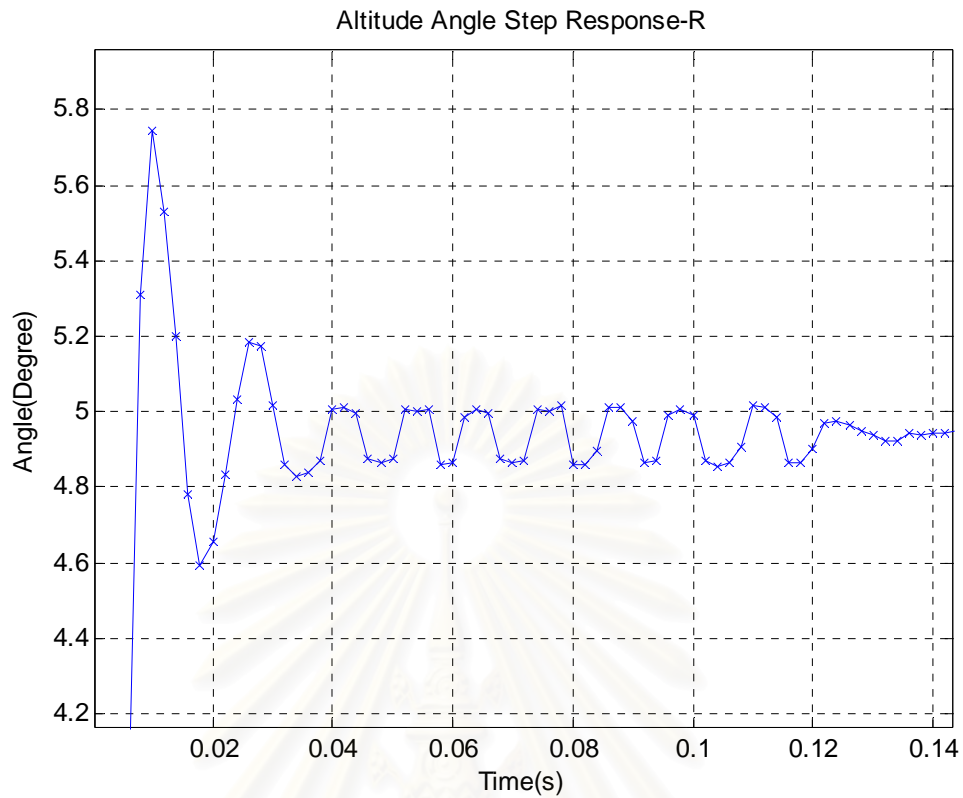
รูปที่ 8.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth Module-R



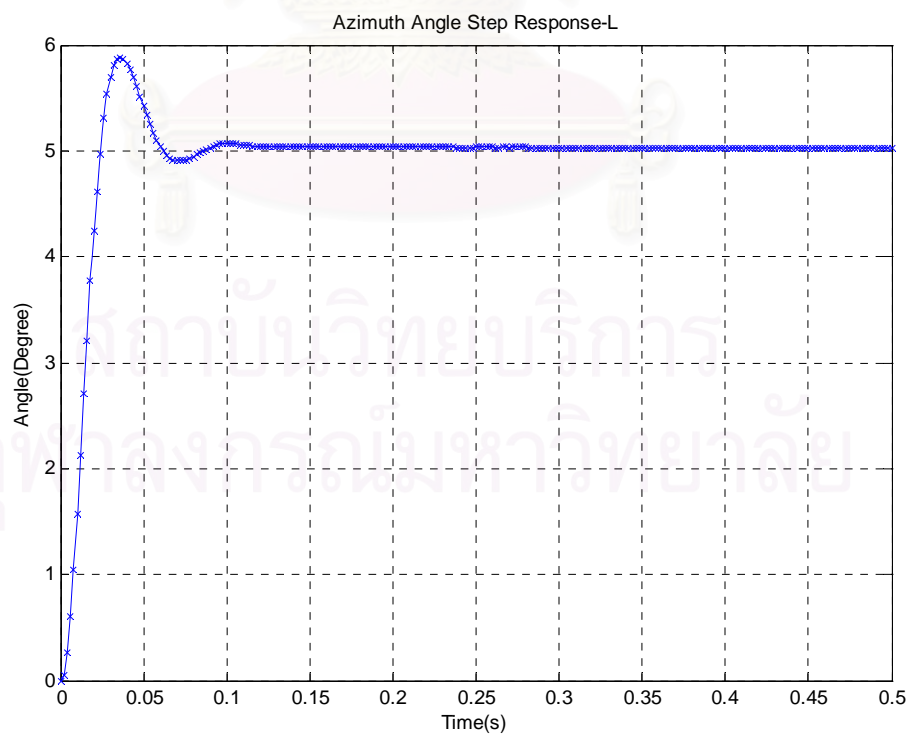
รูปที่ 8.3 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth Module-R (รูปขยายของรูปที่ 8.2)



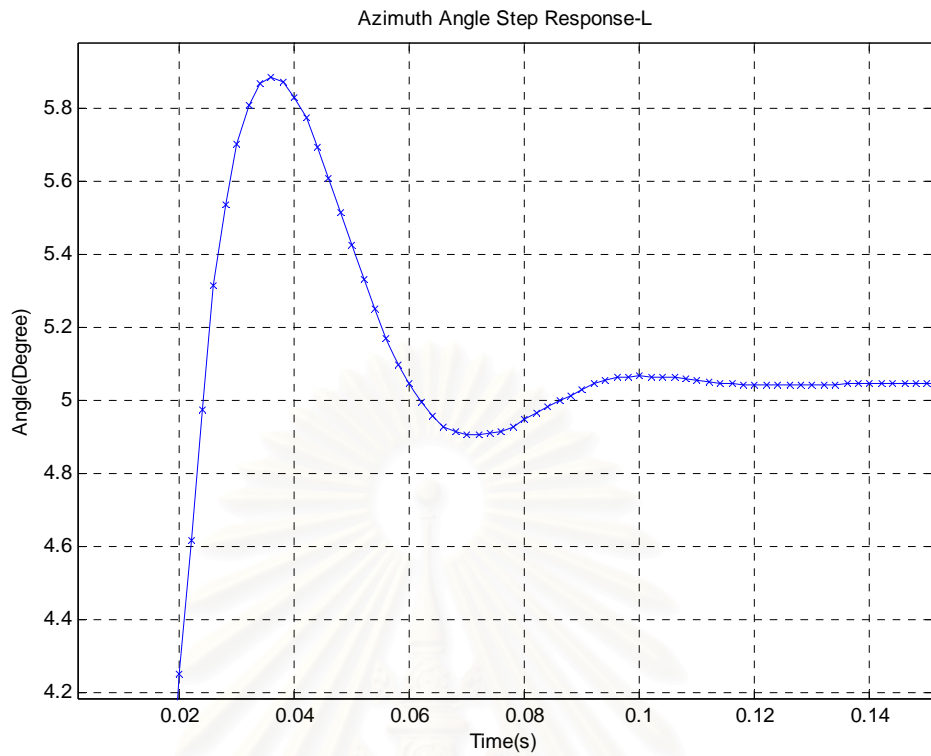
รูปที่ 8.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude Module-R



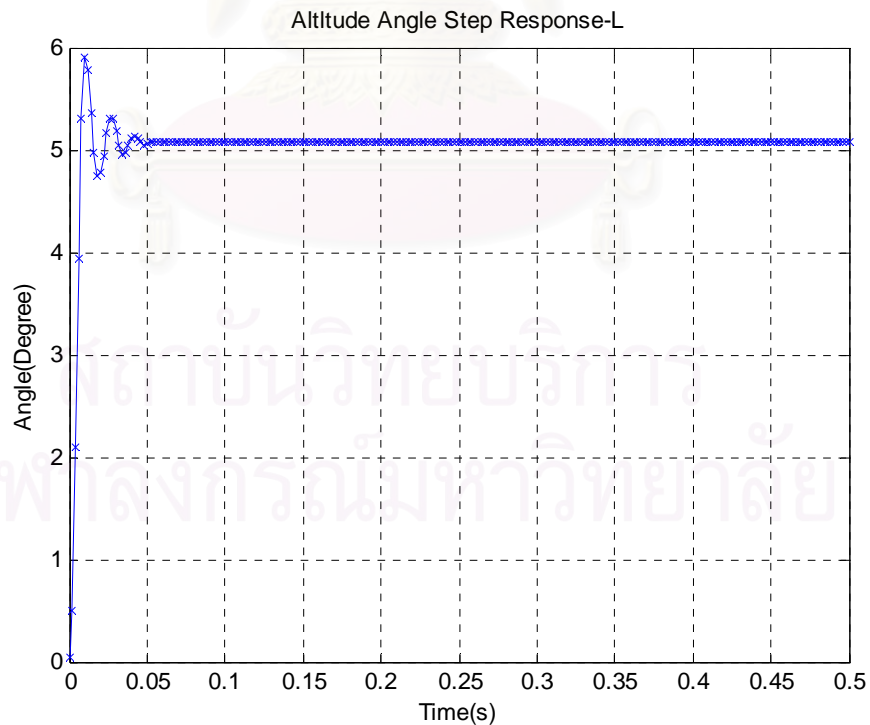
รูปที่ 8.5 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude Module-R (รูปขยายของรูปที่ 8.4)



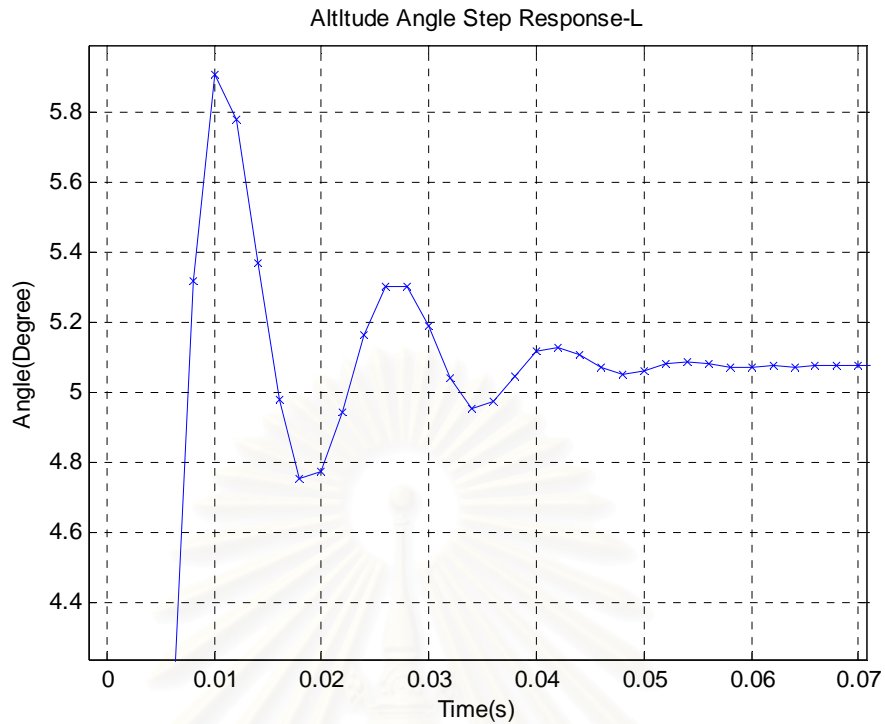
รูปที่ 8.6 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth Module-L



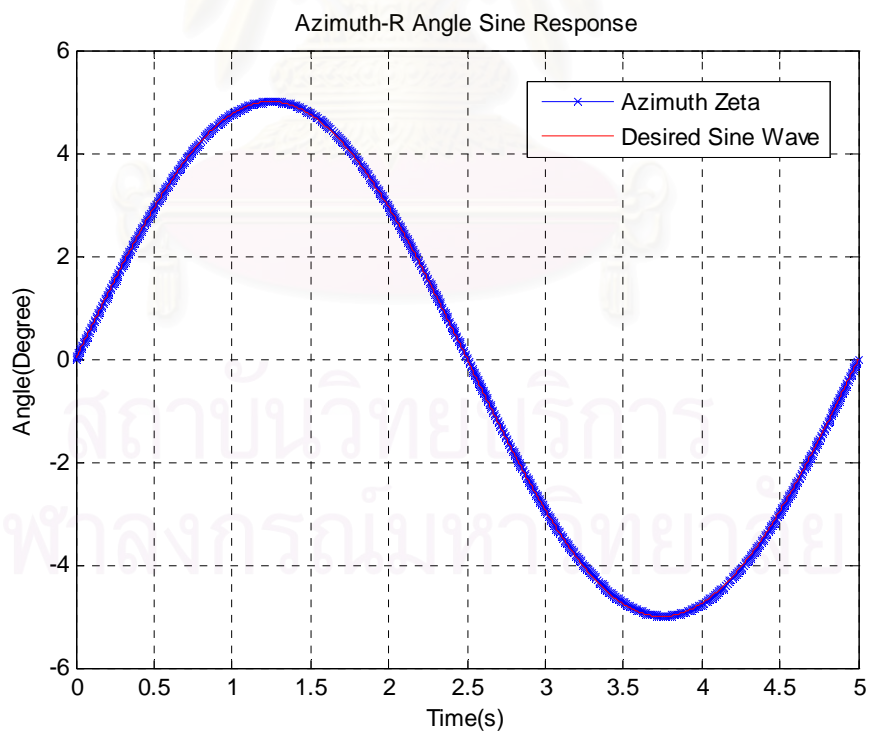
รูปที่ 8.7 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Azimuth Module-L (รูปขยายของรูปที่ 8.6)



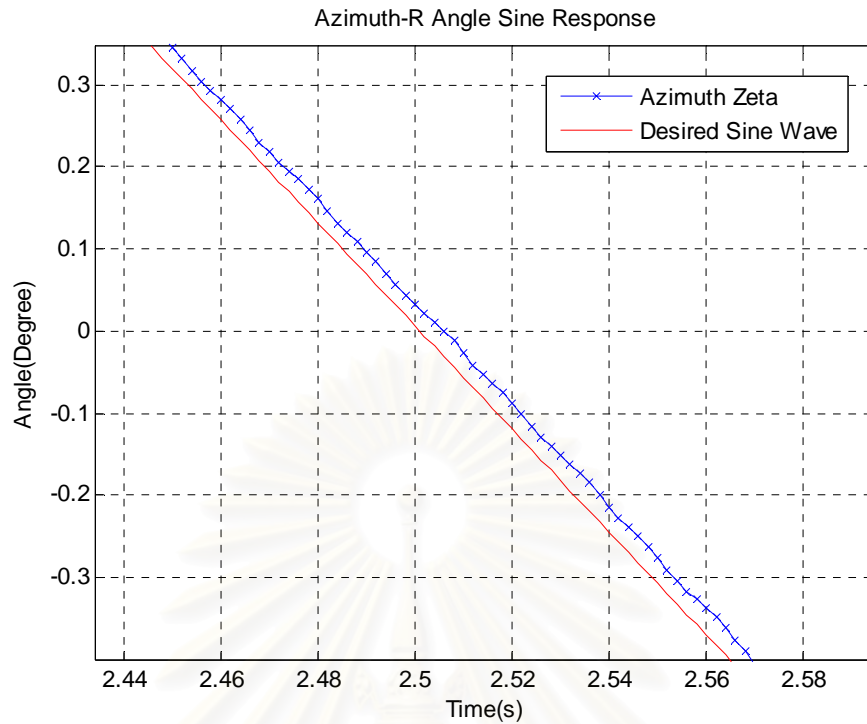
รูปที่ 8.8 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude Module-L



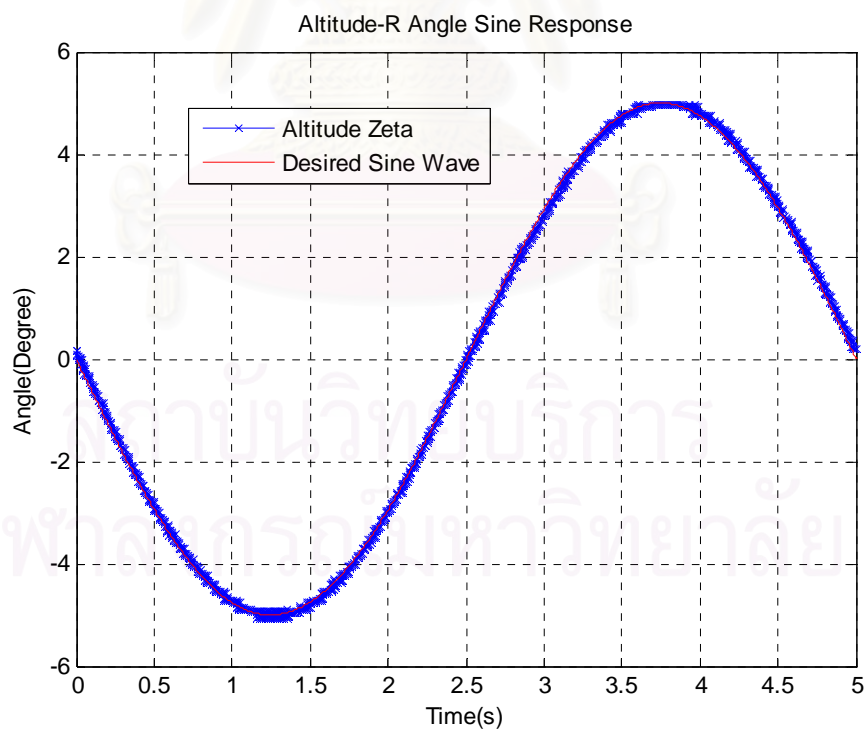
รูปที่ 8.9 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 5 องศาของแกน Altitude Module-L (รูปขยายของรูปที่ 8.8)



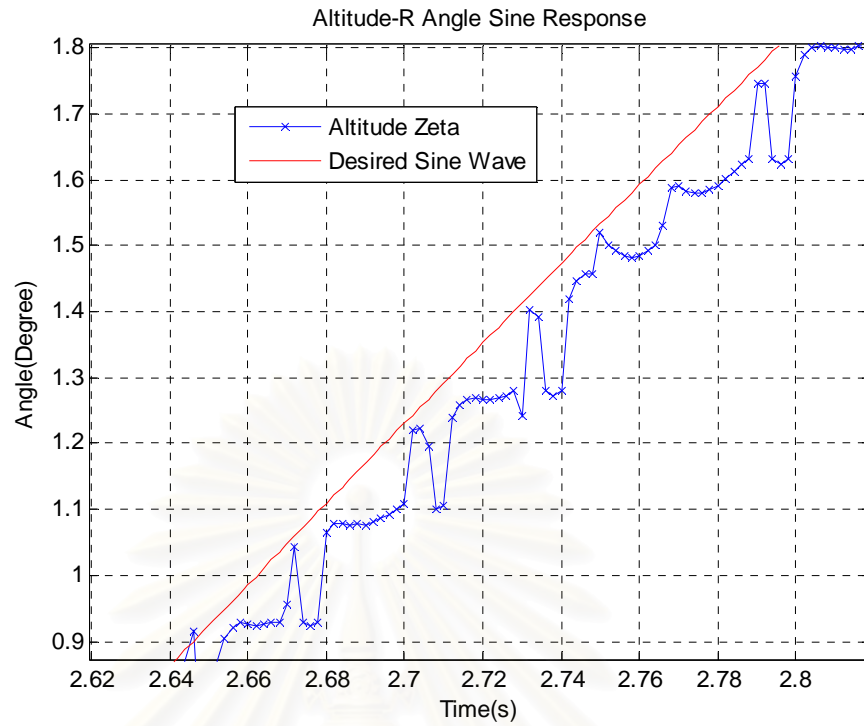
รูปที่ 8.10 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Azimuth Module-R



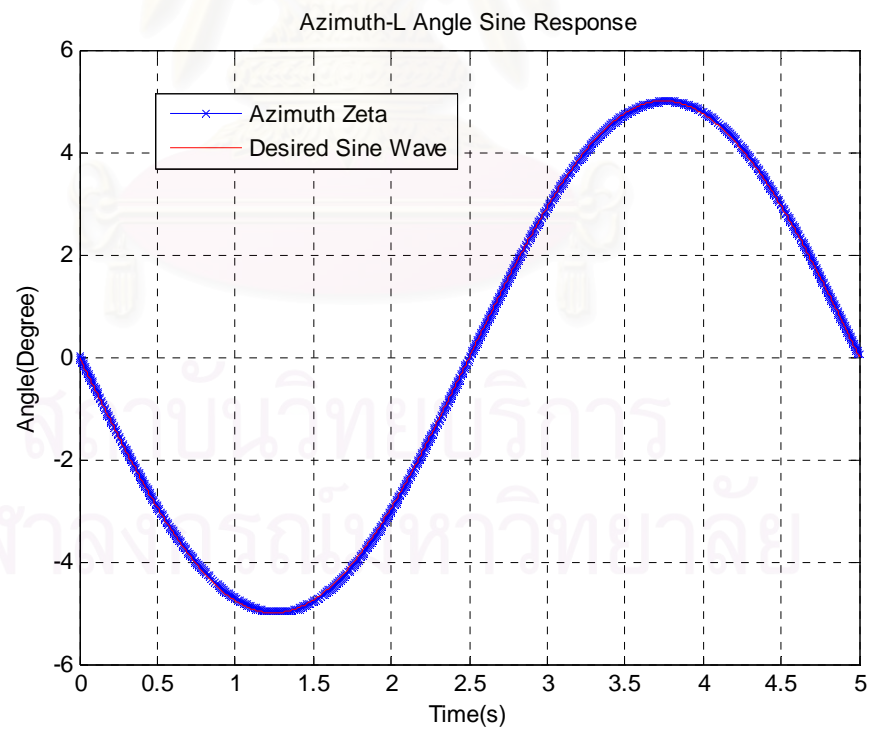
รูปที่ 8.11 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Azimuth Module-R (รูปขยายของรูปที่ 8.10)



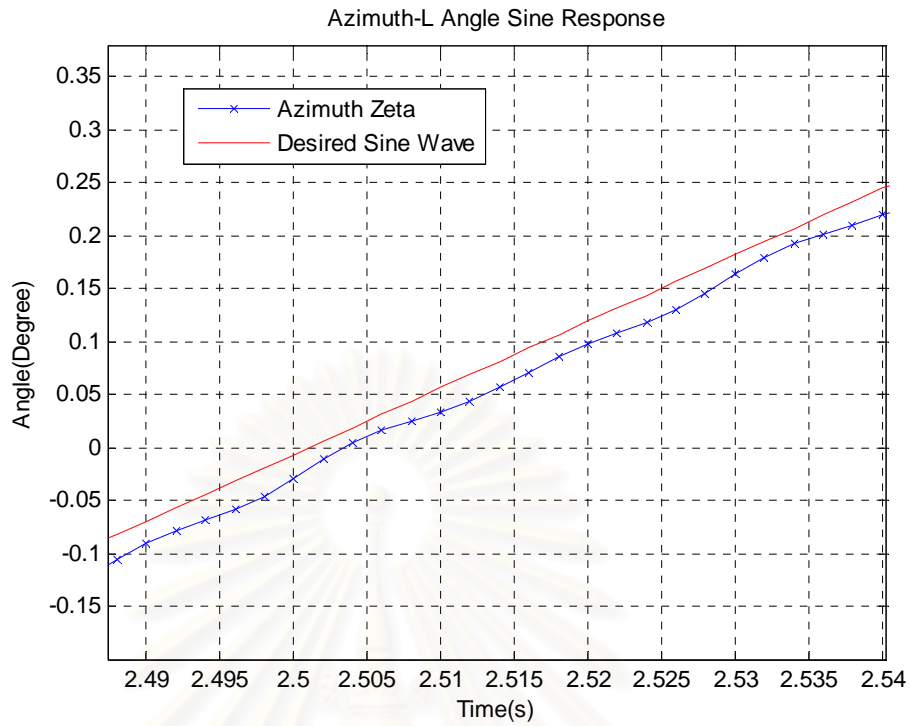
รูปที่ 8.12 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Altitude Module-R



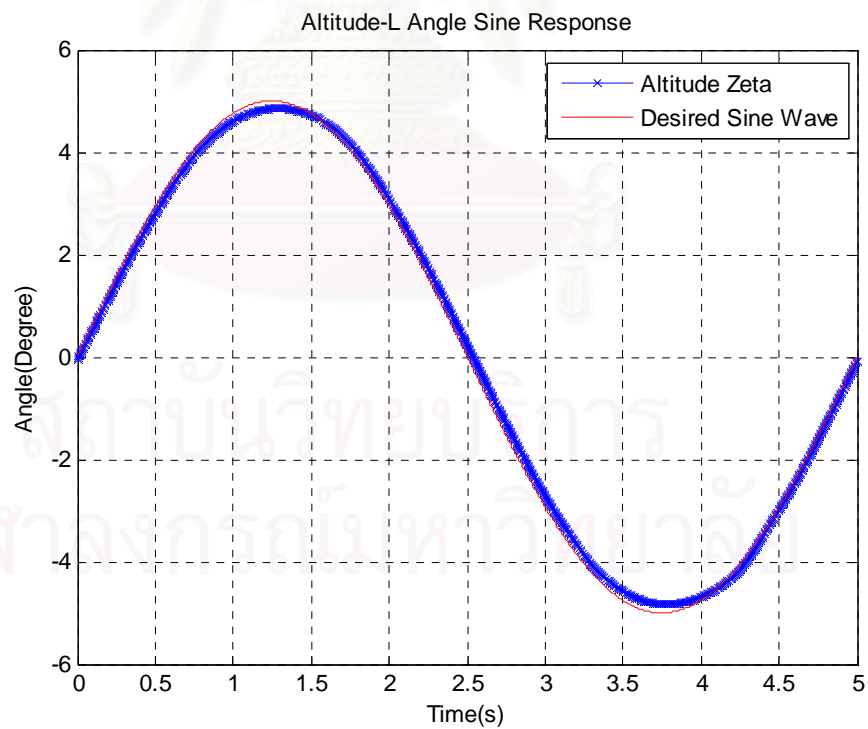
รูปที่ 8.13 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Altitude Module-R (รูปขยายของรูปที่ 8.12)



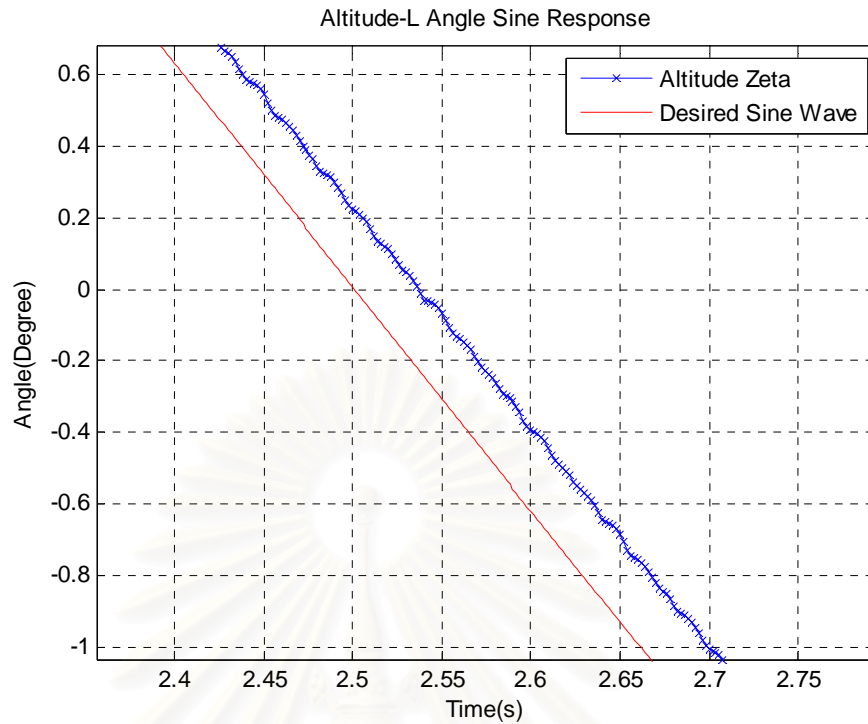
รูปที่ 8.14 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Azimuth Module-L



รูปที่ 8.15 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Azimuth Module-L (รูปขยายของรูปที่ 8.14)



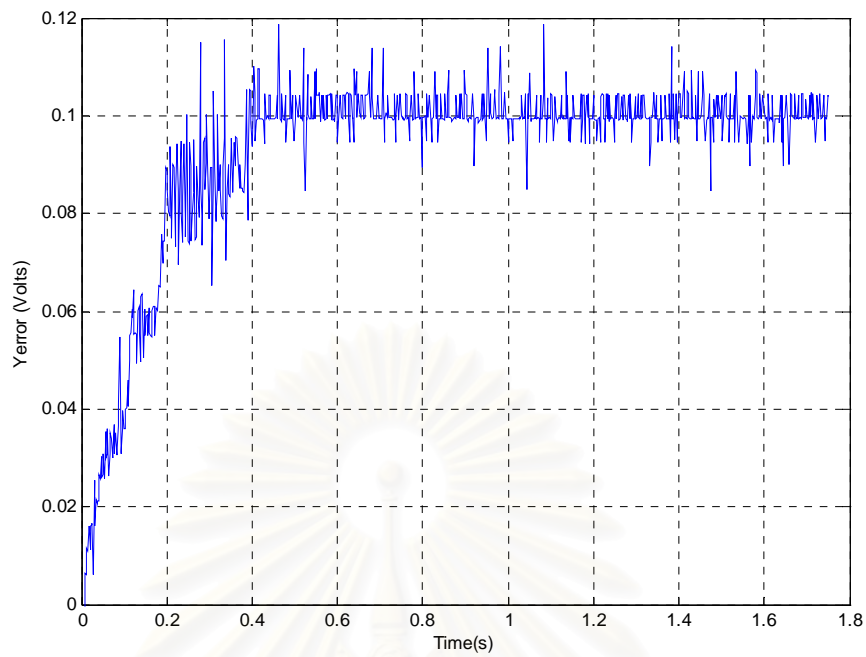
รูปที่ 8.16 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา $f = 0.2$ Hz ของแกน Altitude Module-L



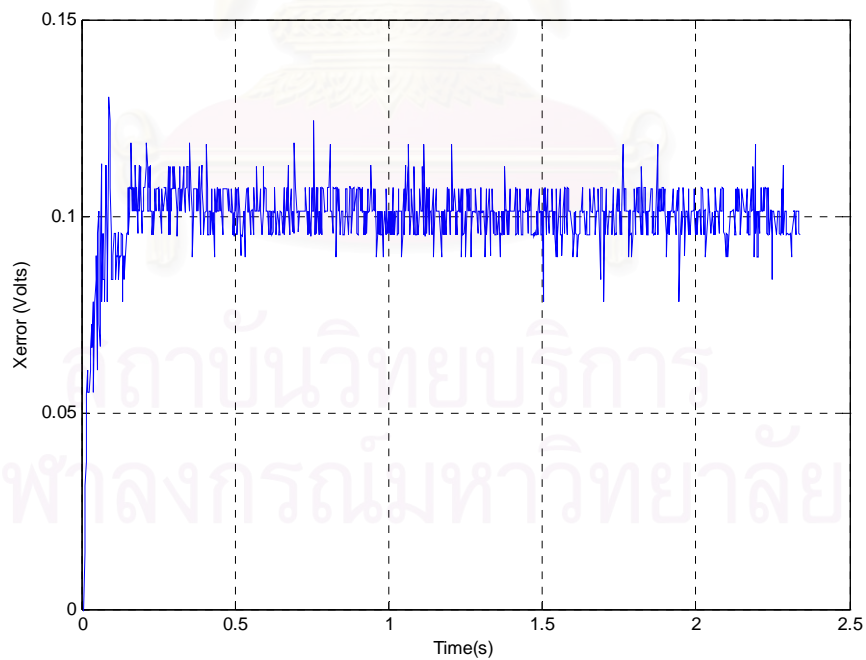
รูปที่ 8.17 ผลตอบสนองต่อสัญญาณไซน์ Amplitude = 5 องศา 20 f = 0.2 Hz ของแกน Altitude Module-L (รูปขยายของรูปที่ 8.16)

8.2.2 ผลการปรับระบบควบคุมลูปควบคุมตำแหน่งแสงบน PSD (ลูปนอก)

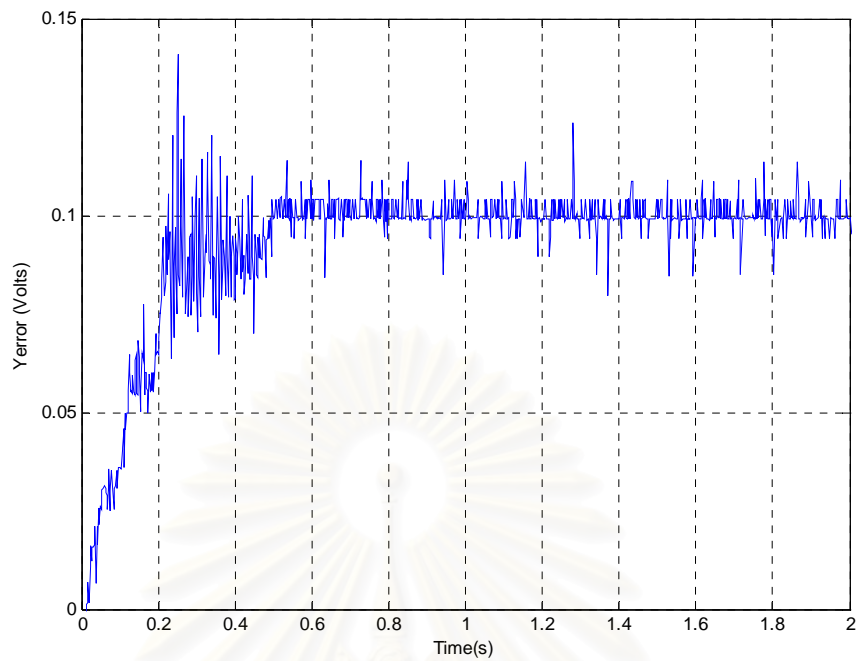
ในส่วนนี้เป็นการปรับแต่งลูปนอกต่อจากในส่วนที่แล้ว โดยการปรับนี้จัดวาง Retro-reflector ที่ระยะ ประมาณ 25cm และจัดวางให้ลำแสงเลเซอร์ที่สะท้อนกลับมาจาก Retro-reflector ตกอยู่ที่กึ่งกลาง PSD พอดี (อ่านค่าตำแหน่งตกได้ 0 Volts) จากนั้นให้สัญญาณตำแหน่ง x_{error} และ y_{error} ตกกระทบบที่ที่ต้องการเป็นค่าคงที่เท่ากับ 0.1 โวลต์ หรือเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ไปของ Retro-reflector เป็นระยะประมาณ 0.25 mm รูปที่ 8.18-รูปที่ 8.21 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ของตำแหน่งตกกระทบบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการ ของแกน Azimuth และ ของแกน Altitude หัวขวาและซ้ายตามลำดับ ตามลำดับ



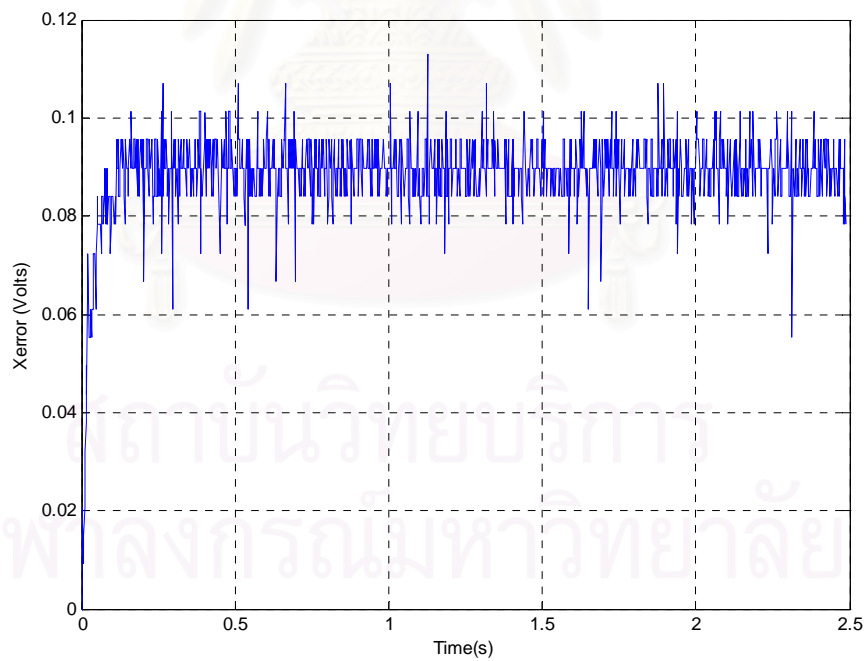
รูปที่ 8.18 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการ ของแกน Azimuth Module-R



รูปที่ 8.19 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการ ของแกน Altitude Module-R



รูปที่ 8.20 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการ ของแกน Azimuth Module-L



รูปที่ 8.21 ผลตอบสนองต่อสัญญาณคงที่ 0.1 Volts ของตำแหน่งตกกระทบของแสงเลเซอร์ที่ต้องการ ของแกน Altitude Module-L

จากการปรับค่าพบว่าระบบควบคุมที่เหมาะสมคือแบบ PI (Proportional and Integral) โดยจากการปรับได้ลักษณะของการตอบสนองของระบบคือ

1. ลูบตำแหน่งมุม Azimuth Module-R : settling time (t_s) = 0.5 sec, rise time (t_r) = 0.3 sec, % overshoot = 0% และ ค่า steady-state error = 0 volts
2. ลูบตำแหน่งมุม Altitude Module-R: settling time (t_s) = 0.25 sec, rise time (t_r) = 0.1 sec % overshoot = 0% และค่า steady-state error = 0 volts
3. ลูบตำแหน่งมุม Azimuth Module-L: settling time (t_s) = 0.5 sec, rise time (t_r) = 0.3 sec, % overshoot = 25% และ ค่า steady-state error = 0 volts
4. ลูบตำแหน่งมุม Altitude Module-L: settling time (t_s) = 0.25 sec, rise time (t_r) = 0.1 sec % overshoot = 0% และค่า steady-state error = 0.05 volts

ระบบควบคุมแบบ PI ที่ใช้อยู่ในรูป

$$T = K_p(\theta_d - \theta) + K_i D(z)(\theta_d - \theta)$$

เมื่อ T คือค่าแรงบิดที่ต้องการ, K_p คือค่า proportional gain, θ_d คือค่ามุมที่ต้องการ, θ คือค่ามุมที่วัดได้, K_i คือค่า Integral, $D(z) = 1/(z-1)$ เป็น ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้ในการอินทิเกรตในระบบแบบ digital ค่าที่ใช้ใน Azimuth PI Controller คือ $K_p = 0.75$, $K_i = 0.2$ และ ค่าที่ใช้ใน Altitude PI Controller คือ $K_p = 0.5$, $K_i = 0.2$

8.3 ความสามารถในการติดตาม Retro-reflector

ในส่วนนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนย่อย โดยสองส่วนแรกเป็นการวัดความเร็วในทีละแกนคือ แกน Azimuth และ Altitude ซึ่งทำการวัดที่ระยะ 0.5 เมตร และส่วนที่สองเป็นการแสดงความสามารถของ LTS ในการติดตาม Retro-reflector ทั้งสองแกนพร้อมๆกัน

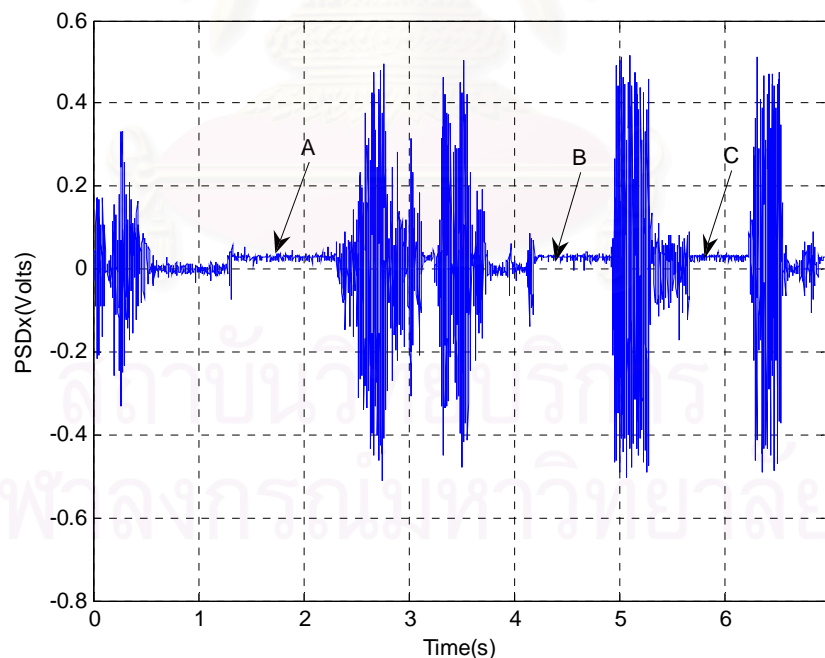
8.3.1 ความเร็วในการติดตามที่ระยะ 1 m

ในส่วนนี้แสดงการติดตาม Retro-reflector ที่ระยะ 1 m โดยที่ค่ามุม Azimuth มีค่าประมาณ 0 องศา (วัดที่กระจกโดยเริ่มจาก Beam Splitter), และมุม Altitude (วัดขึ้นจากระนาบในแนวระดับ) ประมาณ 30 องศา ในการทดสอบนั้นใช้ Retro-reflector ขนาดหน้าเปิดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.875 นิ้ว เนื่องจากระยะของ Retro-reflector จากกระจกติดตามมีผลต่อระบบควบคุม ในการทดสอบนี้ค่าเกนในรูป PI (ลูบนอก) จึงต้องลดลงเพื่อคงลูบเกนให้คงที่ โดยในการทดสอบนี้ ค่าเกนได้ลดลง 6 เท่า (คูณด้วย 0.1667)

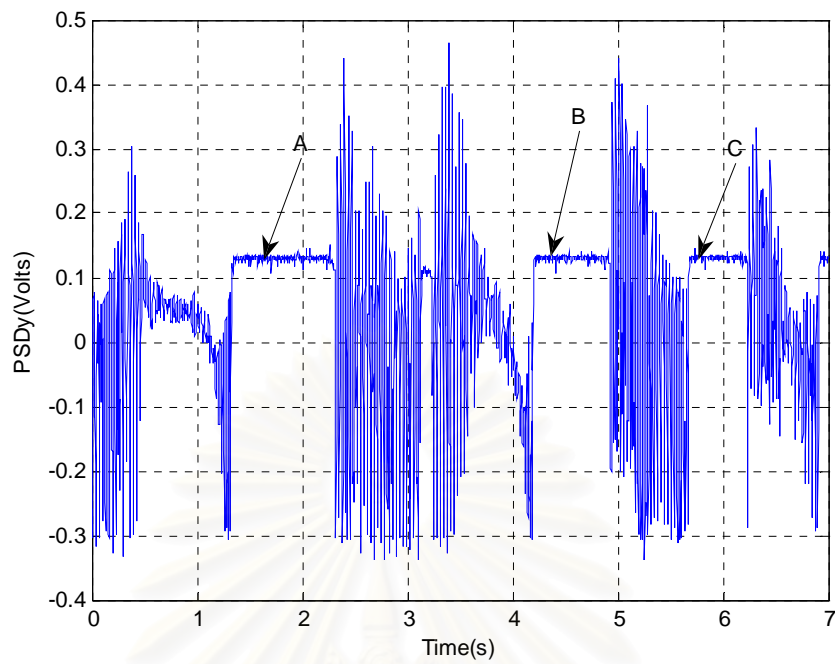
การทดสอบความเร็วนี้ใช้การขยับ Retro-reflector โดยใช้มือของผู้ทดสอบ โดยในการทดสอบใช้การขยับในแนวแกน Azimuth และ Altitude ที่ละแนวเพื่อทดสอบหาความเร็วสูงสุดในแต่ละแกน โดยความเร็วสูงสุดสามารถหาได้จากการหาความชันของกราฟของมุมที่ตำแหน่งเวลาก่อนที่แสงเลเซอร์ตกออกจาก PSD

ก. ความเร็วในการติดตามในแนว Azimuth ของ LTS Module-R

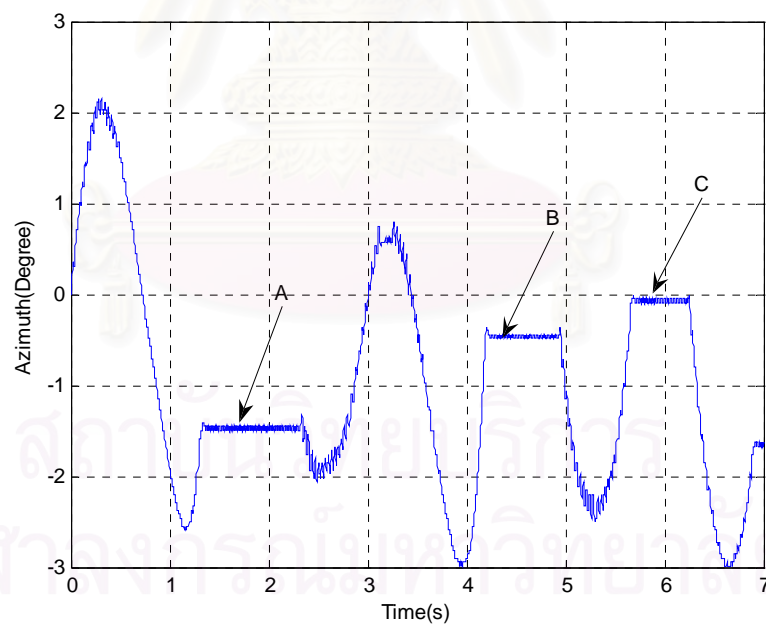
ความเร็วในการติดตามในแนว Azimuth ที่ระยะ 1 เมตร คือ 15.08 cm/sec โดยในรูปที่ 8.22, รูปที่ 8.23 และ รูปที่ 8.24 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน x_{error} , y_{error} และ ค่ามุม Azimuth ตามลำดับ ในรูปทั้งสามจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระบบติดตามไม่สามารถติดตามกระจกได้ที่ 3 ตำแหน่งเวลา ดังแสดงในรูปที่ 8.22 และรูปที่ 8.23 คือจุด A, B, และ C และในรูปที่ 8.24 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าลำแสงเลเซอร์ได้ตกออกจาก PSD แล้วที่ตำแหน่งทั้งสามนี้ จากการคำนวณค่าความชันของกราฟในรูปที่ 8.24 จะได้ความเร็วการหมุนของมุม Azimuth ประมาณ -8.31, 9.51, 8.14 องศาต่อวินาที ที่จุด A, B, และ C ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยคือ 8.65 องศาต่อวินาที หรือประมาณ 15.08 cm/s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยมีข้อสังเกตว่าค่าความเร็วที่ได้เป็นค่าติดลบทั้งหมด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตำแหน่งของเลเซอร์นั้นเริ่มที่ตำแหน่งไม่กลาง PSD



รูปที่ 8.22 ค่าแรงดันไฟฟ้า PSD ในแกน x ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m



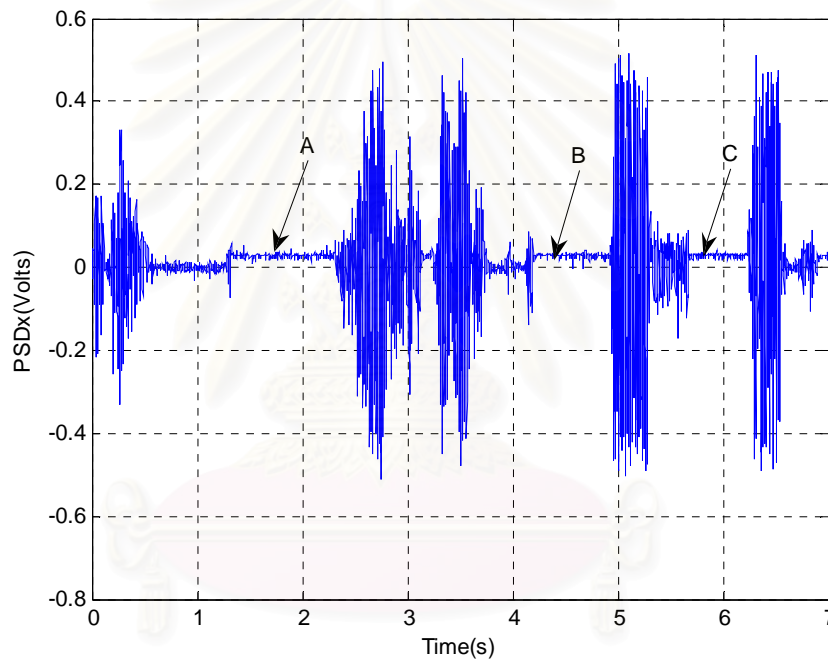
รูปที่ 8.23 ค่าแรงดันไฟฟ้า PSD ในแกน y ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m



รูปที่ 8.24 ค่ามุม Azimuth ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

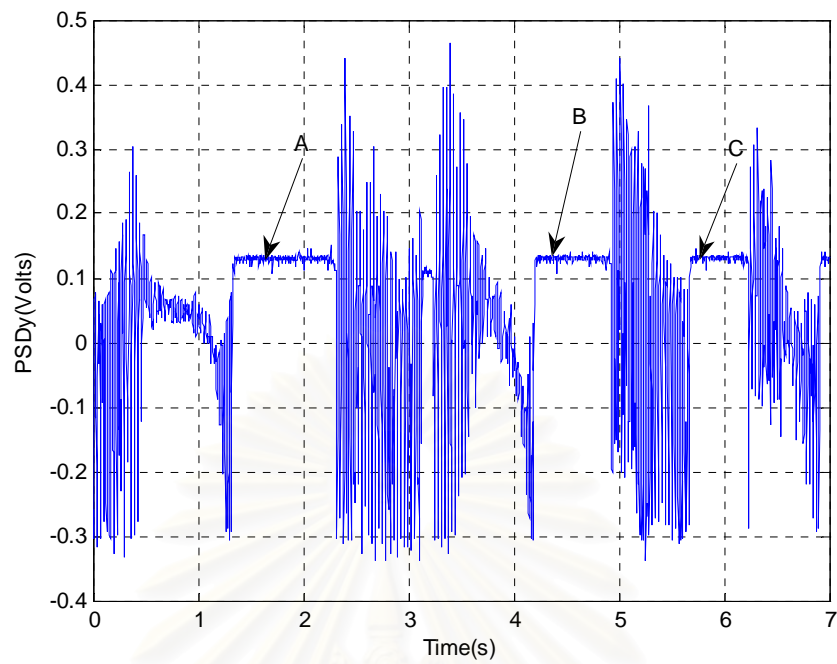
ข. ความเร็วในการติดตามในแนว Altitude ของ LTS Module-R

ความเร็วในการติดตามในแนว Altitude ที่ระยะ 0.5 เมตร คือ 12.06 cm/sec โดยในรูปที่ 8.25, รูปที่ 8.26 และรูปที่ 8.27 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน x_{error} , y_{error} และ ค่ามุม Altitude ตามลำดับ ในรูปทั้งสามจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระบบติดตามไม่สามารถติดตามกระจกได้ที่ 3 ตำแหน่งเวลา ดังแสดงในรูปที่ 8.25 และรูปที่ 8.26 คือจุด A, B, และ C และในรูปที่ 8.27 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าลำแสงเลเซอร์ได้ตกออกจาก PSD แล้วที่ตำแหน่งทั้งสามนี้ จากการคำนวณค่าความชันของกราฟในรูปที่ 8.27 จะได้ความเร็วการหมุนของมุม Altitude ประมาณ 6.31, 8.14, 6.31 องศาต่อวินาที ที่จุด A, B, และ C ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยคือ 6.92 องศาต่อวินาที หรือประมาณ 12.06 cm/s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

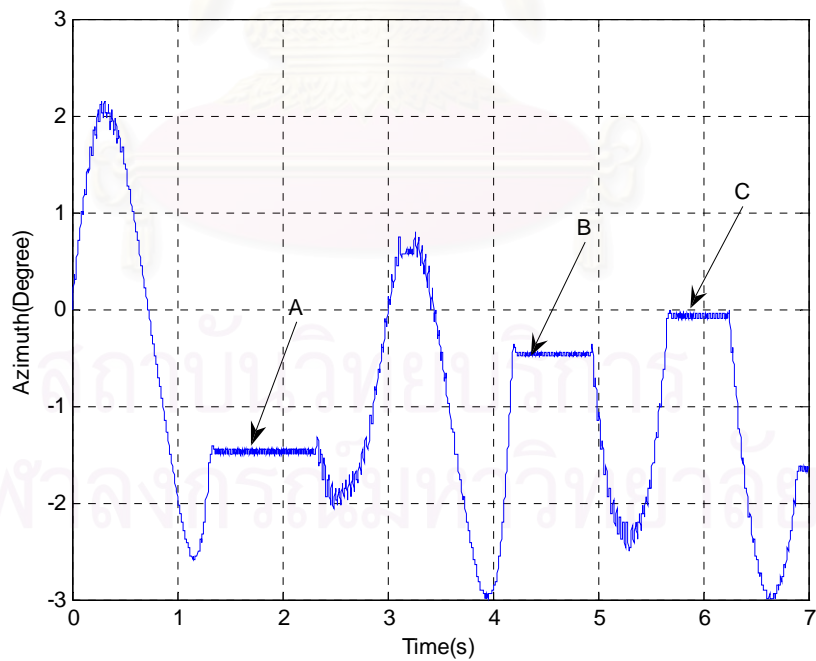


รูปที่ 8.25 ค่าแรงดันไฟฟ้าใน PSD แกน x ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



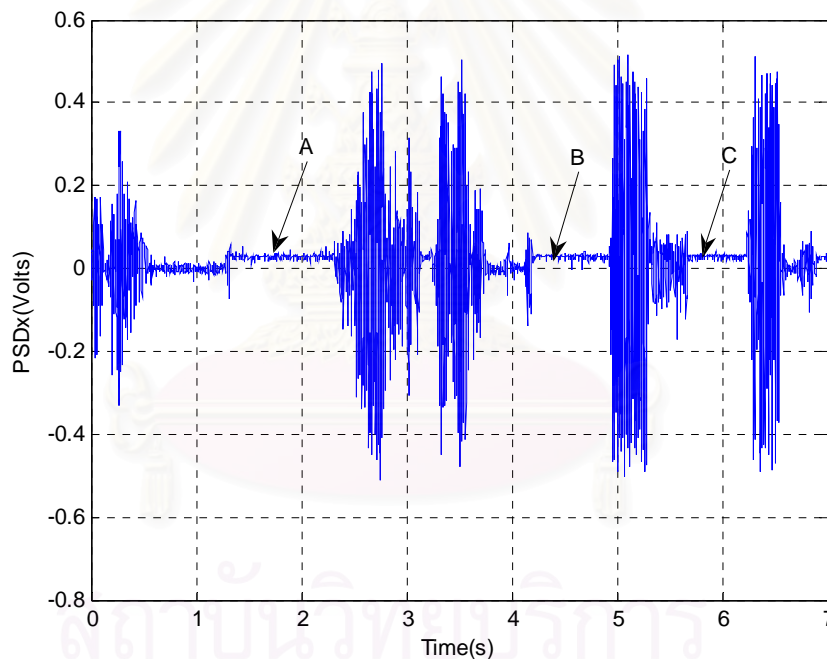
รูปที่ 8.26 ค่าแรงดันไฟฟ้าใน PSD แกน y ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m



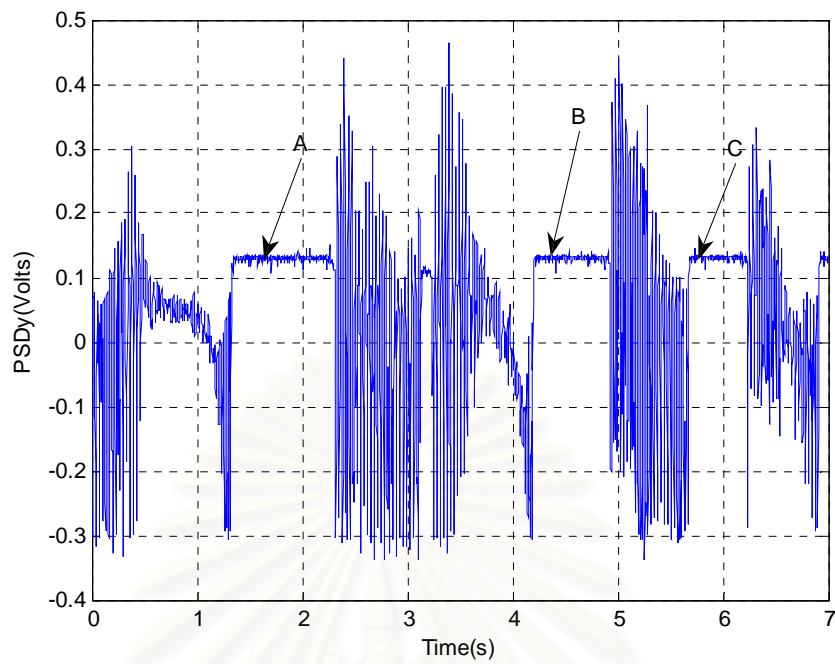
รูปที่ 8.27 ค่ามุม Altitude ของ LTS Module-R ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

ค. ความเร็วในการติดตามในแนว Azimuth ของ LTS Module-L

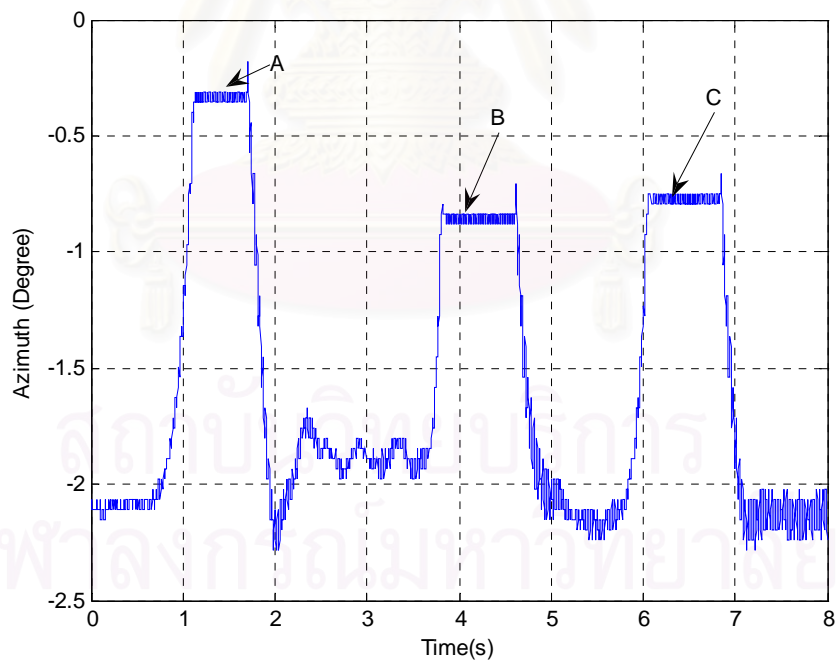
ความเร็วในการติดตามในแนว Azimuth ที่ระยะ 1 เมตร คือ 15.78 cm/sec โดยในรูปที่ 8.28, รูปที่ 8.29 และรูปที่ 8.30 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน x_{error} , y_{error} และ ค่ามุม Azimuth ตามลำดับ ในรูปทั้งสามจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระบบติดตามไม่สามารถติดตามกระจกได้ที่ 3 ตำแหน่งเวลา ดังแสดงในรูปที่ 8.28 และรูปที่ 8.29 คือจุด A,B, และ C และในรูปที่ 8.30 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าลำแสงเลเซอร์ได้ตกออกจาก PSD แล้วที่ตำแหน่งทั้งสามนี้ จากการคำนวณค่าความชันของกราฟในรูปที่ 8.30 จะได้ความเร็วการหมุนของมุม Azimuth ประมาณ -9.514, 8.14, 9.51 องศาต่อวินาที ที่จุด A, B, และ C ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยคือ 9.05 องศาต่อวินาที หรือประมาณ 15.78 cm/s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยมีข้อสังเกตว่าค่าความเร็วที่ได้เป็นค่าติดลบทั้งหมด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตำแหน่งของเลเซอร์นั้นเริ่มที่ตำแหน่งไม่กลาง PSD



รูปที่ 8.28 ค่าแรงดันไฟฟ้า PSD ในแกน x ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m



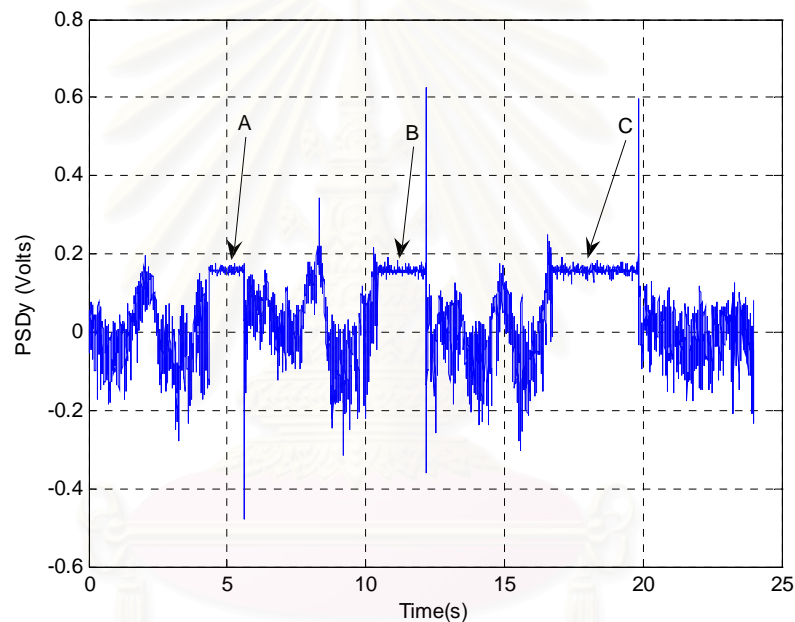
รูปที่ 8.29 ค่าแรงดันไฟฟ้า PSD ในแกน y ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m



รูปที่ 8.30 ค่ามุม Azimuth ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

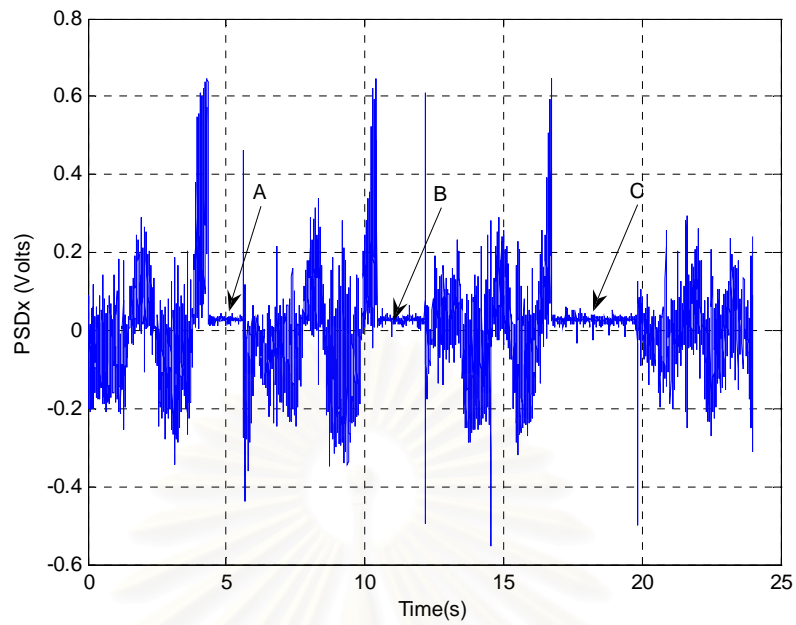
ง. ความเร็วในการติดตามในแนว Altitude ของ LTS Module-L

ความเร็วในการติดตามในแนว Altitude ที่ระยะ 1 เมตร คือ 12.52 cm/sec โดยในรูปที่ 8.31, รูปที่ 8.32 และรูปที่ 8.33 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้าในแกน x_{error} , y_{error} และ ค่ามุม Altitude ตามลำดับ ในรูปทั้งสามจะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าระบบติดตามไม่สามารถติดตามกระจกได้ที่ 3 ตำแหน่งเวลา ดังแสดงในรูปที่ 8.31 และรูปที่ 8.32 คือจุด A,B, และ C และในรูปที่ 8.33 จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าลำแสงเลเซอร์ได้ตกออกจาก PSD แล้วที่ตำแหน่งทั้งสามนี้ จากการคำนวณค่าความชันของกราฟในรูปที่ 8.33 จะได้ความเร็วการหมุนของมุม Altitude ประมาณ -6.51,-7.11, -9.14 องศาต่อวินาที ที่จุด A, B, และ C ตามลำดับ ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยคือ 7.18 องศาต่อวินาที หรือ ประมาณ 12.52 m/s ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

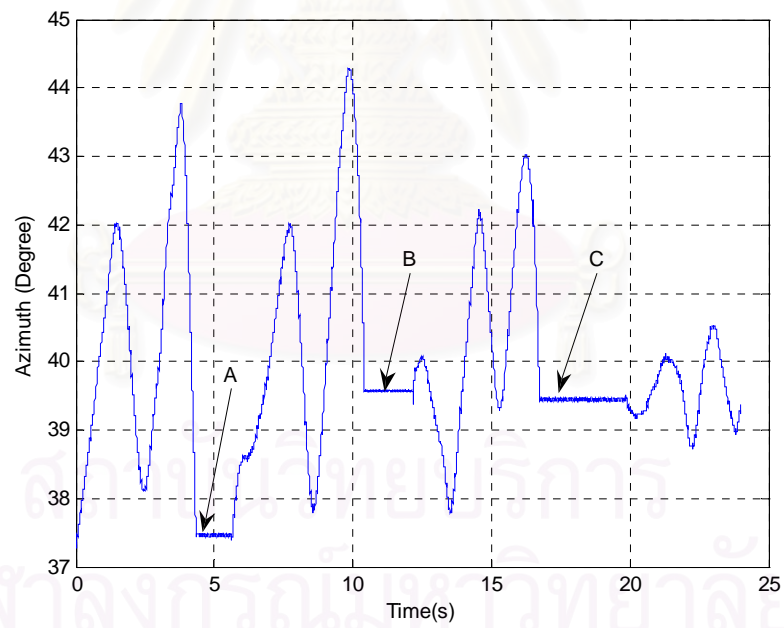


รูปที่ 8.31 ค่าแรงดันไฟฟ้าใน PSD แกน y ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 8.32 ค่าแรงดันไฟฟ้าใน PSD แกน x ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

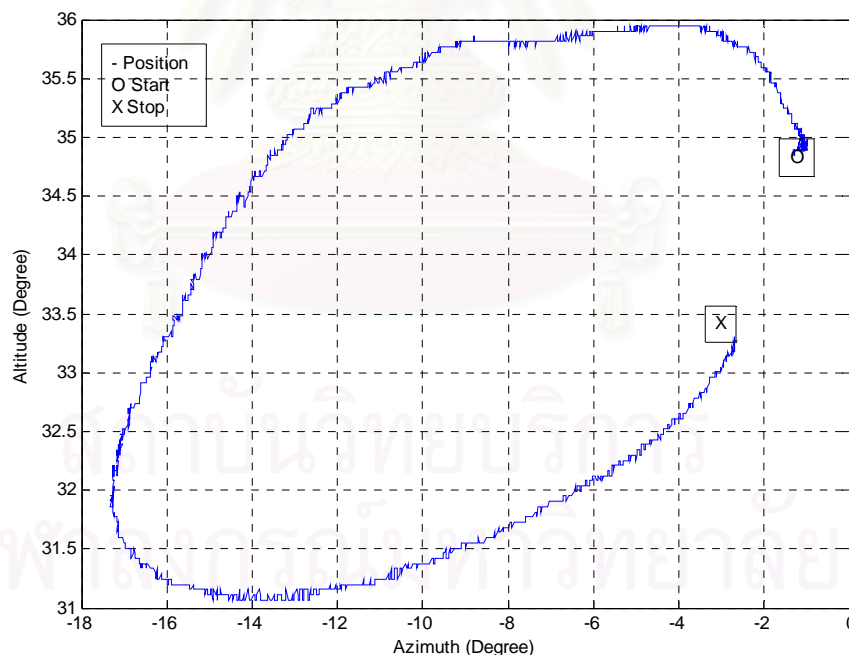


รูปที่ 8.33 ค่ามุม Altitude ของ LTS Module-L ในการทดสอบความเร็วที่ 1 m

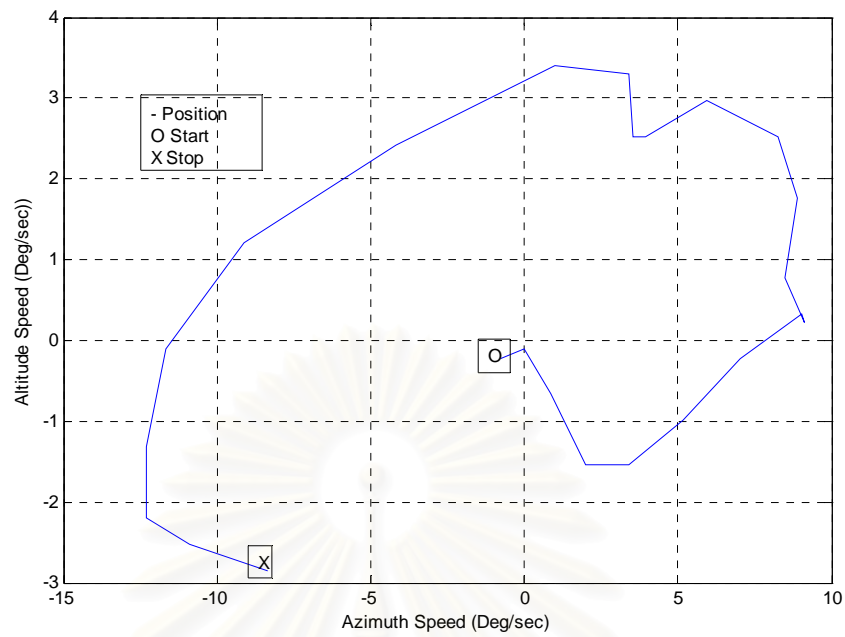
8.3.2 การติดตาม Retro-reflector ในสองแกนพร้อม ๆ กัน

ในส่วนนี้แสดงการติดตาม Retro-reflector ที่ระยะ 1 m โดยที่ค่ามุม Azimuth มีค่าประมาณ 0 องศา, และมุม Altitude ประมาณ 30 องศา โดยในการทดสอบนี้ ค่าเกนได้ลดลง 6 เท่า (คูณด้วย 0.1667) การทดสอบความเร็วนี้ใช้การขยับ Retro reflector โดยใช้มือของผู้ทดสอบ โดยในการทดสอบใช้การขยับในแนวแกน Azimuth และ Altitude พร้อม ๆ กันเพื่อทดสอบว่าระบบสามารถทำการติดตามได้ในทั้งสองแกนพร้อม ๆ กัน ผลการทดลองจะแสดงการความสามารถในการติดตามของ LTS ทั้ง Module-R และ Module-L

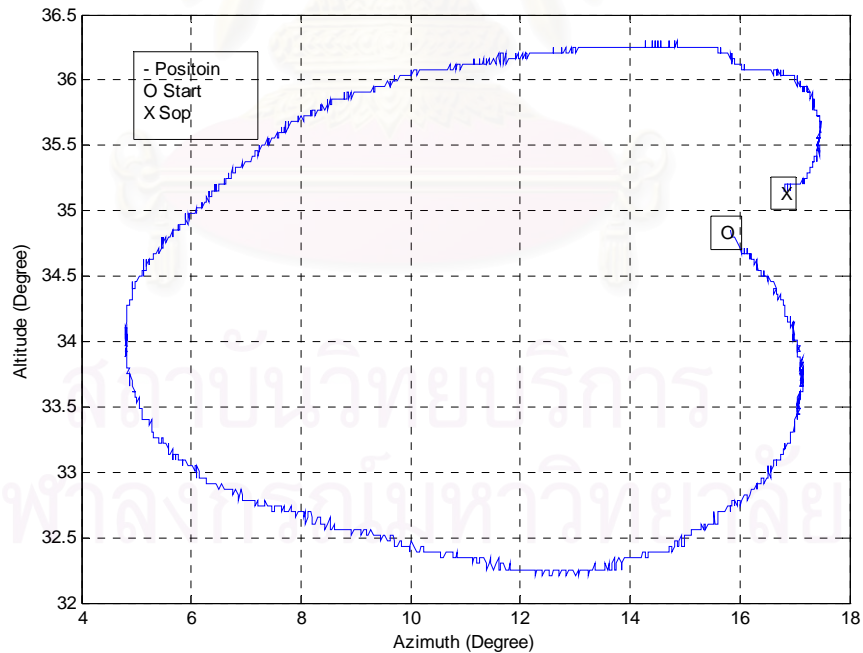
ในรูปที่ 8.34-รูปที่ 8.37 เป็นผลการทดลองที่ระบบสามารถติดตาม Retro-reflector ได้ตลอดการทดลอง โดยที่ในรูปที่ 8.34 และรูปที่ 8.36 แสดงตำแหน่งมุมทั้งสองของกระจกติดตามของ LTS Module-R และ LTS Module-L (0.001 sec sampling time) ในรูปที่ 8.35 และรูปที่ 8.37 แสดงค่าความเร็วของมุมทั้งสองนี้ โดยการคำนวณความเร็วโดยใช้วิธีการแบ่งย่อยแบบตรงกลาง (Central divided-difference) โดยใช้ข้อมูลทุกๆ 100 Sample time จากรูปจะเห็นว่าความเร็วสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 12.44 องศาต่อวินาทีหรือ 0.2171 เมตรต่อวินาทีซึ่งไม่มากกว่าค่าสูงสุดที่ได้ในหัวข้อที่แล้ว



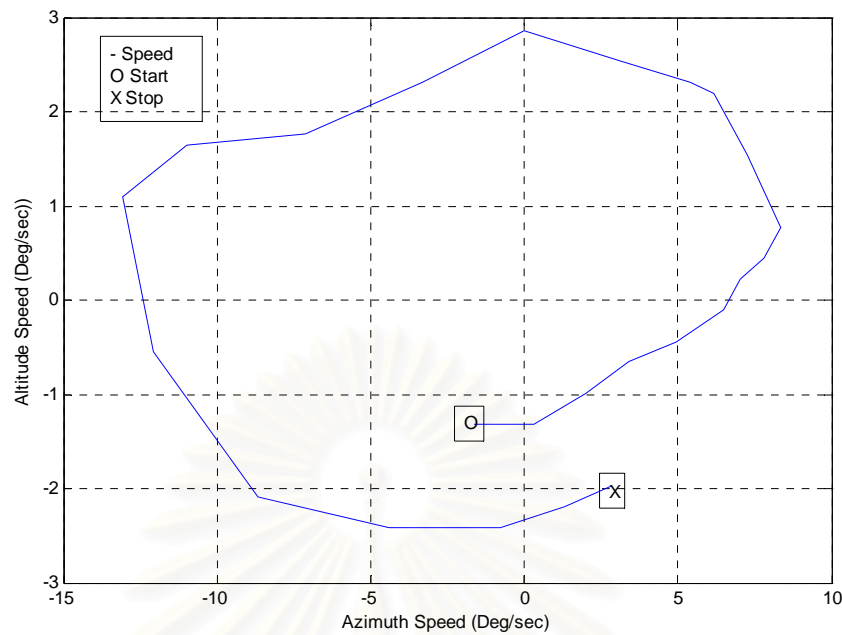
รูปที่ 8.34 ค่ามุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกนของ LTS Module-R



รูปที่ 8.35 ค่าความเร็วเชิงมุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกน ของ LTS Module-R



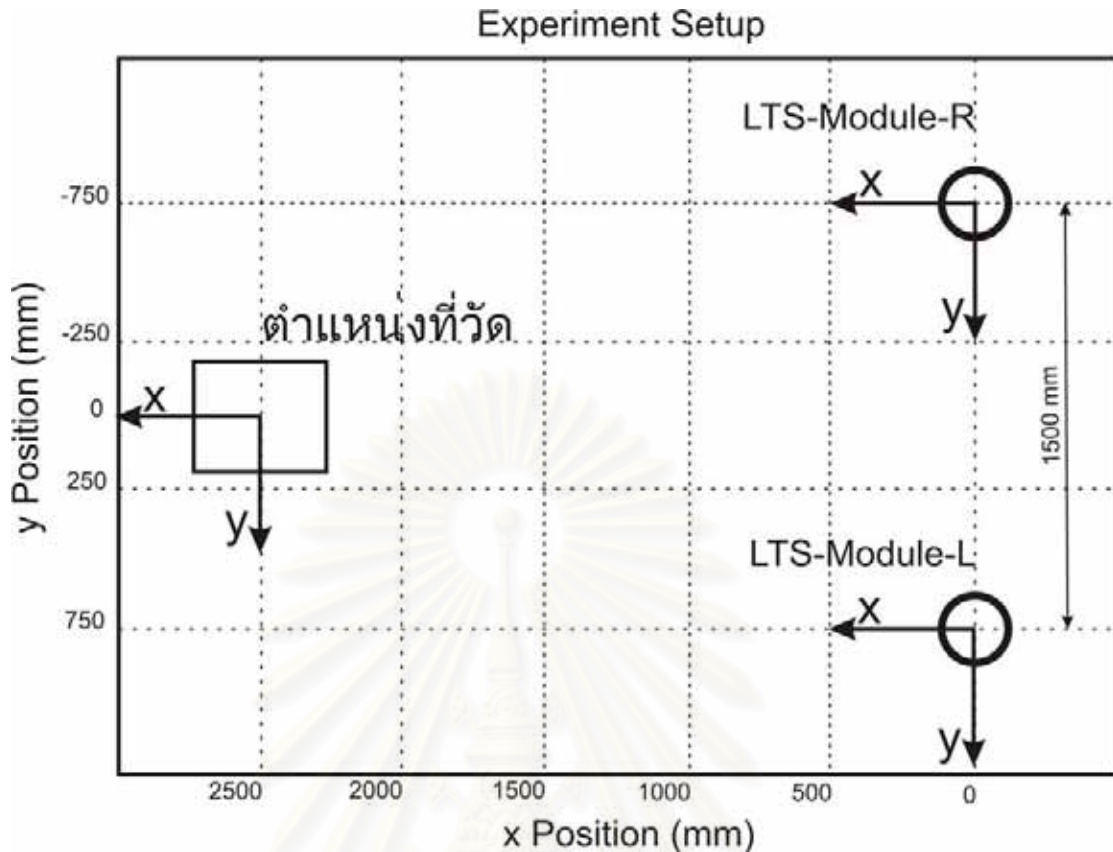
รูปที่ 8.36 ค่ามุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกนของ LTS Module-L



รูปที่ 8.37 ค่าความเร็วเชิงมุม Azimuth และ Altitude ในการทดสอบการติดตามทั้งสองแกนของ LTS Module-L

8.4 ความสามารถในการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector

ในส่วนนี้เป็นการแสดงผลการทดสอบการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector โดยใช้อุปกรณ์ LTS ที่สร้างขึ้น โดยการวัดนี้ใช้วิธีการ Triangulation โดยวัดมุมของแนวแสงเลเซอร์ที่ชี้ไปที่ Retro-reflector จาก LTS Module R และ LTS Module-L การทดสอบจะทำได้ตำแหน่งต่างๆ ทำที่ตำแหน่ง Retro-reflector ต่างๆ ที่ระยะจากกระจกติดตามของ LTS ประมาณ 2500 mm (2.5 m) โดยมีระยะห่างระหว่างตำแหน่ง LTS Module-R และ Module-L เท่ากับ 1500 mm ตำแหน่งของ Retro-reflector ที่ใช้ในการวัดใช้ การเลื่อนของโต๊ะ x-y ที่มีความละเอียดเท่ากับ 20 ไมครอน (0.02mm) โดยความแม่นยำ (accuracy) ประมาณไว้ที่ อย่างน้อย 10 เท่าคือ 0.2 mm ตลอดช่วงที่ใช้งาน ตำแหน่งของ Retro-reflector ทำการวัด นั้นเป็นการเลื่อนทีละ 20 mm ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา หนึ่งรอบ ที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีด้านยาวเท่ากับ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 8.38



รูปที่ 8.38 การจัดวางตำแหน่งต่างๆในการทดลองวัดตำแหน่ง Retro-reflector

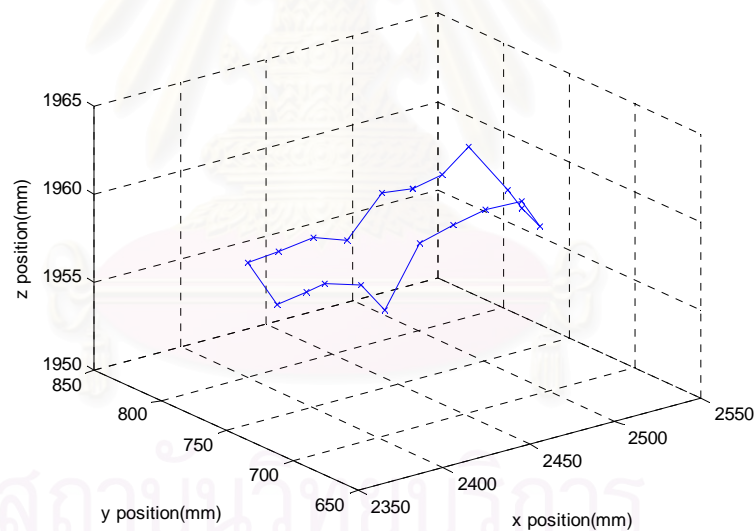
ข้อสำคัญในการทดสอบนี้คือ ในการทดสอบนี้มิได้มีการวัดระยะและแนวแกนต่างๆ ที่แม่นยำระหว่าง อุปกรณ์ LTS และ ตำแหน่งของRetro-reflector หรือ ตำแหน่งแนวในการเคลื่อนที่ของ Retro-reflector กับแนวการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ LTS ระยะที่ทราบแน่นอนคือระยะในการเคลื่อนที่ของ Retro-reflector เทียบการตำแหน่งแรกเท่านั้น ส่วนในการวัดตำแหน่งโดยใช้ LTS นั้นจะเป็นตำแหน่งของ Retro-reflector เทียบกับตำแหน่งของ LTS แต่ละModule และในแนวแกนของมอเตอร์ปรับระจกติดตามทั้งสอง ดังนั้นการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าจริง จะต้องมีการปรับ(translation and rotation) ของค่าจุดต่างๆที่วัดได้เทียบกับแกนของ LTS ลงไปบนแกนของโต๊ะ x-y แล้วจึงสามารถทำการเปรียบเทียบได้ แต่เนื่องจากค่าระยะและมุมต่างๆของแกนอ้างอิงบน LTS และ โต๊ะ x-y นั้นไม่มีค่าที่แม่นยำ จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลตำแหน่งของ Retro-reflector ที่ได้จากการวัดมาใช้ในการประมาณค่าค่าระยะและมุมต่างๆของแกนอ้างอิงบน LTS เทียบกับ โต๊ะ x-y

ข้อมูลที่ได้จากการวัดนั้น จะสามารถนำมาหาระนาบของโต๊ะ x-y เทียบกับแกนของ LTS ได้ (Normal Vector) โดยใช้วิธี Least-Square เพื่อให้มีค่าผิดในแนวแกน Z (ตั้งฉากกับแกน X-Y) ของ LTS น้อยที่สุด จากนั้นจึงทำการ project จุดทั้งหมดลงบนระนาบนี้ แล้วทำการหาแนวแกน x

และ y ของโต๊ะ $x-y$ โดยประมาณจากจุดในแนวหนึ่ง จากนั้นใช้จุดวัดหนึ่งจุด, แนวหนึ่งแนวนี้ และ normal vector ของระนาบนี้ในการเปลี่ยนแกนอ้างอิงของจุดทั้งหมดจากแกนของ LTS (แกน $X-Y$) มาเป็นค่าเทียบกับแกนของ โต๊ะ $x-y$ ที่ประมาณขึ้นมา จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าจริงที่วัดได้จากโต๊ะ $x-y$

สุดท้ายนี้จำเป็นต้องเน้นว่าค่าที่อ่านได้จากมุมของกระจก คือ มุม Azimuth และ มุม Altitude จะไม่ใช่มุมของแนวแสงที่ชี้ไปที่ Retro-reflector ที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งของ Retro-reflector ซึ่งการคำนวณแนวแสงนี้จะสามารถทำได้ตามในที่ได้แสดงในบทที่ 3 และค่าตำแหน่งที่ได้จะใช้เป็นตำแหน่งที่ใกล้ที่สุดถึงแนวแสงเลเซอร์จาก LTS ที่สองตำแหน่ง ดังวิธีการคำนวณในบทที่ 3 เช่นกัน

จากรูปที่ 8.39 แสดงการผลการวัดที่แสดงโดยค่าตำแหน่งอ้างอิงกับแกนของ LTS ($X-Y$) จากรูปนี้จะเห็นว่า ระนาบ ของ Retro-reflector นั้นไม่ได้ขนานกับระนาบ $X-Y$ ของ LTS ดังจะเห็นได้จากการที่ค่า Z นั้นมีความแตกต่างประมาณ 20 mm (ดูที่ค่าบนแกน Z)



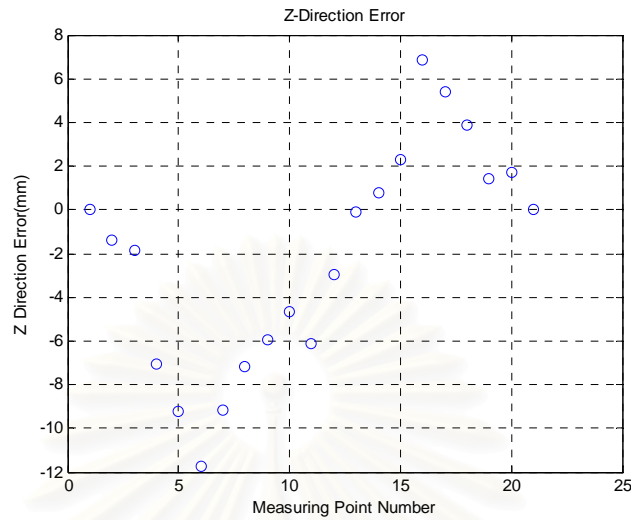
รูปที่ 8.39 ตำแหน่ง Retro-reflector เทียบกับแกน $X-Y$

การเปรียบเทียบกับค่าจริงที่วัดบนแกนอ้างอิง $x-y$ จะทำได้ยาก ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาระนาบ $x-y$ เทียบกับ $X-Y$ โดยในที่นี้ใช้สมการ

$$Z = aX + bY + c$$

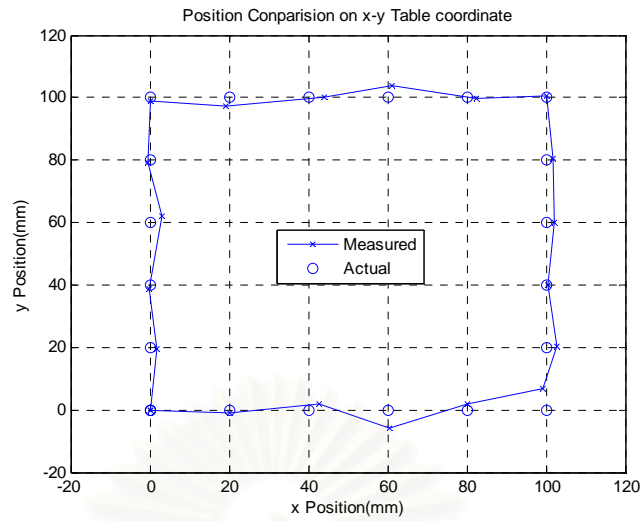
โดยค่า X, Y, Z เป็นค่าตำแหน่งที่วัดได้ในแกน $X-Y$ และ ค่า a, b, c เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า ดังนั้นจะสามารถประมาณค่า a, b, c ที่ทำให้ค่ารวมของ ค่าที่สุดเมื่อ เป็นค่าประมาณของ Z ที่คำนวณจากค่าประมาณของ a, b, c จากนั้นจะสามารถคำนวณ normal vector ของระนาบ $x-y$

เทียบกับแกน X-Y ได้ ค่าความแตกต่างในแกน z ของแต่ละจุดก็คือค่า นี้เองค่านี้ได้ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 8.40 โดยที่ขนาดของค่าผิดพลาดที่มากที่สุดคือ 11.76 mm และขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 2.13mm



รูปที่ 8.40 ค่าผิดพลาดในการวัดจากระนาบ x-y

จากระนาบที่ได้ จะสามารถ project จุดทั้งหมดลงบนระนาบที่ได้นี้ ค่านี้ยังเป็นค่าที่วัดเทียบกับแกนอ้างอิง X-Y จากนั้นใช้จุดหนึ่ง (เช่น ใช้จุดแรกเป็นจุด origin ของแกน x-y) และแนวการวัดหนึ่งแนว (เช่น ใช้แนวการวัดแนวแรกเป็นแกน y) เพื่อจัดการย้ายค่าที่อ่านได้บนแกน X-Y มาเทียบกับแกนอ้างอิง x-y ค่าที่ได้แสดงอยู่บนรูปที่ 8.41 โดยที่ตำแหน่ง x เป็นค่าที่วัดได้และตำแหน่ง o เป็นค่าจริง จากนั้นจะสามารถหาค่าผิดพลาดในระนาบนี้ได้ดังแสดงในรูปที่ 8.42 และ **ผิดพลาด! ไม่พบแหล่งการอ้างอิง** โดยในรูปแรกแสดงค่าผิดพลาดเมื่อเทียบกับลำดับของจุดที่วัด ซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 7.01 mm และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.15 mm)



รูปที่ 8.41 ค่าตำแหน่งที่วัดได้เทียบกับตำแหน่งในระนาบ x-y)



รูปที่ 8.42 ค่าผิดพลาดในการวัดในระนาบ x-y

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 9

สรุปผลงานการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่ได้นำเสนอ เป็นการออกแบบ จัดสร้างอุปกรณ์วัดตำแหน่ง 3 มิติ แบบเลเซอร์หลายสถานี และทดสอบสมรรถนะของระบบจัดสร้าง โดยแบ่งเป็นการจัดสร้าง ระบบ LPS เป็นจำนวน 2 ชุด คือ Local Positioning System 1 (LPS1) และ Local Positioning System 2 (LPS 2) โดยจะแสดงผลการจัดสร้างและทดสอบสมรรถนะ ดังที่จะกล่าวต่อไป

9.1 ต้นแบบของ Local Positioning System 1 (LPS 1)

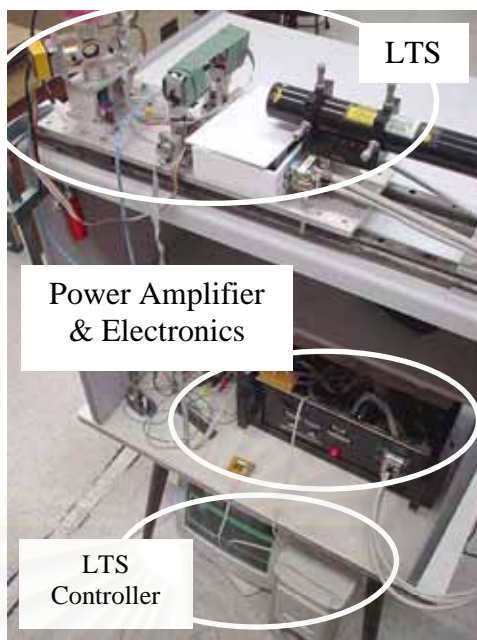
ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาและ จัดสร้างต้นแบบ Local Positioning System (LPS 1) ได้เป็นผลสำเร็จ โดยระบบสามารถทำการติดตาม Retro-reflector, ทำการวัดตำแหน่งพิกัดได้ ระบบต้นแบบ Local Positioning System แสดงดังในรูปที่ 9.1 โดยระบบประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ชิ้นคือ

- 1) ชุดกระจกติดตามด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Tracking System, LTS) จำนวน 1 ชุด
- 2) ชุดวงจรควบคุมมอเตอร์
- 3) คอมพิวเตอร์ควบคุม LTS
- 4) คอมพิวเตอร์จัดการ (Supervisor / User interface, ไม่อยู่ในรูป)

ระบบได้ผ่านการทดสอบการติดตาม Retro-reflector, การทดสอบการวัดตำแหน่ง โดยได้ผลดังนี้คือ

- 1) การติดตาม Retro-reflector นั้นสามารถทำได้ที่ระยะจากกระจกติดตามบน LTS ถึง Retro-reflector ไม่ต่ำกว่า 5.8 เมตร ที่ความเร็วสูงสุดของ Retro-reflector ที่สามารถติดตามได้ที่ระยะ 5.8 เมตร เป็น 12 cm/sec และ 20 cm/sec สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวราบ (Azimuth) และแนวตั้ง (Altitude) ตามลำดับ และที่ระยะ 1 เมตรคือ 19 cm/sec และ 22 cm/sec ในแนวแนวราบ (Azimuth) และ แนวตั้ง (Altitude) ตามลำดับ

- 2) ความแม่นยำในการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector ของอุปกรณ์ LPS โดยการคำนวณใช้หลักการ Triangulation ร่วมกับการเลื่อน อุปกรณ์ LTS ไปมาระหว่างสองตำแหน่ง (ระยะห่าง 0.5 เมตร) โดยการวัดที่ระยะประมาณ 1 เมตร และใช้ตำแหน่งวัด 42 จุดบนระนาบเดียวกัน จะได้ความแม่นยำของระบบเท่ากับ 2.13 ± 0.2 mm จากระนาบ และ 2.15 ± 0.2 mm ในแนวระนาบ เมื่อใช้การเคลื่อนอุปกรณ์ LTS เพียงครั้งเดียวในการวัดทั้ง 42 จุด



รูปที่ 9.1 ต้นแบบ Local Positioning System 1 (LPS 1)

9.2 ต้นแบบของ Local Positioning System 2 (LPS 2)

ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาและ จัดสร้างต้นแบบ Local Positioning System 2 (LPS 2) ได้เป็นผลสำเร็จ โดยระบบสามารถทำการติดตาม Retro-reflector, ทำการวัดตำแหน่งพิกัด และวัดมุมเอียงในสามมิติได้ ระบบต้นแบบ Local Positioning System แสดงดังในรูปที่ 9.2 โดยระบบประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลัก 4 ชิ้นคือ

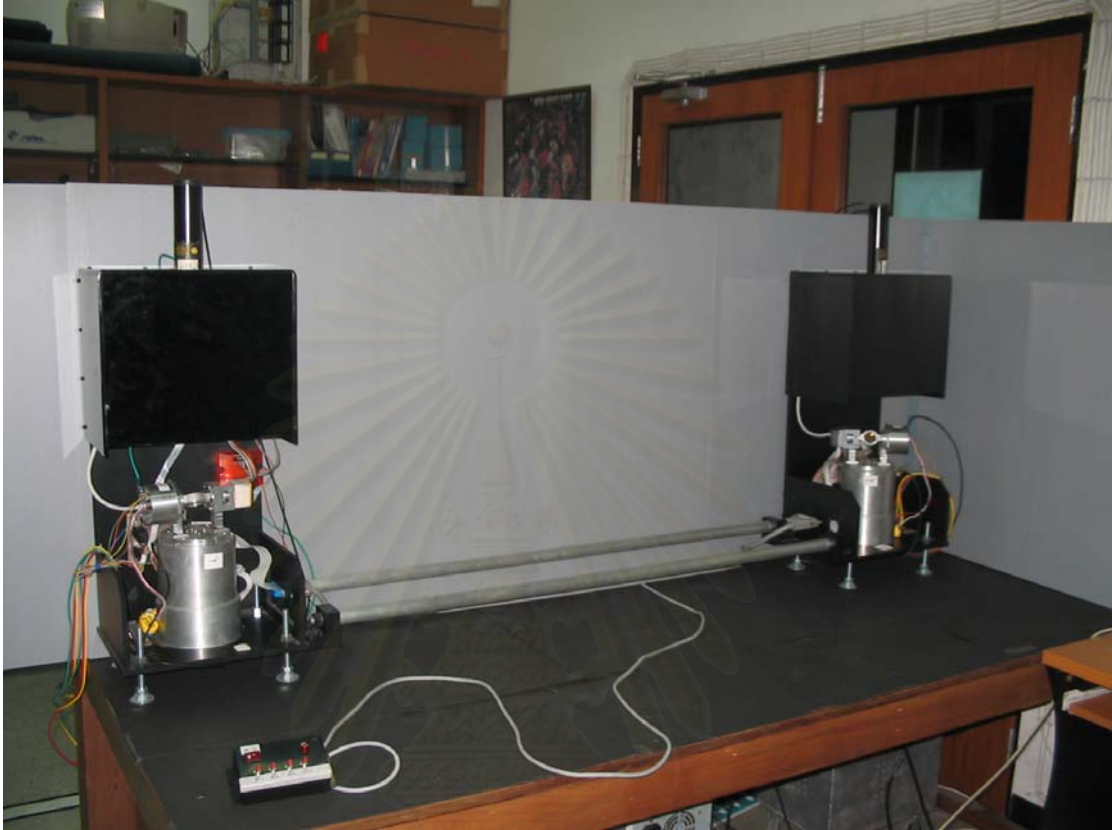
- 1) ชุดกระจกติดตามด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Tracking System, LTS) จำนวน 2 ชุด คือ LTS-Module-R และ LTS-Module-L
- 2) ชุดวงจรควบคุมมอเตอร์
- 3) คอมพิวเตอร์ควบคุม LTS
- 4) คอมพิวเตอร์จัดการ (Supervisor / User interface, ไม่อยู่ในรูป)

ระบบได้ผ่านการทดสอบการติดตาม Retro-reflector, การทดสอบการวัดตำแหน่ง โดยได้ผลดังนี้คือ

- 1) การติดตาม Retro-reflector นั้นสามารถทำได้ที่ระยะจากกระจกติดตามบน LTS ถึง Retro-reflector ไม่ต่ำกว่า 2.5 เมตร ที่ความเร็วสูงสุดของ Retro-reflector ที่สามารถติดตามได้ที่ระยะ 0.5 เมตร ของ LTS Module-R เป็น 15.08 cm/sec และ 12.06 cm/sec LTS-Module-L เป็น 15.78 cm/sec และ 12.52 cm/sec

- 2) ความแม่นยำในการวัดตำแหน่งของ Retro-reflector ของอุปกรณ์ LPS โดยการคำนวณใช้หลักการ Triangulation ร่วมกับการเลื่อน อุปกรณ์ LTS ไปมาระหว่างสองตำแหน่ง

(ระยะห่าง 0.5 เมตร) โดยการวัดที่ระยะประมาณ 1 เมตร และใช้ตำแหน่งวัด 21 จุดบนระนาบเดียวกัน จะได้ความแม่นยำของระบบเท่ากับ 0.2 ± 0.2 mm จากระนาบ และ 1.3 ± 0.2 mm ในแนว



รูปที่ 9.2 ต้นแบบ Local Positioning System 2 (LPS 2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- John J. Craig. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Second Edition. Sydney : Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1989.
- S Spiess, M Vinze, P Krautgartner, K Filz. On Modeling the Kinematics and Optics of a Laser Tracking System for Contactless Robot Measurement. Institute of Flexible Automation Technical University of Vienna 1996..
- M Vinze, J P Prenninger, H Gander. A Laser Tracking System to Measure Position and Orientation of Robot End Effectors Under Motion. the International Journal of Robotics Research 1994, 13(4) : 305-314.
- Jia-Yush Yen, Chao-Si Jeng, Kuang-Chau Fan. Servo Design for a 3-D Laser Tracking Measurement System. Transactions of the ASME 1996, Vol18 : p.476-481.
- Lijiang Zeng, Fan Yuan, Deqiang Song, Rong Zhang. A two-beam laser triangulation for measuring the position of a moving object. Optics and Lasers in Engineering 31 1999 : 445-453.
- Heeren, T.A.G, Veldpaus. An object system to measure the end of effector position for on-line control purposes. Int. J. Robot Res. 11 1992 : 53-63.
- Decker, S. Dynamisches externes Robotersystem. PhD. Thesis Institute of Flexible Automation, Vienna, 1990.
- V.Lertpiriyasuwat, M.C. Berg and K.W. Buffinton. Extended Kalman Filtering Applied to a Two-Axis Robotics Arm with Flexible Links. International Journal of Robotics Research Vol. 19, No. 3 : 255-270.
- K.J. Astrom and B.Wittenmark. Adaptive Control. Second Edition. : Addison Wesley, 1994.
- S.Chantranuwathana and H.Peng. Practical Adaptive Robust Controller for Active Suspensions. Proceeding of the 2000 ASME International Congress and Exposition 2000 : (n.p.).
- Stephan Spiess, Mark Vinze and Minu Ayromlou. On the Calibration of a 6D Laser Tracking System for Contactless, Dynamic Robot Measurement. IEEE Instrument and Measure Technology Conference 1997 : 1203-1208.

- C.J. Leigh-Lancaster, B.Shirinzadeh and Y.L. Koh. Development of a Laser Tracking System. IEEE Instrument and Measure Technology Conference 1997 : 163-168.
- Ying Bai, Hanqi Zhuang and Zvi S. Roth. Experiment Study of PUMA Robot Calibration Using a Laser tracking System. IEEE International Workshop on soft Computing in Industrial Applications 2003 : 139-144.
- Wyatt S. Newman, Craig E. Birkhimer and Robert J. Horning. Calibration of a Motoman P8 Robot Based on Laser Tracking. Proceeding of the 2000 International Conference on Robotics & Automation 2000 : 3597-3602.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก
รายละเอียดของอุปกรณ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
รายละเอียดของอุปกรณ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนประกอบด้วย อุปกรณ์ด้านแสง และอุปกรณ์อื่นๆ ดังนี้

ก.1 อุปกรณ์ด้านแสง

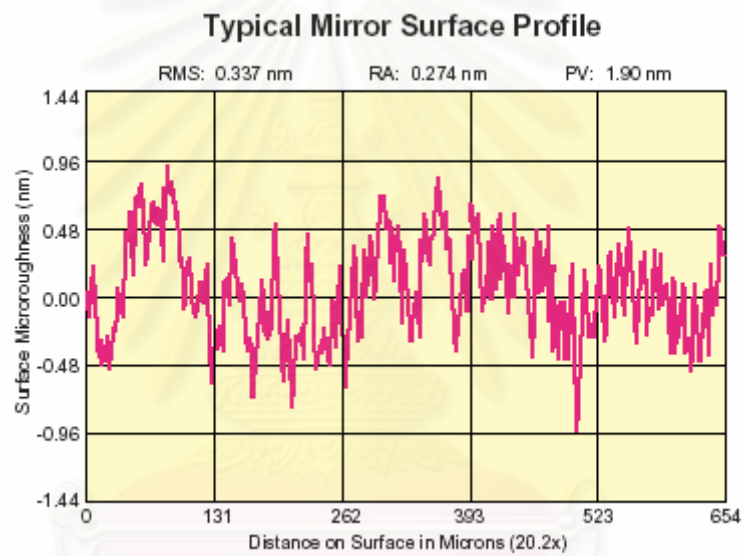
ก.1.1 Laser-line Dielectric Mirror มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของ Laser-line Dielectric Mirror

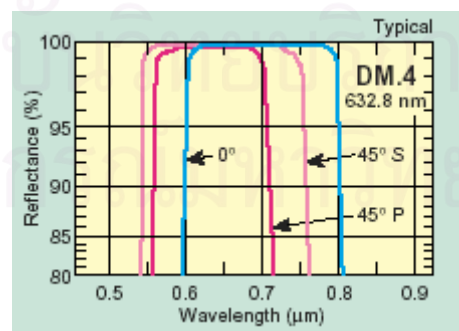
คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	10D20DM.4 ของบริษัท Newport
เส้นผ่าศูนย์กลาง	25.4 เซนติเมตร
ความหนา	6 มิลลิเมตร
วัสดุ	Pyrex
Clear Aperture	\geq central 80% of diameter
Durability	MIL-C-675C
Cleaning	Non-abrasive method, acetone or isopropyl alcohol on lens tissue recommended
Damage Threshold	1000 W/cm ² CW, 0.5 J/cm ² with 10 nsec pulses
Reflectivity	RS, RP > 99%
S1 Surface Figure	$\lambda/2$
S1 Surface Quantity	15-5



Laser-line dielectric mirror



Surface profile



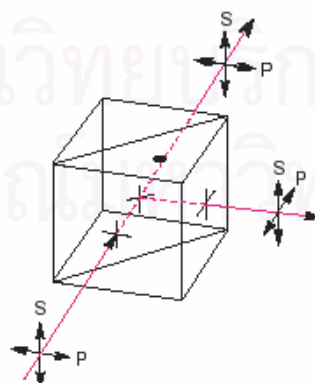
Reflectance

รูปที่ ก.1 คุณสมบัติของ Laser-line dielectric mirror

ก.1.2 Laser-line Non-polarizing Cube Beam splitters รุ่น 16NP.4 ของบริษัท Newport มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ ก.2 รายละเอียดคุณสมบัติของ Laser-line Non-polarizing Cube Beam splitters รุ่น 16NP.4 ของบริษัท Newport

Material	BK 7, grade A, fine annealed optical glass
Wavefront Distortion	$\leq \lambda/4$ at 632.8 nm over the clear aperture
Clear Aperture	Central diameter, >80% of dimension
Surface Quality	20-10 scratch-dig
Transmission	50 \pm 3%, independent of polarization
Reflection	50 \pm 3%, independent of polarization
Polarization	S- and P-polarization components matched to within 3%, $ T_s - T_p \leq 3\%$, $ R_s - R_p \leq 3\%$
Transmitted Beam Deviation	≤ 5 arc min
Reflected Beam Deviation	90° \pm 5 arc min
Angle of Incidence	0° \pm 2°
Dimension Tolerance	± 0.25 mm
Antireflection Coating	Multilayer coating, R <0.5%
Temperature Range	-50°C to 90°C
Durability	MIL-M-13508, MIL-C-675, MIL-C-14806
Orientation	To avoid damage, beam should enter prism marked with a dot
Cleaning	Non-abrasive method, acetone or isopropyl alcohol on lens tissue recommended (see page 564) Cemented optic, do not immerse in a solvent
Damage Threshold	2 kW/cm ² CW, 1 J/cm ² with 10 nsec pulses, typical

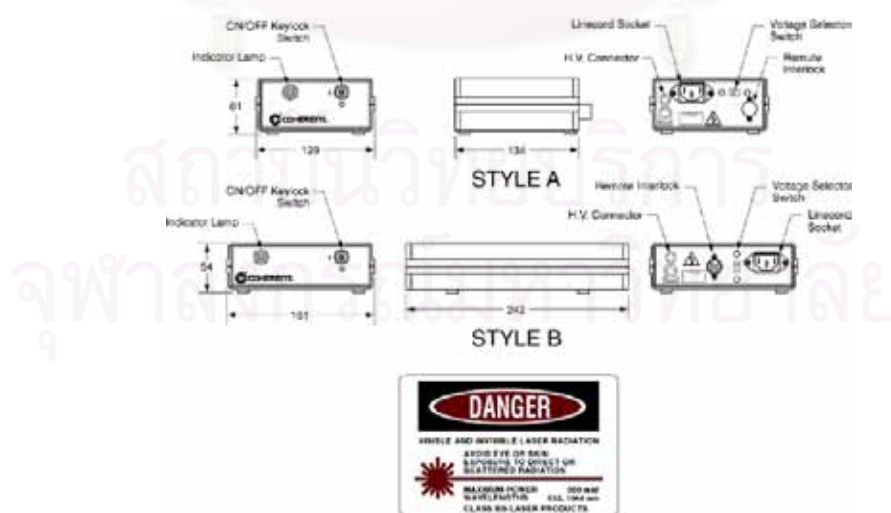


รูปที่ ก.2 Laser-line Non-polarizing Cube Beam splitters

ก.1.3 He-Ne Laser Power Supply มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของ He-Ne Laser Power Supply

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	31205 ของบริษัท Coherent
Temperature - Operating	-20 to +40 °C
Temperature - Storage:	-40 to +80 °C
Input Power:	115/230 VAC 50-400 Hz, rear panel switch, IEC socket for detachable cord (1.8 m cord supplied)
Power Consumption - Style A	~25W
Power Consumption - Style B	30-50 W
Laser Safety:	Key switch (3-7 s delay), on/off indicator and safety interlock. Manual shutter on lasers.
Certification:	CE
Dimensions:	See drawings
Weight - Style A	1.1 kg
Weight - Style B	1.5 kg



รูปที่ ก.3 Power supply drawing

ก.1.4 He-Ne Laser Head มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติของ He-Ne Laser Head

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	31-205 ของบริษัท Coherent
Power (mW)	2
CDRH Class	IIIa
Wavelength (nm)	632.8
Polarization	>500:1
Beam Size (mm)	0.79
Beam Divergence (mrad)	1
Mode Spacing (MHz)	574
Length L (mm)	315
Mode Sweep (%)	<5
8-hour Power Drift (%)	<2.5
Power Supply	31-2462

เลเซอร์ ที่เลือกใช้งานเป็นเลเซอร์ Class IIIA เนื่องจากไม่มีอันตรายต่อสายตา โดยมีรายละเอียดดังนี้

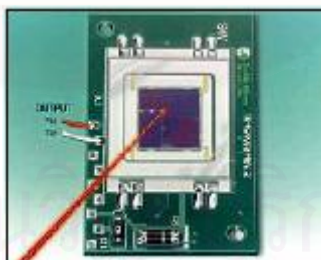
Class IIIA เป็นแสงที่มีกำลังระดับปานกลาง 1.0-5.0 mW สามารถเป็นต้นเหตุให้เกิดอาการทางสายตาในบางสภาวะ ผลกระทบที่ในขั้นนี้ควรกรบออกสถานะเมื่อมีการทำงาน และมีป้ายเตือน ที่ผลิตภัณฑ์เลเซอร์ในระดับนี้ไม่มีอันตรายต่อผิวหนังและไม่เป็น สาเหตุ ให้เกิดเพลิง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

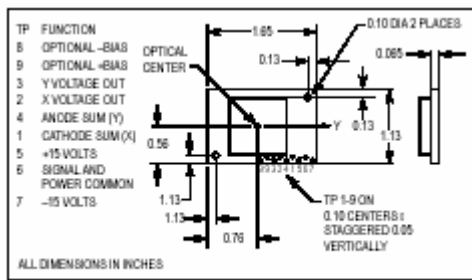
ก.1.5 Photo Sensitive Diode มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ ก.5 คุณสมบัติของ Photo Sensitive Diode

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	PSS-DL 100-7PCBA ของบริษัท Pacific Silicon Sensor
Power supply voltage Vs	Min10V,max18V, recommended 15V
Max output voltage	+Vs-3; -Vs+3
Max output current limit	25ma
Max external bias	-Vs-10V; +Vs+10V
Max slew rete	10 V/ μ sec
Theoretical noise	15nVHz-1/2
Operating temperature	0-70°C
-3db bandwidth	257 kHz
Resolution(bias dependent)	$\geq 0.25 \mu\text{m}$
Linearity(bias dependent)	$\pm 1\%$ of full scale
Max light intensity	1.5 W/cm ²

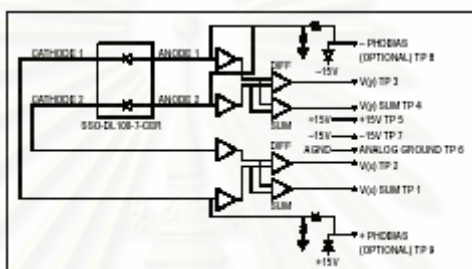


รูปที่ ก.4 Photo Sensitive Diode



Mechanical Outline

รูปที่ ก.5 แผนภาพเชิงกล



Block Diagram

รูปที่ ก.6 แผนภาพวงจรไฟฟ้า

ก.1.6 Ball Mount Retro-reflector มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ ก.6 คุณสมบัติของ Ball Mount Retro-reflector

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	BMR – 0.5 ของบริษัท ATT Metrology Services
Ball dia.	0.5"
Retro-reflector clear aperture	0.25"
Wave front over aperture P.V.@633nm	0.25
ทั่วไป	Ball Material: 440C Stainless Steel with sphericity better than 0.00005". Retro-reflector Apex is positioned within .0001" of the center of the ball. Retro-reflector Mirror Coating: Over-protected silver.



รูปที่ ก.7 Ball Mount Retro-reflector

ก.1.7 Laser Protective Spectacle มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ ก.7 คุณสมบัติของ Laser Protective Spectacle

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	LOTG-He-Ne ของบริษัท Newport
Wave Length	633 nm
Optical density	1-2
Lens color	lt. Blue
VLT%	41



รูปที่ ก.8 Laser Protective Spectacles

ก.2 อุปกรณ์ด้านอื่นๆ

ก.2.1 อลูมิเนียม 7022 มีรายละเอียด ดังนี้*

ตารางที่ ก.8 คุณสมบัติของอลูมิเนียม 7022

คุณสมบัติ	ค่าเฉลี่ย
ความหนาแน่น (g/cm ³)	2.8
อุณหภูมิหลอมเหลว (°C)	485-640
การนำความร้อนที่ 20-100 °C	165
สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน ($\mu\text{m}/\text{m}^{\circ}\text{K}$)	23.5
ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ ($\text{m}/\Omega.\text{mm}^2$)	18.8
โมดูลัสของการยืดหยุ่น ที่ 20°C (103 N/mm ²)	71.5
ความจุความร้อนจำเพาะที่ 20°C	963

*ที่มา ข้อมูลจากบริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสติลเซ็นเตอร์ จำกัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2.3 Card PCI-9112

ตารางที่ ก.9 คุณสมบัติของ Card Ad-link PCI-9112

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	PCI-9112
A/D resolution	12 bit
Sampling rate	110 kS/s
A/D input	16-CH single-ended และ 8-CH differential
Analog input ranges	Unipolar
D/A resolution	12 bit ,2 CH



รูปที่ ก.9 Card PCI-9112

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2.4 Card PCI-8133

ตารางที่ ก.10 คุณสมบัติของ Card Ad-link PCI-8133

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	PCI-8133
Counter resolution	16 bit
Number of channels	3
Encoder Counter	A,B Phase and index input



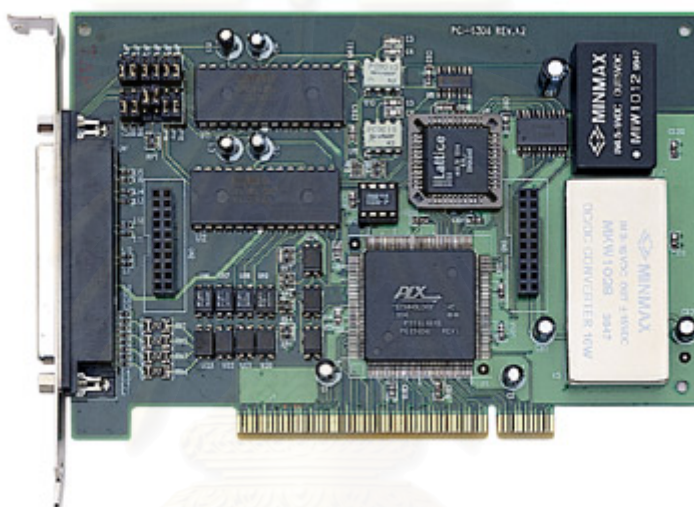
รูปที่ ก.10 Card PCI-8133

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2.4 Card PCI-6308

ตารางที่ ก.11 คุณสมบัติของ Card Ad-link PCI-6308

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	PCI-6308
Counter resolution	16 bit
Number of channels	6
D/A Resolution	16 bit



รูปที่ ก.11 Card PCI-6308

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2.7 Kollmorgen Amplifier รุ่น SERVO STAR CD cx03

ตารางที่ ก.12 คุณสมบัติของ Kollmorgen Amplifier รุ่น SERVO STAR CD cx03

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	SERVO STAR CD
Motor current ripple frequency	32 kHz
Position loop update rate	2 kHz
Velocity loop update rate	4 kHz
Current loop update rate	16 kHz
Output Continuous Current Per Phase	3 A



รูปที่ ก.12 Servo star CD cx03

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2.8 Kollmorgen Amplifier รุ่น SERVO STAR CD cx06

ตารางที่ ก.13 คุณสมบัติของ Kollmorgen Amplifier รุ่น SERVO STAR CD cx03

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	SERVO STAR CD
Motor current ripple frequency	32 kHz
Position loop update rate	2 kHz
Velocity loop update rate	4 kHz
Current loop update rate	16 kHz
Output Continuous Current Per Phase	6 A



รูปที่ ก.13 Servo star CD cx06

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2.9 Kollmorgen Motor รุ่น RBE 01210

ตารางที่ ก.14 คุณสมบัติของ Kollmorgen Motor รุ่น RBE 01210

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	Motor รุ่น RBE 01210
Stall torque	0.115 N-m
Max continuous current	5.41 A
Max continuous Torque	0.342 N-m



รูปที่ ก.14 Kollmorgen Motor รุ่น RBE 01210

ก.2.10 Kollmorgen Motor รุ่น RBE 02110

ตารางที่ ก.15 คุณสมบัติของ Kollmorgen Motor รุ่น RBE 02110

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	Motor รุ่น RBE 02110
Stall torque	0.952 N-m
Max continuous current	6.34 A
Max continuous Torque	1.72 N-m

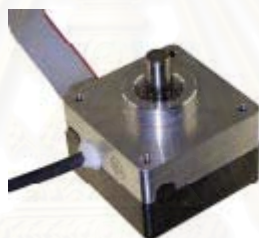


รูปที่ ก.15 Kollmorgen Motor รุ่น RBE 02110

ก.2.11 Motor Encoder รุ่น CM-300 ของ บริษัท computer Optical Product

ตารางที่ ก.16 คุณสมบัติของ Motor Encoder รุ่น CM-300 ของ บริษัท computer Optical Product

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	CM-300
Cycles per revolution	2048
Output Format	A and B Channel in quadrature
Frequency Response	75 kHz
Max continuous stall torque	31 mN-m
Motor constant	8600 RPM
Maximum continuous output power	12 mNm/W



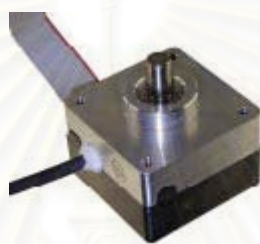
รูปที่ ก.16 Encoder รุ่น CM-300

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2.12 Encoder รุ่น CP-300 ของ บริษัท computer Optical Product

ตารางที่ ก.17 คุณสมบัติของ Encoder รุ่น CP-300 ของ บริษัท computer Optical Product

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	CP-300
Cycles per revolution	2048
Output Format	A and B Channel in quadrature
Frequency Response	75 kHz



รูปที่ ก.17 Encoder รุ่น CP-300

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

โปรแกรม Matlab®- Simulink®, xPC target

ข.1 นำเรื่อง

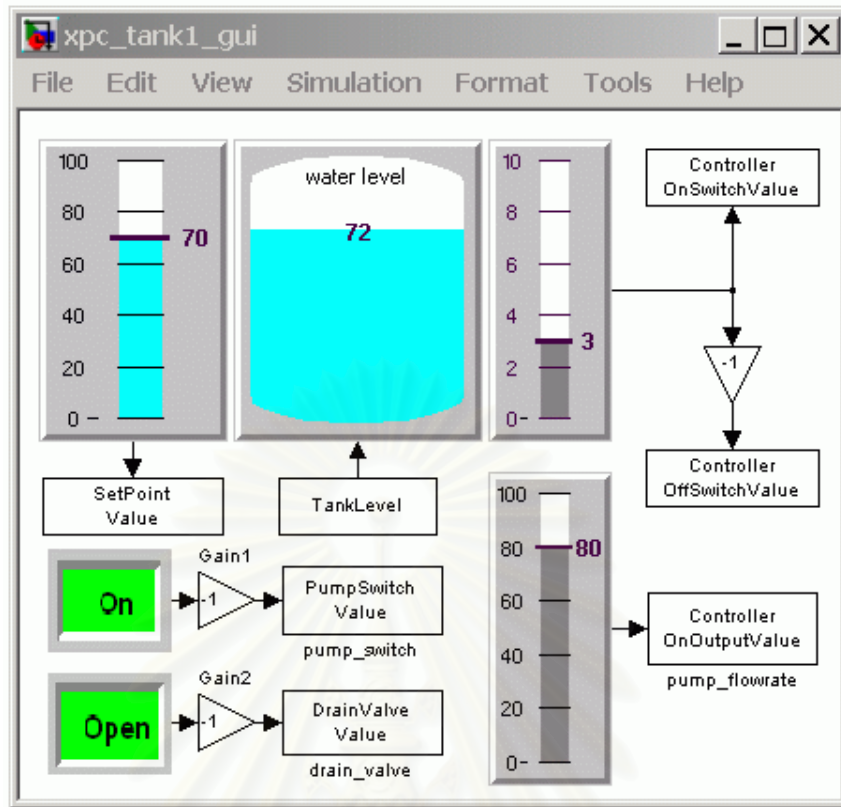
โปรแกรม Matlab เป็นโปรแกรมคำนวณเชิงตัวเลขที่ใช้ในการสนับสนุนการวิจัยต่างๆ ทั้งงานวิศวกรรม และในงานสาขาอื่นๆ เนื่องโปรแกรม Matlab® เป็นโปรแกรมที่ง่ายต่อการศึกษา มีฟังก์ชันเฉพาะมากมาย และการทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่สามารถทำให้โปรแกรม Matlab สามารถใช้ร่วมกับโปรแกรมอื่นเพื่อเพิ่มศักยภาพในการทำงาน

Simulink® Toolbox เป็นเครื่องมือหนึ่งในโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการจำลอง ทดสอบ และวิเคราะห์การทำงานของระบบพลศาสตร์ในเชิงเวลาได้อย่างง่ายดายภายใต้การทำงานในหน้าต่างการเชื่อมต่อแบบรูปภาพ คือการนำ Block Diagram ใน Library Simulink แต่ละอันมาต่อกันเพื่อแทนระบบพลศาสตร์ที่สนใจ สามารถใช้ได้ทั้งในระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ระบบเวลาต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยในระบบ LTS ใช้โปรแกรมนี้ในการจำลองระบบต่างๆ รวมไปถึงใช้ในการทำตัวควบคุม และเก็บข้อมูลสำหรับการควบคุมมอเตอร์บังคับมุมบิดกระฉก

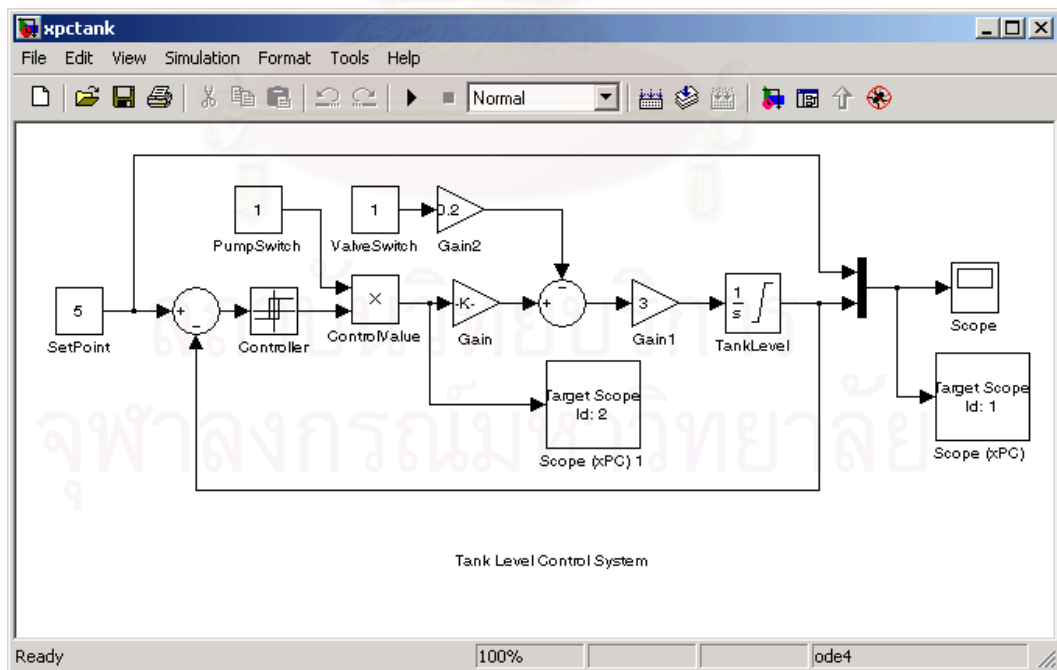
ข้อดีที่สำคัญของระบบ xPC คือการแยกแยะระหว่างเครื่องต้นแบบ (Host PC) และเครื่องเป้าหมาย (Target PC) โดยเครื่องต้นแบบใช้งานบนระบบปฏิบัติการ Windows ทำให้สามารถนำความสามารถและส่วนสนับสนุนที่มีอยู่มากมายในระบบปฏิบัติการ Windows มาใช้ในการพัฒนาระบบได้ และเครื่องเป้าหมายที่ใช้ในการควบคุมระบบ ทำงานบนระบบปฏิบัติการของ xPC Real-time สามารถใช้ในการควบคุม และทดสอบงานที่ต้องการความแม่นยำสูงได้

xPC Target เป็นเครื่องมือหนึ่งในโปรแกรม Matlab ที่ใช้ในการสร้างต้นแบบ ควบคุมและทำการทดสอบระบบ ในเวลาจริง ที่ทำงานอยู่บน Target PC ใช้ระบบปฏิบัติการ xPC kernel โดยอุปกรณ์ติดต่อต่างๆ ที่จะต้องใช้เช่น AD, DA หรือการ์ดติดต่อต่างๆ จะต้องติดตั้งอยู่บนเครื่อง Target PC ระบบนี้ต้องการคอมพิวเตอร์ 2 เครื่องในการทำงาน ประกอบด้วย Host PC ที่มีโปรแกรม Matlab® Simulink® เพื่อใช้ในการสร้าง Block Diagram โดย Simulink Toolbox และเมื่อจำลองระบบด้วย Block Diagram แล้วระบบสามารถทดสอบได้บน Host PC

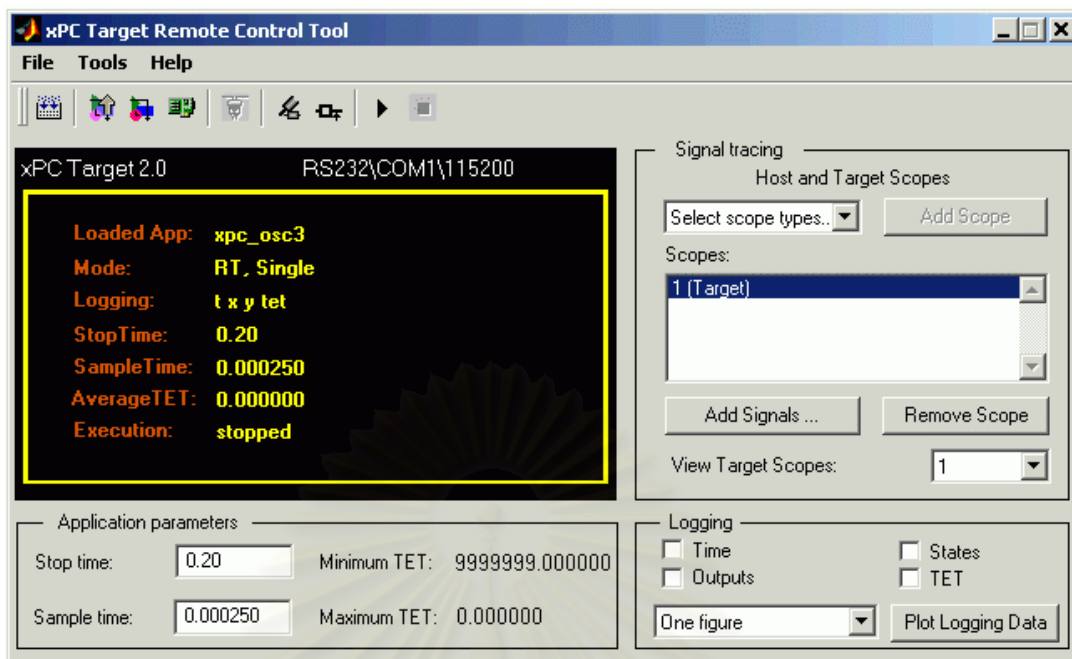
เมื่อได้ระบบที่จำลองด้วย Block Diagram แล้ว Host PC จะทำการเปลี่ยนแปลงจาก Block Diagram เป็นภาษาที่สามารถใช้ใน Target PC ได้โดยใช้โปรแกรม real-time Workshop® และ C/C++ ในการสร้างโค้ดใหม่ และทำการส่งผ่านข้อมูลจากเครื่อง Host PC ไปสู่ Target PC ดังแสดงตัวอย่างระบบควบคุมระดับนำในรูปที่ ข.1, ข.2, ข.3



รูปที่ ข.1 ระบบพลศาสตร์ ที่ต้องการควบคุม



รูปที่ ข.2 จำลองระบบการควบคุมระดับน้ำด้วย Simulink Block Diagram



รูปที่ ข.3 หน้าต่างแสดงการควบคุมการทำงานของ XPC บน Host PC

ข.2 ก่อนการใช้งาน

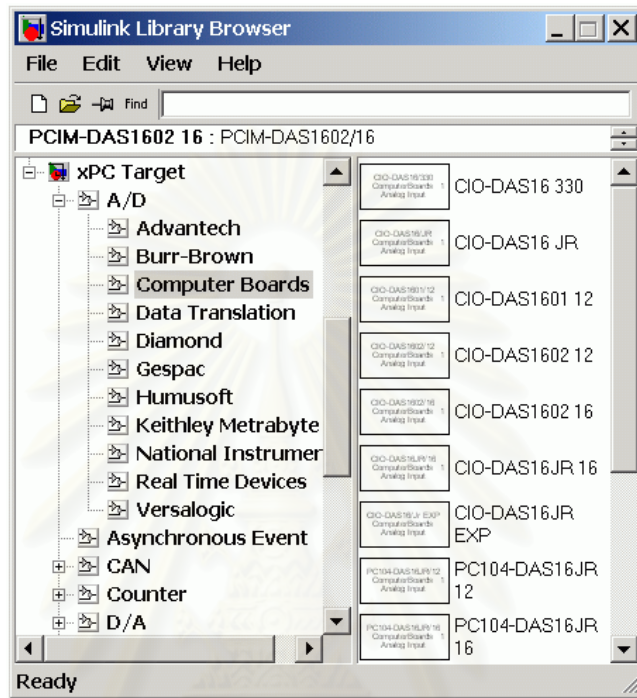
ก่อนการใช้งานของระบบ XPC เครื่อง Host PC จะต้องติดตั้งระบบปฏิบัติการ Window และโปรแกรมต่างๆ ดังนี้

Matlab® ใช้ในการควบคุมและติดต่อกับระบบ XPC โดยผ่านบรรทัดคำสั่ง หรือหน้าต่างควบคุม สามารถใช้ในการ บันทึกข้อมูลจาก Target PC สั่งเริ่มและหยุดการทำงานของ Target เปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ใช้ รวมไปถึงการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จาก Target PC ดังรูปที่ ข.3

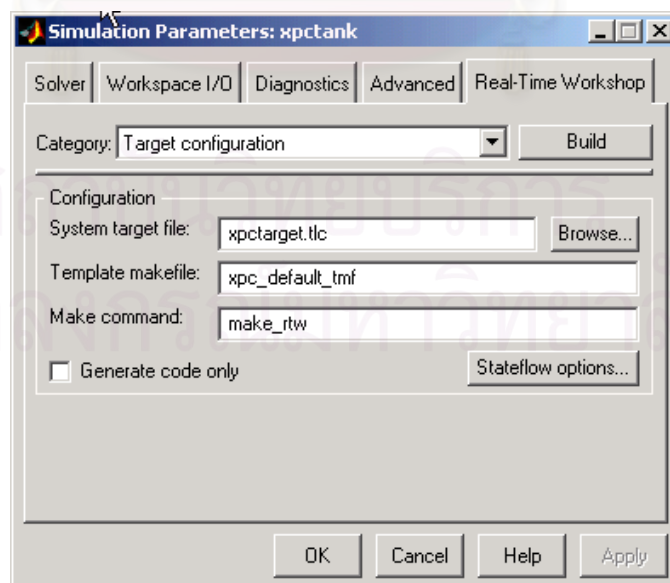
Simulink Library ใช้ในการสร้าง Block Diagram เพื่อควบคุมและจำลองระบบพลศาสตร์ที่สนใจดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น (รูปที่ ข.1 และ ข.2) และสามารถสร้าง Block ที่มีคุณลักษณะเฉพาะตามที่ต้องการ เพิ่มเติมจากที่ Simulink Library มีอยู่ โดยการใช้ C-Code S-Function เพื่อขยายความสามารถของโปรแกรมออกไป และอีกหนึ่งคุณลักษณะที่น่าสนใจใน Simulink Library คือ IO Diver Block Library ซึ่งเป็นการจัดเตรียม Diver สำหรับการติดต่อ IO ชนิดต่างๆ ที่นิยมใช้มากกว่า 400 ชนิดดังแสดงในรูปที่ ข.4 เป็นต้น

Real-Time Workshop ใช้ในการเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลจาก Block Diagram ไปสู่รหัสภาษา C ด้วยคำสั่ง Build ดังแสดงในรูปที่ ข.5

C Compiler ใช้ในการสร้าง code เพื่อใช้ในการปฏิบัติการของ xPC kernel ในการใช้งาน ต้องติดตั้งที่ Host PC โดยโปรแกรมที่สามารถใช้ได้คือ Microsoft Visual C++ version 5 6 หรือ 7 Watcom C/C++ version 1.6 หรือ 11



รูปที่ ๑.4 IO Block Library ที่มีอยู่ใน Simulink Library



รูปที่ ๑.5 การเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลจาก Block Diagram ไปสู่ข้อมูลที่ใช้ใน xPC Target

ข.3 สมบัติหลักที่ทำให้ xPC โดดเด่น

-สามารถใช้งานโปรแกรมหรือระบบที่จำลองด้วย Simulink® บน xPC kernel ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่ทำงานบนเวลาจริงในเครื่อง PC

-สนับสนุนการทำงานบน PC, PC/104, Compact PCI, industrial PC หรือ Single board ให้สามารถใช้งานในระบบเวลาจริง

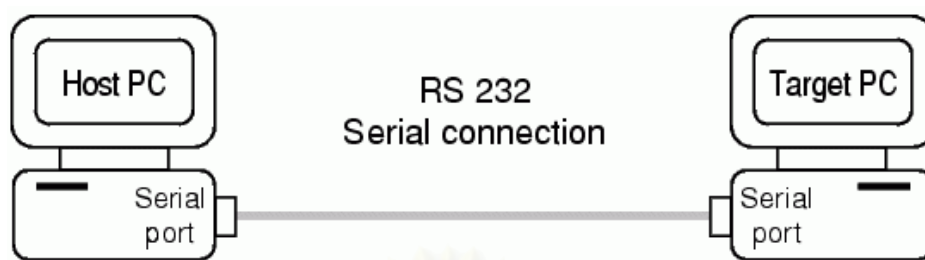
-สามารถทำงานที่ความถี่ Sampling Rate สูงถึง 100 kHz ได้ โดยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของตัวประมวลผล (Micro Processor)

-สนับสนุนการใช้ IO board แบบมาตรฐานมากกว่า 150 ชนิด ซึ่งจัดเตรียมไว้ใน IO Device driver library ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ข.6 ก

-สามารถประมวลผลข้อมูล เปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ และแสดงผลของระบบได้จากทั้งที่ Host และ Target PC

-สามารถเชื่อมต่อระหว่าง Host และ Target ผ่านทาง RS232 หรือ TCP/IP protocol ดังรูปที่ ข.6 ข

สนับสนุนการพัฒนา GUI (graphic user interface) เพื่อเข้าสู่การปรับปรุงสัญญาณและค่าตัวแปรของระบบ



ก. การเชื่อมต่อผ่านระบบ RS 232



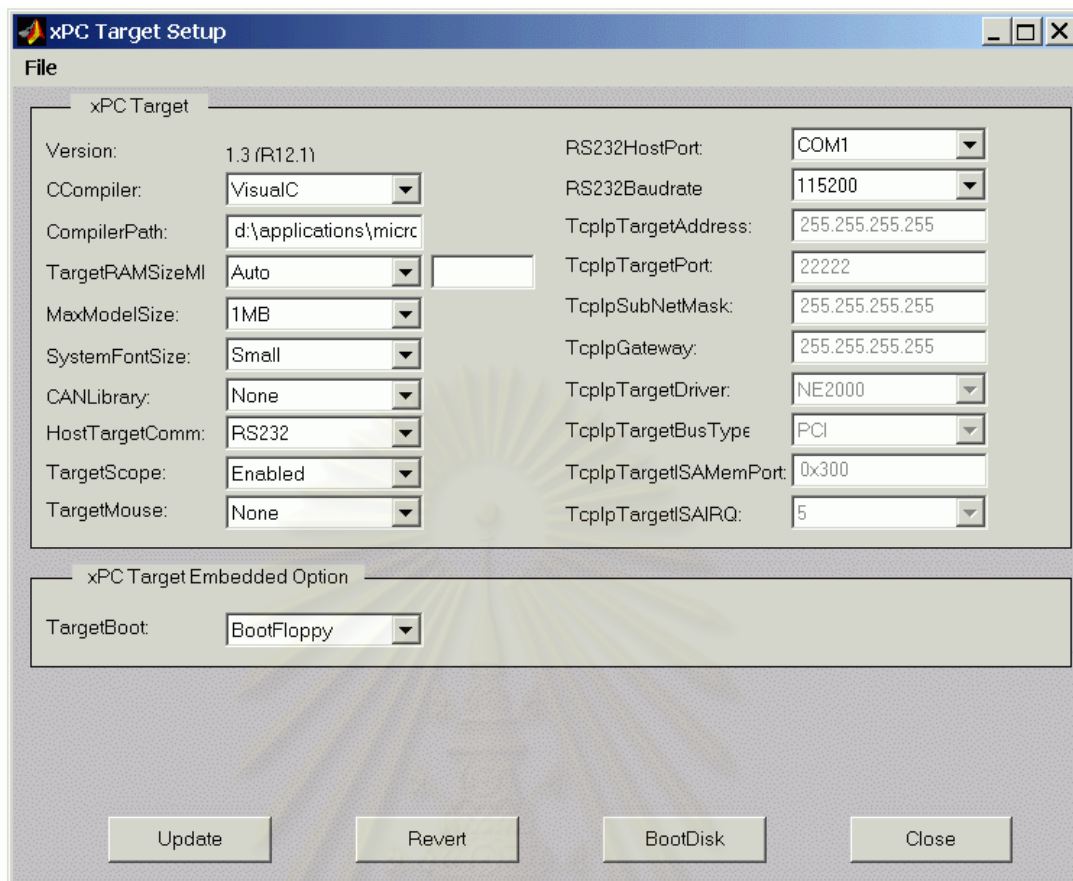
ข. การเชื่อมต่อผ่าน TCP/IP Protocol

รูปที่ ข.6 การเชื่อมต่อระหว่าง Host PC และ Target PC

ข.4 การใช้งาน xPC target

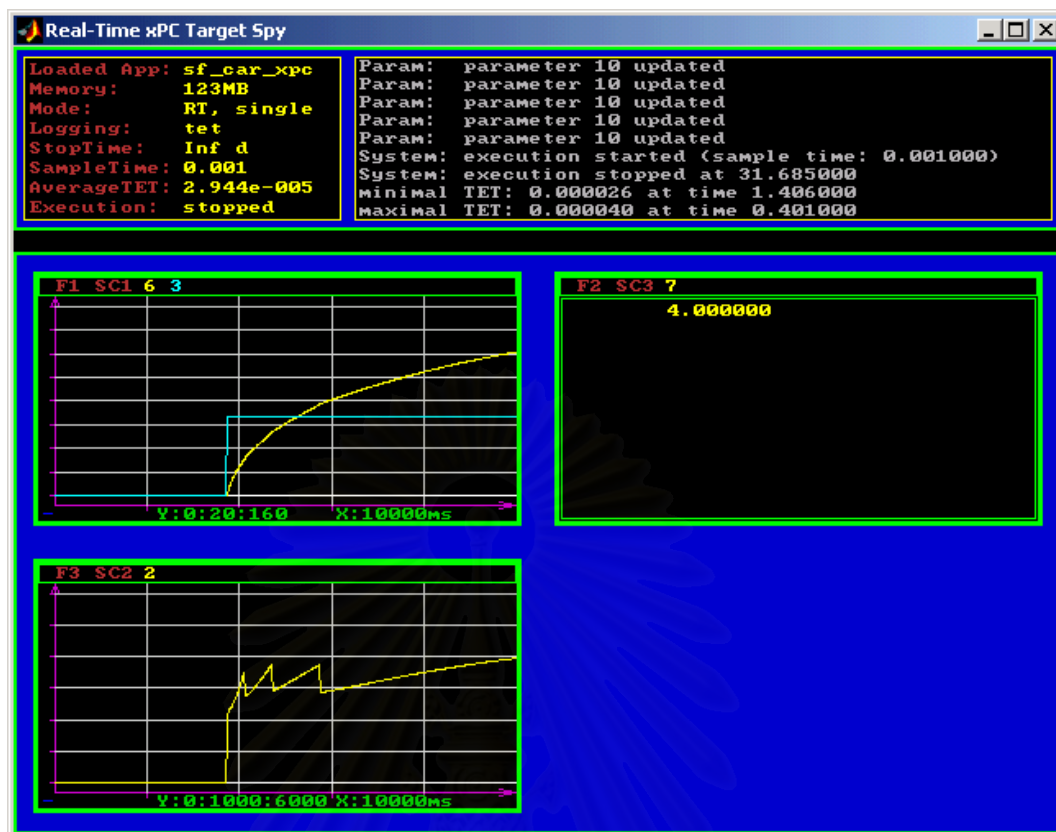
เมื่อพัฒนาหรือจำลองระบบบน Host PC แล้ว จะสามารถสร้างโปรแกรมที่จะทำงานบนเวลาจริงเพื่อนำไปใช้ใน Target PC โดยเริ่มจากการบูท Target PC ด้วยแผ่นพิเศษที่สร้างขึ้นมา (รูปที่ ข.7) เพื่อติดตั้งข้อมูล real time Kernel สู่อุปกรณ์บน Target PC หลังจากบูทเครื่อง Target PC แล้วจึงจะสามารถสร้างหรือถ่ายโอนข้อมูลที่พัฒนาไว้สู่ Target PC ได้

xPC Target real-time kernel เป็นระบบปฏิบัติการที่ทำงานในเวลาจริง ซึ่งสามารถควบคุมจากเครื่อง Host PC ทั้งบน Matlab Command line หรือ Standard toolbox ของ Matlab หรือจะควบคุมผ่านทาง standard Internet browser และ the target PC command-line interface ในขณะที่ Target PC กำลังทำงาน สามารถเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบ สั่งให้แสดงผลการวัดสัญญาณ ณ ขณะนั้น เก็บค่าที่แสดงอยู่เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป และสามารถแสดงสถานะของการทำงานบนจอของ Target PC ได้



รูปที่ ข.7 หน้าต่างการติดตั้งค่าตัวแปรในการใช้ xPC Target

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ๗.8 หน้าจอแสดงผลของ Target PC

การทำงานบน Target PC จะไม่มีผลใดๆ ต่อโปรแกรมต่างๆ ที่ติดตั้งไว้บนเครื่อง Target PC ดังนั้นเมื่อต้องการให้ Target PC สามารถใช้งานอย่างปกติบนระบบปฏิบัติการ Window, Linux หรือระบบปฏิบัติการอื่นๆ สามารถทำได้เพียงแต่นำแผ่นนุทที่มีระบบปฏิบัติการ xPC Target real-time kernel ออกแล้วทำการนุทอย่างปกติเท่านั้น

๗.5 การเชื่อมต่อระหว่าง Host และ Target PC

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้นว่าการเชื่อมต่อระหว่าง Host และ Target PC สามารถใช้ได้ทั้ง ระบบ RS232 และ TCP/IP Protocol ซึ่งการเชื่อมต่อผ่านระบบ RS 232 โดยใช้ Port COM1 หรือ Port COM2 ในการเชื่อมต่อโดยวิธีนี้จะใช้ค่อนข้างง่ายเนื่องจากใช้เพียงอุปกรณ์พื้นฐานที่มีอยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ และสนับสนุนการส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุด 115 kBaud

สำหรับการเชื่อมต่อผ่านระบบ TCP/IP Protocol นั้นจะค่อนข้างยุ่งยากกว่าเนื่องจากต้องใช้ Ether Card ในรุ่นที่ Matlab® สนับสนุน แต่สามารถส่งข้อมูลจากได้ในระยะทางที่ไกลกว่า และสามารถรับและส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงถึง 100 Mbit/s



ภาคผนวก ค

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

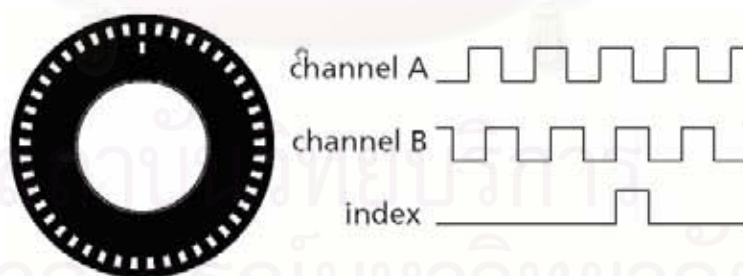
ภาคผนวก ค

การเพิ่มความถูกต้องในการวัดตำแหน่งของ Encoder แบบ Sine wave

สิ่งที่สำคัญต่อความถูกต้องในการวัดตำแหน่งระบบ LPS คือความสามารถในการวัดมุมที่มีความถูกต้องสูง ซึ่งในส่วนนี้จะนำเสนอการประยุกต์ใช้ Encoder แบบที่ให้สัญญาณเป็น sinusoidal ซึ่งเป็นสัญญาณแบบ Analog ที่จะสามารถนำมาเพิ่มความละเอียดในการวัดได้ และแสดงผลการพัฒาที่ได้เทียบกับระบบที่ไม่ได้นำเอาสัญญาณ sinusoidal นี้มาใช้

ค.1 การวัดมุมข้อต่อความแม่นยำสูง

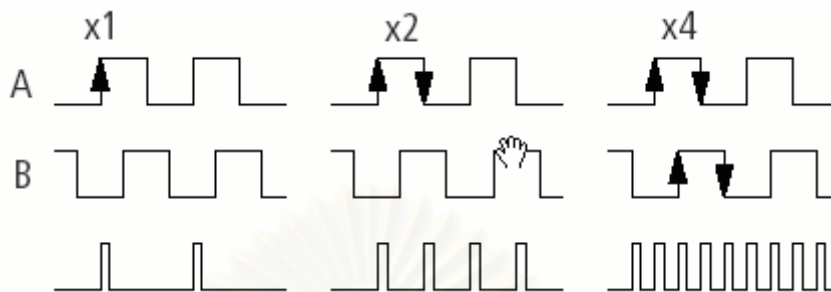
ในการควบคุมมุมข้อต่อให้มีความแม่นยำสูงจะขึ้นอยู่กับวิธีการวัดมุมข้อต่อที่จะต้องมีความแม่นยำตรงสูงและวิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ สำหรับการวัดมุมข้อต่อนั้น เราอาจใช้ Potentiometer, Hall Effect Sensor หรือ Encoder แต่ในรายงานนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้ Encoder ในการวัดมุมเท่านั้น Encoder โดยทั่วไปจะประกอบด้วยแผ่นจานหมุนที่มีเส้นร่องแสงวางตัวตามแนวเส้นรอบวง และมี LED และ Photo Element วางอยู่คนละด้านของแผ่นจาน เมื่อจานเกิดการหมุน ก็จะทำให้แสงจาก LED วิ่งผ่านร่องแสงหรือถูกบังแสงสลับกันไป ทำให้สัญญาณแสงที่ตกกระทบ Photo Element มีลักษณะเป็น Dark กับ Light สลับกัน หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งคือเมื่อจานเกิดการหมุน จะทำให้ photo Element สร้างสัญญาณรูปคลื่นวิ่งไปพร้อมกับการหมุน จากนวนลูกคลื่นจะสัมพันธ์โดยตรงกับตำแหน่งของข้อต่อ



รูปที่ ค.1 สัญญาณที่ได้จาก Encoder แบบ Incremental

เพื่อให้สามารถทราบทิศทางการหมุน Encoder จะมีสัญญาณรูปคลื่น 2 ชุด ที่ทำมุมกัน 90 องศา หรือต่อไปจะเรียกว่า เฟส A และเฟส B การพิจารณาตำแหน่งสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเฟสทั้ง 2 นี้จะทำให้ทราบได้ว่าตอนนี้ Encoder หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา หรือตามเข็มนาฬิกา ในการนับลูกคลื่นของสัญญาณนั้น หากนับเฉพาะสัญญาณขาขึ้นของสัญญาณเฟส A เท่านั้น ความแม่นยำของ Encoder จะมีค่าเท่ากับจำนวนของร่องแสง หากเรานำสัญญาณขาลงมาคิดด้วย ก็จะมี

ทำให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และโดยการนำสัญญาณขาขึ้นและขาลงของสัญญาณเฟส B มาร่วมคิด ก็จะทำให้ความแม่นยำเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า



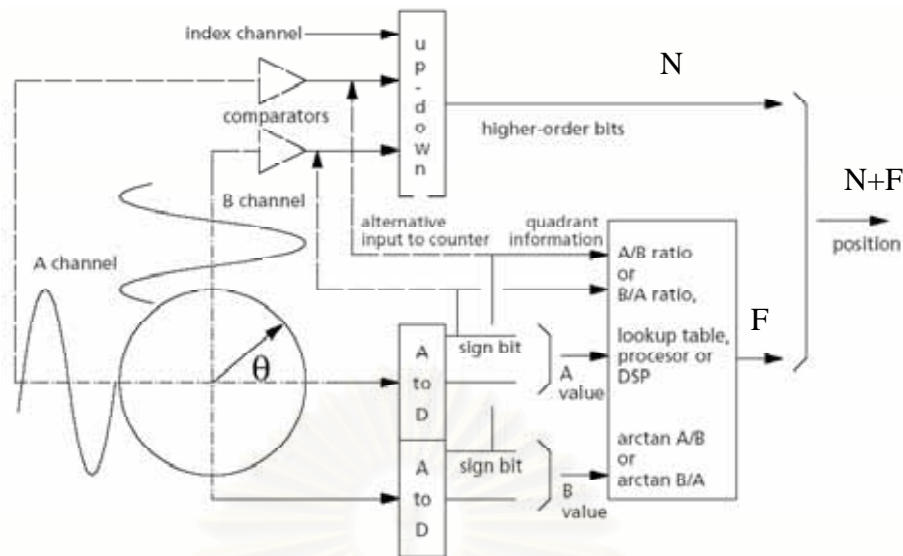
รูปที่ ค.2 การนับสัญญาณการเคลื่อนที่ จากสัญญาณ A, B

การวัดมุมในลักษณะที่กล่าวมานี้ จะทำให้เราทราบตำแหน่งมุมข้อต่อแบบสัมพัทธ์เท่านั้น หากเราต้องการทราบค่าตำแหน่งสัมบูรณ์ก็อาจกระทำได้โดยการใช้ Absolute Encoder ซึ่งจะไม่กล่าวถึงในที่นี้ อีกวิธีการหนึ่งในการทราบตำแหน่งสัมบูรณ์ก็สามารถทำได้โดยการใช้สัญญาณเฟส Z (หรือเรียกว่าสัญญาณ Index) สัญญาณเฟส Z นี้จะมีลักษณะเป็นลูกคลื่นเพียงลูกเดียวต่อการหมุน 1 รอบ หากเราทำการหาตำแหน่งสัญญาณขาขึ้นของสัญญาณเฟส Z ในขณะที่หมุน Encoder ตามเข็มนาฬิกา เราก็อาจใช้ตำแหน่งที่พบสัญญาณดังกล่าวนี้เป็นตำแหน่งอ้างอิงเพื่อตั้งค่าศูนย์ของข้อต่อได้

ในการวัดมุมข้อต่อให้ละเอียดขึ้นไปอีกอาจกระทำได้โดยใช้ Encoder แบบ Sine/Cosine Encoder ซึ่งสัญญาณเฟส A และ B จะมีลักษณะเป็นรูป Sinusoidal การพิจารณาตำแหน่งของสัญญาณบน Sinusoidal Wave จะทำให้ทราบมุมอย่างละเอียด ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

ค.2 ระบบวัดมุมกระจกของ Chula LPS

การวัดมุมของระบบ Chula LPS จะวัดมุมด้วย Optical Encoder ความละเอียดสูง โดย ใช้ Encoder ที่มีสัญญาณเฟส A/B จำนวน 2048 ลูกคลื่นต่อรอบ และลูกคลื่นเป็นรูปไซน์ (Sinusoidal) Encoder ในแบบนี้จะให้สัญญาณรูปไซน์ 2 ชุดสัญญาณที่ทำมุมกัน 90 องศา การวัดมุมเป็นแบบสัมพัทธ์ (Incremental) คือนับจำนวนลูกคลื่นซึ่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับตำแหน่งของข้อต่อ และมาพิจารณาร่วมกับค่าสัญญาณไซน์ซึ่งจะเป็นตำแหน่งละเอียดของข้อต่อ หากการวัดค่าสัญญาณไซน์มีความละเอียด 6 บิต หรือแสดงความแตกต่างของสัญญาณได้ 64 ระดับ ก็จะทำให้สามารถวัดมุมได้ละเอียดสูงสุดเท่ากับ 2048×64 หรือเท่ากับ 131072 ลูกคลื่นต่อรอบ



รูปที่ ค.3 วงจรการคำนวณตำแหน่งจากสัญญาณ Sinusoidal A, B

[www.opticalencoder.com]

ในการใช้งานนั้น วงจรประมวลผลสัญญาณจะต้องมีความเร็วสูงมาก เพื่อให้สามารถประมวลผลสัญญาณได้ทันเวลา เราจะนำสัญญาณเฟส A/B ที่มีรูปคลื่นเป็นแบบซายน์มาผ่านวงจร Comparator เพื่อประสัญญาณให้รูปคลื่นเป็นแบบสี่เหลี่ยม (Square) และจากนั้น นำสัญญาณเฟส A/B แบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมไปผ่านวงจรรีบเพื่อนับจำนวนลูกคลื่นของสัญญาณซึ่งจะเป็นตำแหน่งหยาบ (N, Most Significant) ของข้อต่อ ส่วนค่าสัญญาณซายน์จะนำไปคำนวณผ่านวงจร A/D เพื่อแปลงเป็นค่าเชิงตัวเลข (Digital) และนำไปใช้เป็นค่าละเอียด (F, Least Significant) ของข้อต่อ แล้วจึงนำข้อมูลทั้งสองส่วนมารวมกัน (N+F) ดังในรูปที่ ๓.3 เมื่อพิจารณาถึงความเร็วในการประมวลผลสัญญาณ หากสมมติให้ข้อต่อหมุนที่มีความเร็ว 10 รอบต่อวินาที วงจรรีบสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมจะต้องมีความเร็ว $2048 \times 4 \times 10$ หรือประมาณ 84 kHz เท่านั้น ในขณะที่วงจรแปลงค่าสัญญาณซายน์จะต้องมีความเร็ว $2048 \times 64 \times 10$ หรือมากกว่า 1.3 MHz ต่อ 1 ช่องสัญญาณ หากต้องการความละเอียดในการวัดมุมข้อต่อมากขึ้นไปอีก ก็จะต้องแปลงค่าสัญญาณซายน์ที่ความละเอียดขึ้น ซึ่งจะทำให้ต้องการความเร็วในการแปลงค่าสัญญาณที่สูงขึ้นตามไปด้วย แต่เนื่องวิธีการที่ใช้ตามในรูปที่ ๓.3 นั้น การแปลงค่าสัญญาณซายน์นี้ให้ข้อมูลเป็นค่าละเอียด (Least Significant) จึงไม่มีความสำคัญเมื่อข้อต่อหมุนที่มีความเร็วสูง และก็ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนับไม่พลาดเช่นเดียวกับวงจรวัดค่าส่วนหยาบ ดังนั้นระบบวัดค่าส่วนละเอียดก็ไม่ต้องมีความเร็วมากเท่ากับวงจรวัดค่าส่วนหยาบ

สำหรับระบบ ต้นแบบ LPS ที่จัดสร้างขึ้นนั้น การนับสัญญาณเฟส A/B รูปสี่เหลี่ยมจะใช้การ์ดควบคุมของบริษัท Adlink รุ่น PCI-8133 ที่สามารถนับสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่มีความเร็ว

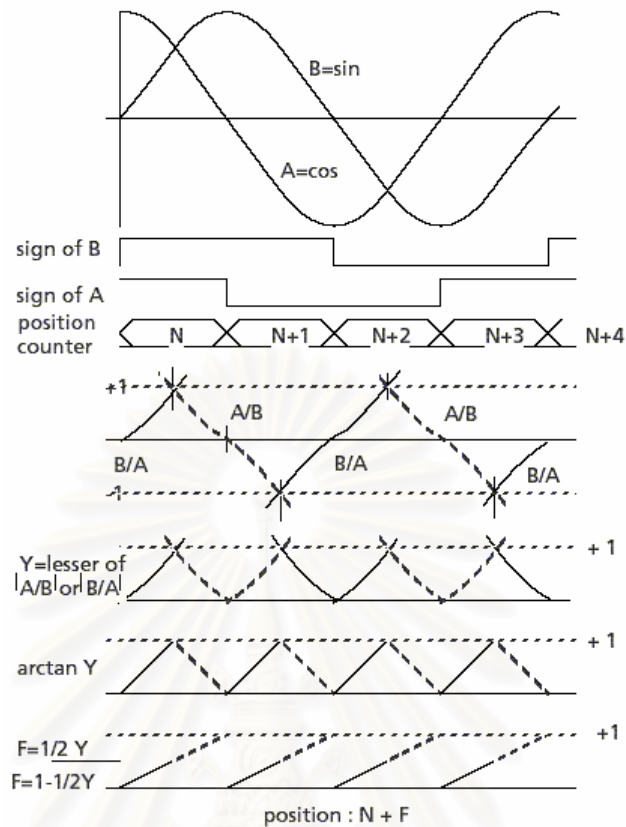
มากกว่า 10 MHz และสำหรับการวัดสัญญาณรูปซายน์และแปลงค่าเป็นเชิงตัวเลขจะใช้การ์ดควบคุมของบริษัท Adlink รุ่น PCI-9112 ซึ่งมีความเร็วในการอ่านค่า A/D สูงสุด 100 kHz (การแปลงค่า A/D เป็นแบบ Successive approximation) เมื่ออ่านค่ามาได้แล้วก็ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมในการคำนวณตำแหน่งละเอียด ดังนั้นความเร็วของการวัดส่วนละเอียดก็จะขึ้นกับความเร็วของคอมพิวเตอร์ในการประมวลผล (sampling time) ซึ่งคาดว่าจะไม่น้อยกว่า 1 kHz และดังที่ได้กล่าวมาแล้วในกรณีที่ข้อต่อหมุนด้วยความเร็วสูงเกินกว่าที่จะสามารถประมวลผลได้ทันนั้น การวัดมุมจะใช้ข้อมูลเพียงจากการนับสัญญาณเฟส A/B รูปสี่เหลี่ยมเท่านั้น เมื่อข้อต่อมีความเร็วช้าเพียงพอ ระบบก็จะนำค่าสัญญาณซายน์มาประมวลผลเพื่อให้ตำแหน่งข้อต่อมีความแม่นยำสูงขึ้น การทำงานในลักษณะนี้จะทำให้เราทราบตำแหน่งที่ละเอียดมากของข้อต่อในเวลาข้อต่อหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ ซึ่งเพียงพอสำหรับการใช้งานโดยทั่วไป

การคำนวณค่าตำแหน่งจากตำแหน่งของสัญญาณรูปซายน์นั้น เราสามารถคำนวณตำแหน่งได้จากสมการ

$$\text{ตำแหน่งละเอียดของข้อต่อ (F)} = \arctan(A/B)$$

การคำนวณค่า $\arctan(A/B)$ อาจกระทำได้จาก 1) การคำนวณ $\arctan(A/B)$ โดยตรง หรือ 2) ประมาณค่าให้เท่ากับ A/B หรือ 3) ใช้ Lookup table หรือ DSP ในการประมาณค่า สำหรับในงานวิจัยนี้ เราจะประมาณจากค่า A/B โดยที่ในทางปฏิบัติ เราไม่สามารถใช้สมการนี้คำนวณโดยตรงได้ เนื่องจากในกรณีที่ B มีค่าน้อยมากหรือเข้าใกล้ศูนย์ จะทำให้มีความผิดพลาดจากการคำนวณสูง (เนื่องจาก A/B จะมีค่าเข้าใกล้อนันต์ ซึ่งอาจทำให้เกิด Overflow จากการคำนวณขึ้น) เราอาจหลีกเลี่ยงปัญหานี้ได้โดยคำนวณค่า $\arctan(B/A)$ แทนในกรณีที่ขนาดของ B มีค่ามากกว่าขนาดของ A หรือเขียนเป็นแผนภาพของการคำนวณได้ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.4 การคำนวณตำแหน่งละเอียดจากสัญญาณ A, B ที่ใช้

[www.opticalencoder.com]

โดยค่าตำแหน่งที่ได้คือค่า $N+F$ การคำนวณทำได้ดังนี้

ถ้า $\text{abs}(B) < \text{abs}(A)$

ให้ $Y = B/A$

ให้ $Y_p = \arctan(\text{abs}(Y)) * 180 / (45 * p)$

ถ้า $Y > 0$, $F = Y_p / 2$ และ ถ้าไม่ $F = 1 - Y_p / 2$

ตำแหน่งคือ $N+F$

ถ้า $\text{abs}(B) > \text{abs}(A)$ หรือ ถ้า $\text{abs}(B) = \text{abs}(A)$

ให้ $Y = A/B$

ให้ $Y_p = \arctan(\text{abs}(Y)) * 180 / (45 * p)$

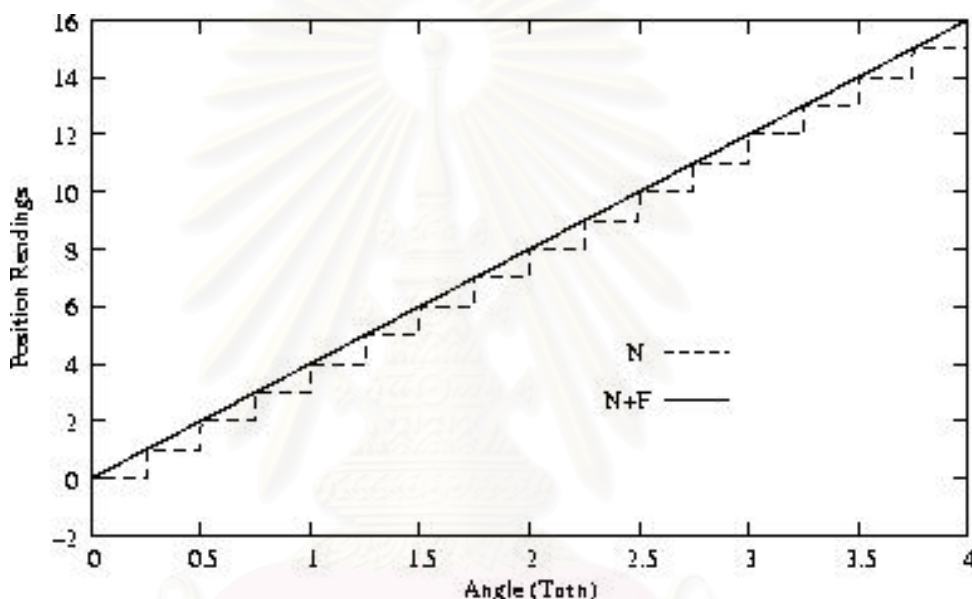
ถ้า $Y > 0$, $F = 1 - Y_p / 2$ และ ถ้าไม่ $F = Y_p / 2$

ตำแหน่งคือ $N+F$

โดยที่ค่า N ได้มาจากวงจรนับ A/B counter แต่การคำนวณนี้จะต้องมีการปรับให้เหมาะสมกับระบบ LTS ในงานวิจัยนี้ โดยจะแสดงให้เห็นความสำคัญในส่วนต่อไป

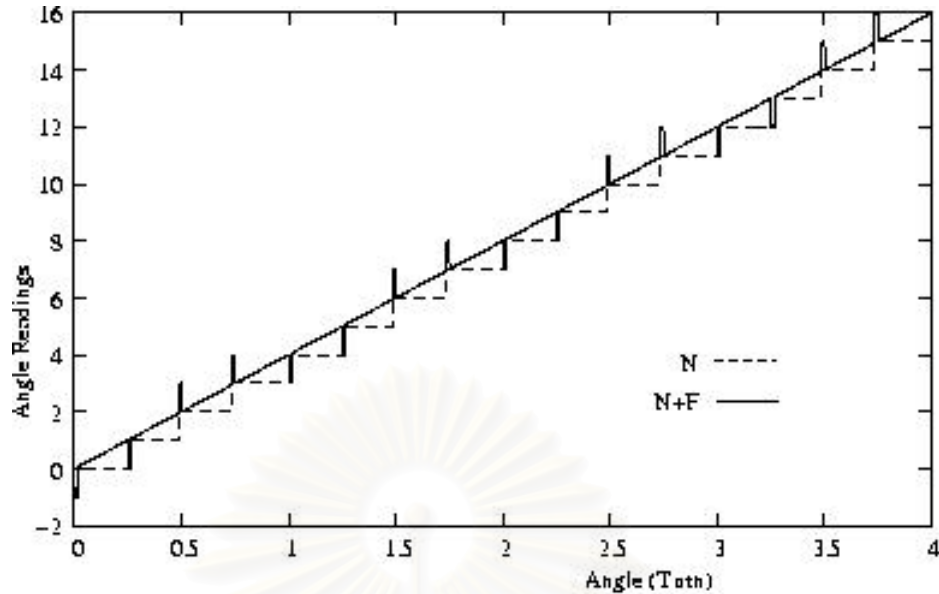
ค.3 การทดสอบวิธีการจากการจำลอง

วิธีการคำนวณตำแหน่งดังแสดงข้างต้น สามารถนำมาทดสอบจากการจำลองในคอมพิวเตอร์ (Simulation) โดยมีผลดังแสดงในรูปที่ ค.5 ในรูปนี้เป็นผลที่ได้จากการการคำนวณข้างต้น (simulation) เมื่อจำลองให้ Encoder หมุนไป 4 รอบ โดยสมมุติว่า Encoder นี้มีสัญญาณ sinusoidal เพียง 1 cycle ต่อหนึ่งรอบ เส้นประแสดงค่าจำลองที่จะอ่านได้จาก Encoder card ที่มีการทำ quadrature (คูณ4) จากสัญญาณ square(A) และ square(B) (ค่า N ในรูป) และเส้นทึบในรูปแสดงค่าที่จะอ่านได้จากการนำเอาสัญญาณชายน้เข้ามาพร้อมคำนวณด้วย



รูปที่ ค.5 ผลการจำลองเมื่ออุปกรณ์ทำงานแบบอุดมคติ

แต่ในการใช้งานจริงบนระบบที่ได้ออกแบบในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้จะไม่ดีเช่นในรูปที่ ค.5 เพราะการสร้างสัญญาณ square wave (square(A) and square(B)) เพื่อใช้ในการหาค่า N นั้น ทำจากวงจรไฟฟ้า แต่การคำนวณค่า F จะทำจากสัญญาณดิจิตอลที่อ่านจากอุปกรณ์ A to D ซึ่งทำให้สัญญาณทั้งสองนี้มีค่าไม่สอดคล้องกัน เช่น การที่ตัว comparator ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ square wave (sign(A) หรือ sign(B)) ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไม่ใช่ค่าที่กึ่งกลางของสัญญาณ (เช่น ผลจากการใช้ Hysteresis ในวงจร comparator ที่จำเป็นต้องใช้เพื่อป้องกันการเปลี่ยนกลับไปมาของสัญญาณ) Sinusoid มาเปรียบเทียบกับสัญญาณ sinusoid ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ ค.6 (และ A to D นั้นก็ใช้ค่าที่ไม่ตรงกัน)

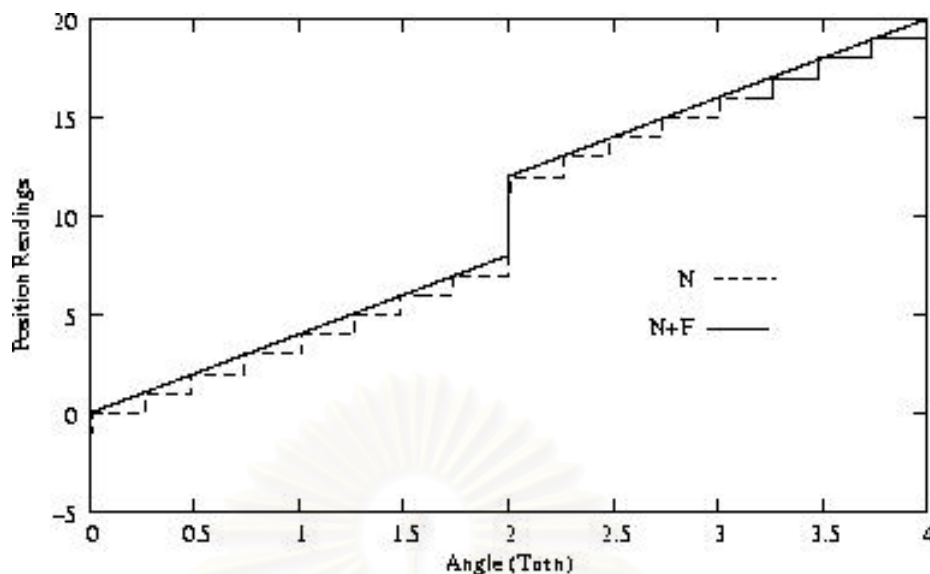


รูปที่ ค.6 ผลการจำลองเมื่ออุปกรณ์ทำงานแบบไม่อุดมคติ

ดังนั้นต้องมีการปรับระบบเพื่อให้เหมาะกับระบบที่ได้สร้างขึ้น โดยวิธีการที่ผู้วิจัยเสนอขึ้น คือ จะต้องคำนวณตำแหน่งจาก ค่า N และ F จากสัญญาณจากที่เดียวกันคือ จาก วงจร D to A แต่การทำแบบนี้จะทำให้ระบบไม่สามารถตามการหมุนที่มีความเร็วสูงได้ (ค่า N จะผิดไป) จึงจะต้องมีการอ่านค่า N จากวงจร counter เข้าเป็นระยะเพื่อใช้ปรับค่า N ให้ถูกต้อง ถ้าให้ N เป็นค่า ตำแหน่งหยาบ ที่คำนวณมาจากสัญญาณ sine wave การคำนวณหาค่า N จะทำได้ตามในรูปที่ ค.2 และ การปรับค่า N นั้นจะทำได้ดังนี้

ถ้า $\text{abs}(N-N_c) > 1$ ให้ $N = N_c$

เมื่อ N_c คือค่าตำแหน่งหยาบที่วัดได้จาก Counter card เมื่อแก้ไขแล้ว ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ ค.7 ในรูปนี้ค่า N ที่แสดงเป็นค่าที่อ่านจากวงจร counter และการคำนวณตำแหน่งใช้ค่า N การคำนวณจากสัญญาณจาก วงจร D to A ในช่วงกลางของรูปแสดงการกระโดดของสัญญาณ N_c ที่วัดจากวงจร counter ซึ่งเป็นการจำลองการหมุนที่เร็วจนค่า N จากการคำนวณตามไม่ทัน ในรูปเส้นทึบแสดงค่า N+F จากการคำนวณจากวิธีที่ได้เสนอข้างต้น



รูปที่ ค.7 ผลการจำลองเมื่ออุปกรณ์ทำงานแบบไม่อุดมคติ ที่มีการปรับระบบการคำนวณแล้ว

ข้อสังเกต

จากวิธีการที่เลือกใช้ มีข้อสังเกตดังนี้

ในการอ่านค่าสัญญาณ Sinusoidal Wave นั้น เราใช้การ์ดควบคุม Data Acquisition ซึ่งมีวงจร A/D Converter แบบ Successive Approximation และการแปลงค่าจะกระทำผ่าน Multiplexer ซึ่งจะต้องใช้เวลาในการแปลงค่าสัญญาณ ในการอ่านค่าสัญญาณ Sinusoidal Wave ที่ความเร็วสูง อาจทำให้ไม่สามารถแปลงค่าเป็นดิจิทัลได้ทันที ดังนั้นในขณะที่ข้อต่อหมุนที่ความเร็วต่ำแห่งข้อต่อจะนำเฉพาะตำแหน่งหยาบมาคิดเท่านั้น และจะคำนวณตำแหน่งละเอียดเฉพาะเมื่อข้อต่อมีความเร็วต่ำหรือหยุดนิ่ง ในอนาคต หากต้องการปรับสมรรถนะในเรื่องความเร็ว อาจต้องใช้วงจร A/D Converter แบบ Flash Converter หรือแปลงค่าแบบ Simultaneous Sampling

การอ่านค่าสัญญาณ Sinusoidal Wave ของเฟส A และ B ของ Encoder ทั้ง 4 ตัวในระบบ ผ่าน Multiplexer จะทำให้ค่าสัญญาณที่อ่านได้มีเวลาที่แตกต่างกัน อาจต้องนำเรื่อง Time Lag มาร่วมคิดเพื่อพัฒนาการคำนวณตำแหน่งของ Retro-reflector ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

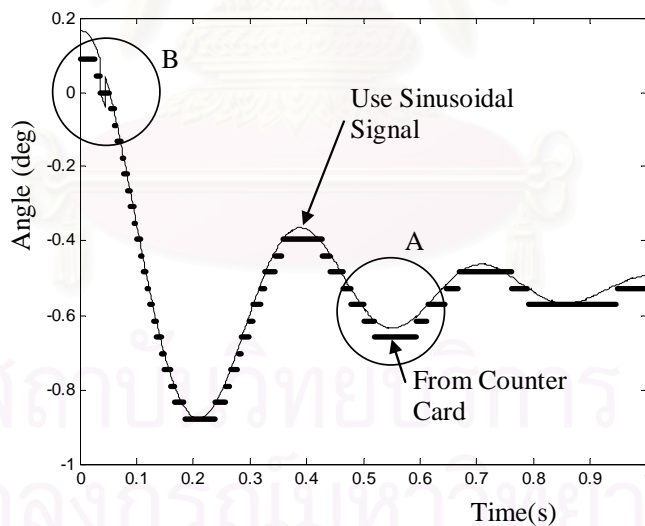
ค.4 การทดสอบระบบวัดมุมกระจกของ ต้นแบบ LTS

ในส่วนนี้แสดงผลการทดสอบการทำงานของระบบ LTS ดังนี้ 1) การแสดงความถูกต้องของระบบการคำนวณ 2) การทดสอบการวัดตำแหน่ง

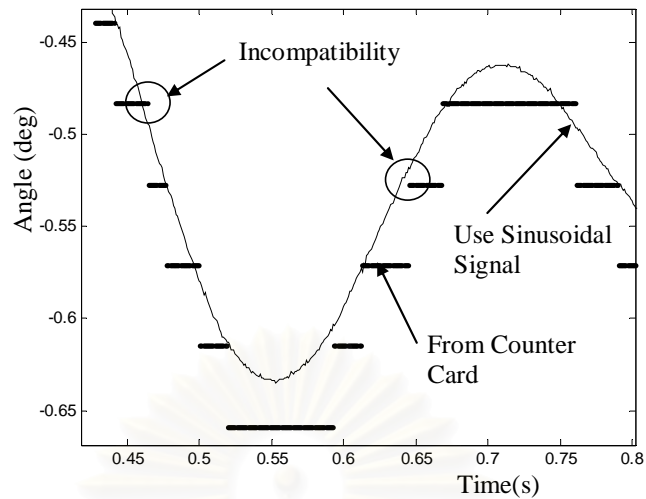
1) การทดสอบการทำงานของระบบคำนวณตำแหน่ง

ในส่วนนี้แสดงผลการทดสอบระบบการคำนวณในระบบจริงนั้น พบว่าระบบทำงานได้ดังที่ต้องการ ในการทดสอบแรกนี้ผู้วิจัยทำการขยับมุม Azimuth ไปมา แล้วทำการวัดค่ามุมที่ได้ ทั้งโดยวิธีแรก คือการใช้ สัญญาณ Sine wave มาผ่านวงจร comparator แล้วใช้กับ PC counter quadrature card เพื่อวัดมุม (ดังผลการวัดการติดตามในบทที่ 6 และบทที่ 8) และ วิธีที่สองคือ นำเอา ข้อมูลของ sine wave มาใช้ด้วย

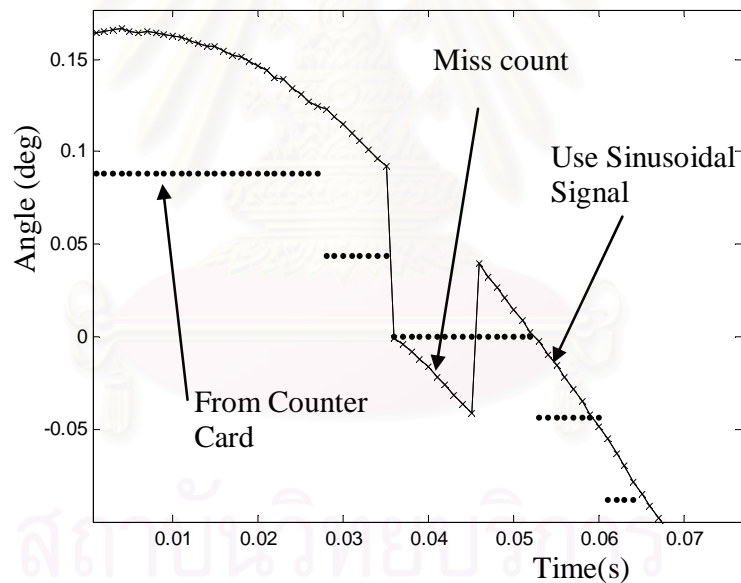
ในรูปที่ ค.8- ค.10 แสดงผลที่ได้จากการทดลองทำการขยับมุม Azimuth ไปมา ในรูป ค่าที่แสดงด้วยจุดเป็นค่าที่วัดได้จาก Counter card และ ค่าที่แสดงเป็นเส้นทึบคือค่าที่ได้เมื่อใช้ สัญญาณ sine wave มาร่วมในการคำนวณด้วย ในรูปที่ ค.8 จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการใช้ sinusoidal signal นั้นจะมีความละเอียดกว่ามาก ในส่วนของรูป A และ B นั้นแสดงให้เห็นรูปที่ ค.9 และ ค.10 ในรูปที่ ค.9 จะเห็นว่าค่าที่ได้จาก Counter card ในจุดที่มีการเปลี่ยนค่า นั้นไม่ตรงกับค่าที่อ่านได้จากวิธีคำนวณจากสัญญาณ Sinusoid นี้เป็นผลโดยตรงจากการที่วงจรไฟฟ้าที่ใช้ในระบบทั้งสองนี้ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าจุดกึ่งกลางของ Sinusoid signal ที่ต่างกันดังที่ได้อธิบายในส่วนก่อนหน้านี้ และค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีการกระโดดเช่นเดียวกับในรูปที่ ค.6 ถ้าไม่มีการปรับวิธีการคำนวณดังที่ได้กล่าวไว้



รูปที่ ค.8 ค่ามุม Azimuth ที่วัดได้จาก Counter card และจากการคำนวณโดยใช้ sine wave



รูปที่ ค.9 ค่ามุม Azimuth ที่วัดได้จาก Counter card และจากการคำนวณโดยใช้ sine wave (ขยายส่วน A ในรูปที่ ค.8)



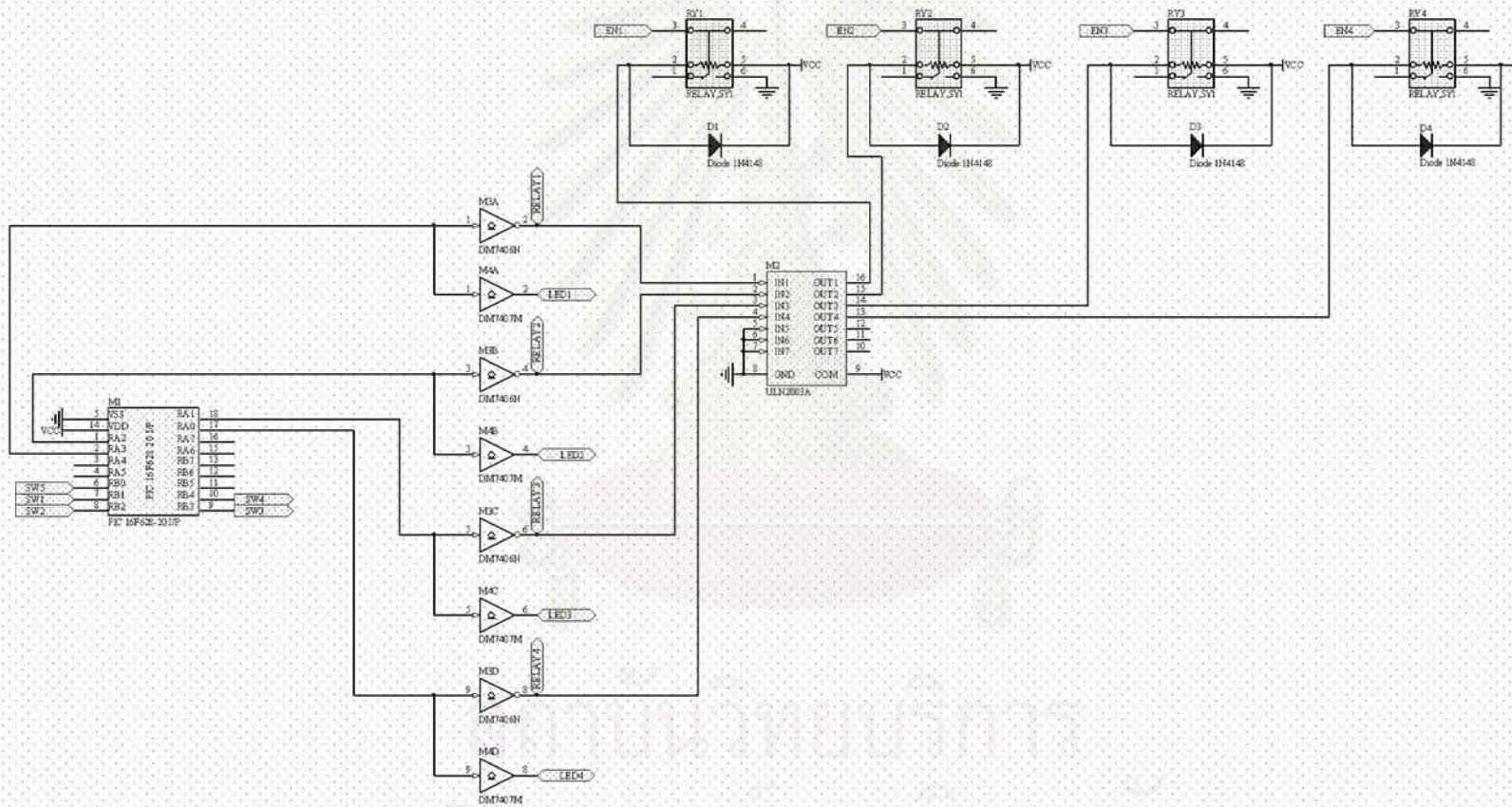
รูปที่ ค.10 ค่ามุม Azimuth ที่วัดได้จาก Counter card และจากการคำนวณโดยใช้ sine wave ขยายส่วน B ในรูปที่ ค.8)

อย่างไรก็ตาม ระบบการคำนวณนั้นถูกจำกัดด้วยความเร็วของการทำงานของโปรแกรม การควบคุมในคอมพิวเตอร์ และ เมื่อสัญญาณมุม (sine wave) ที่ใช้นั้นเร็วไป ก็จะทำให้การทำงานผิดพลาดดังแสดงในรูปที่ ค.10 ค่าที่ผิดก็คือค่าหายาบ (N ในโปรแกรมที่แสดง) แต่ค่าหายาบนี้จะไม่ผิดเกิน 1 และ จะถูกปรับให้ถูกเมื่อค่าที่จะผิดเกินหนึ่งดังในรูป

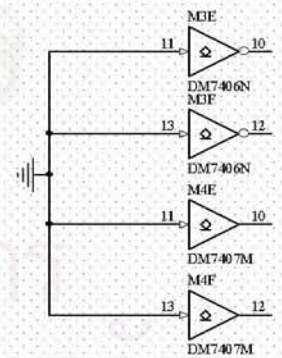
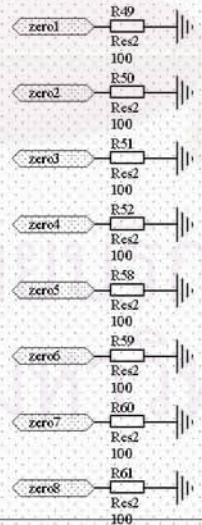
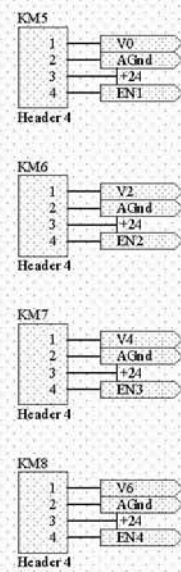
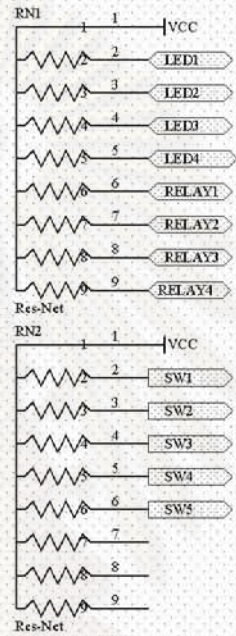
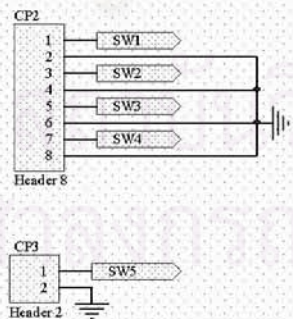
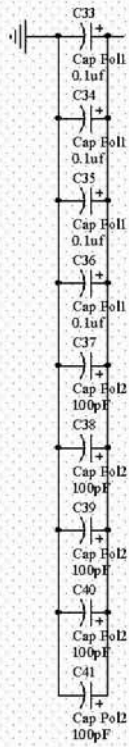
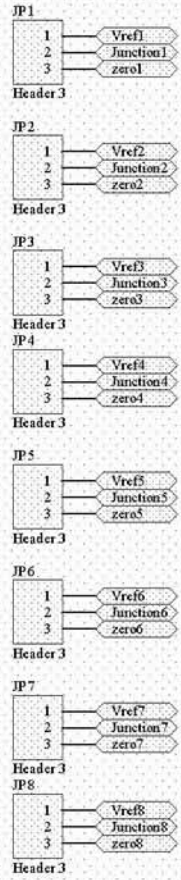
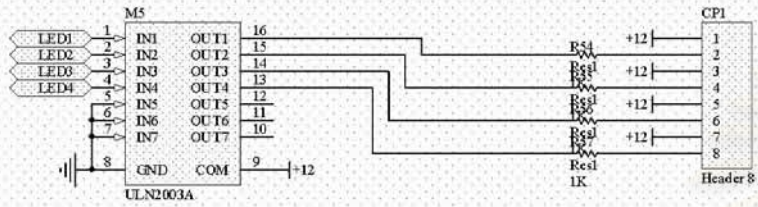


ภาคผนวก ง
แผนผังวงจรไฟฟ้า

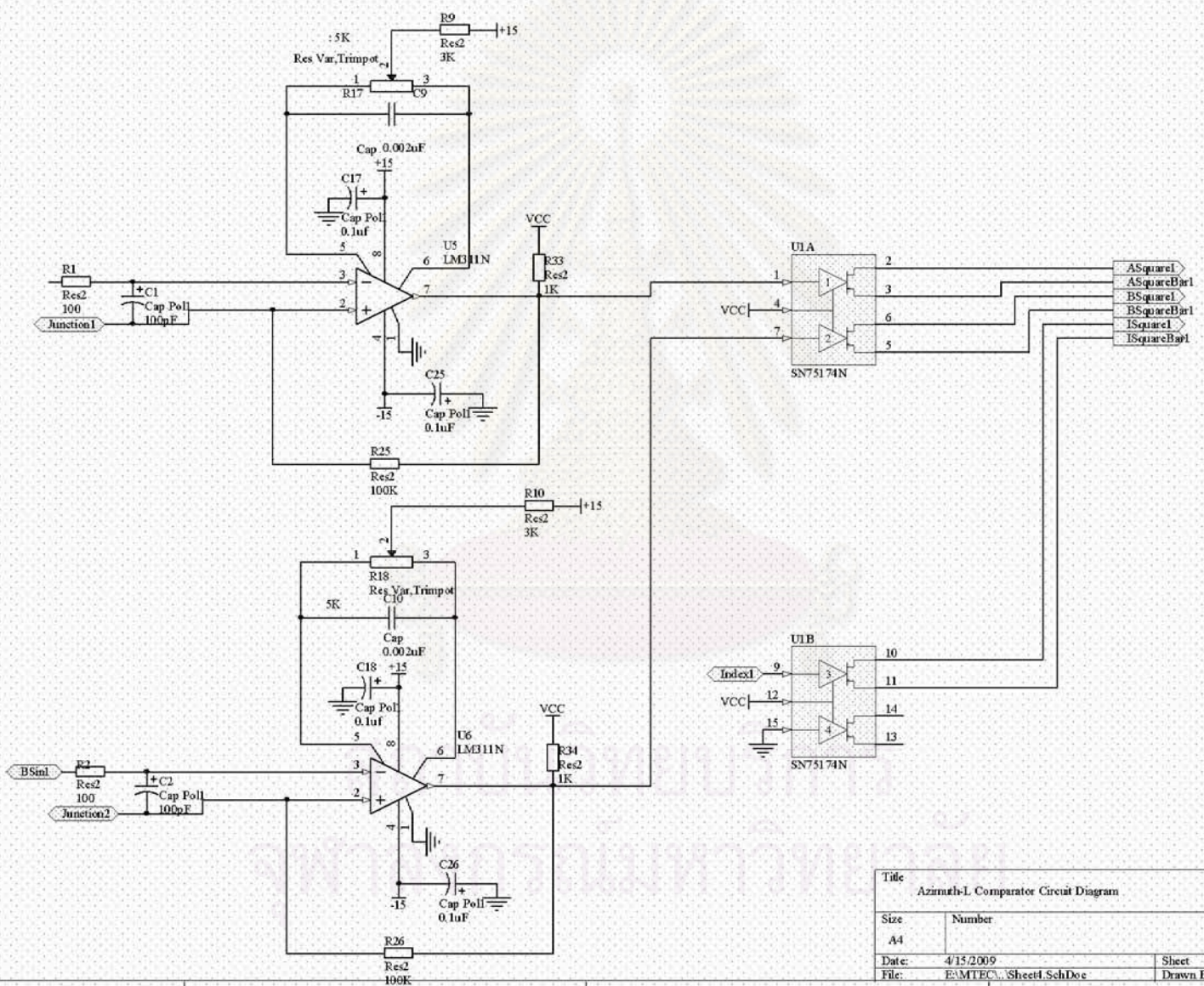
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



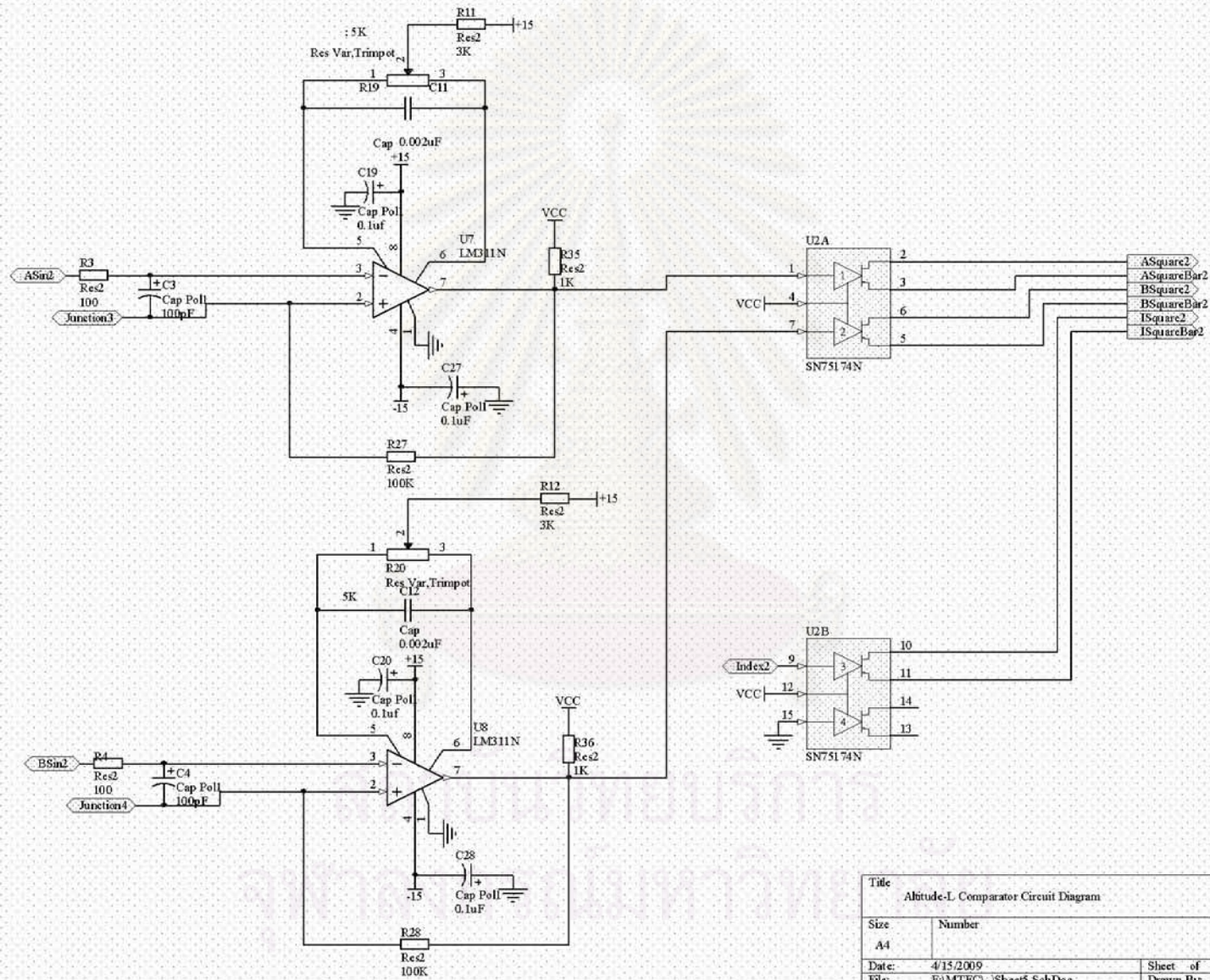
Title		
Relay Driver Diagram		
Sheet	Number	Revision
A3		
Date:	4/15/2009	Sheet of
File:	EMITFEC3_Sheet12.SchDoc	Drawn By:



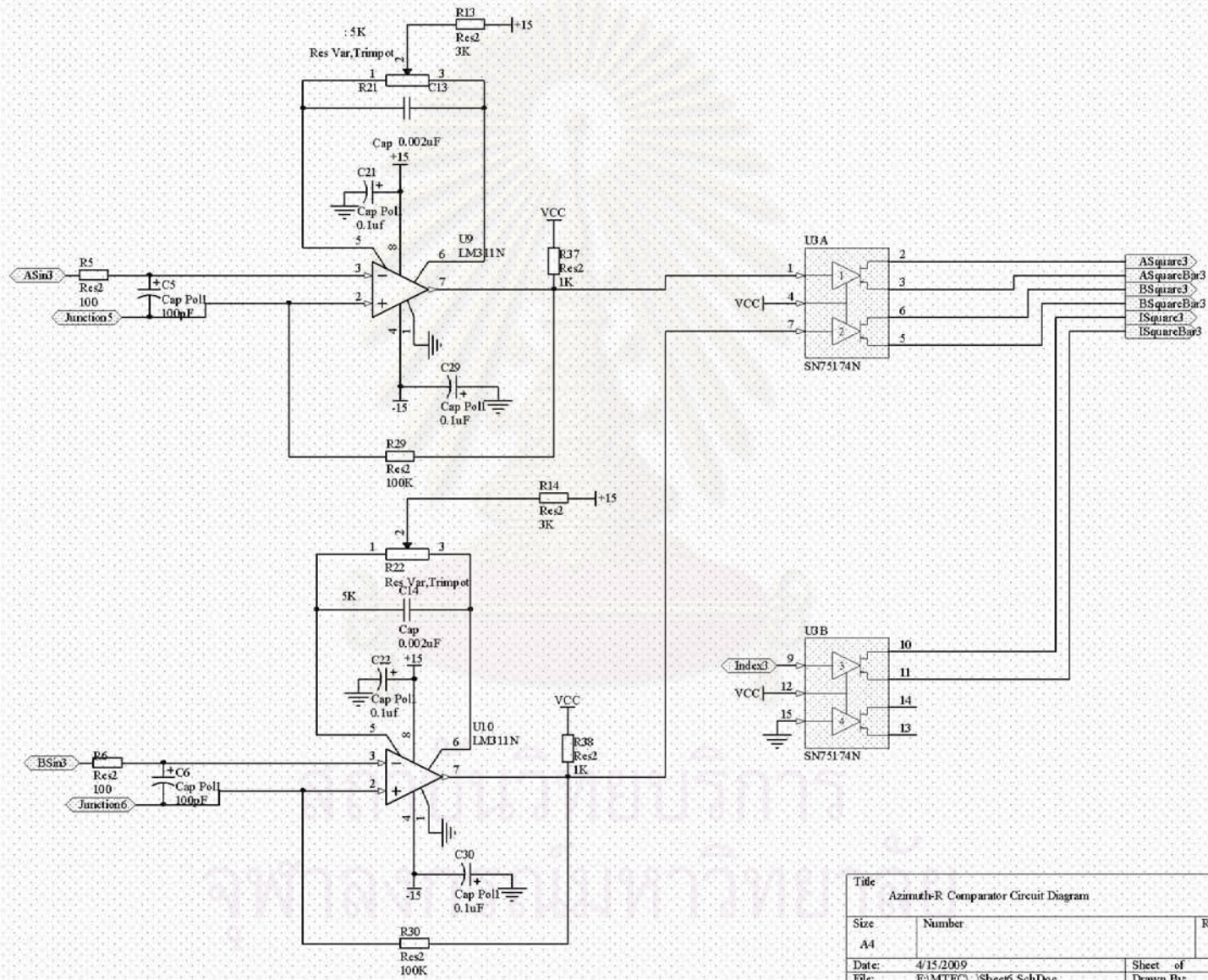
Title		
Front Panel Control Circuit Diagram		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/15/2009	Sheet of
File:	E:\MTEC\... Sheet3.SchDoc	Drawn By:



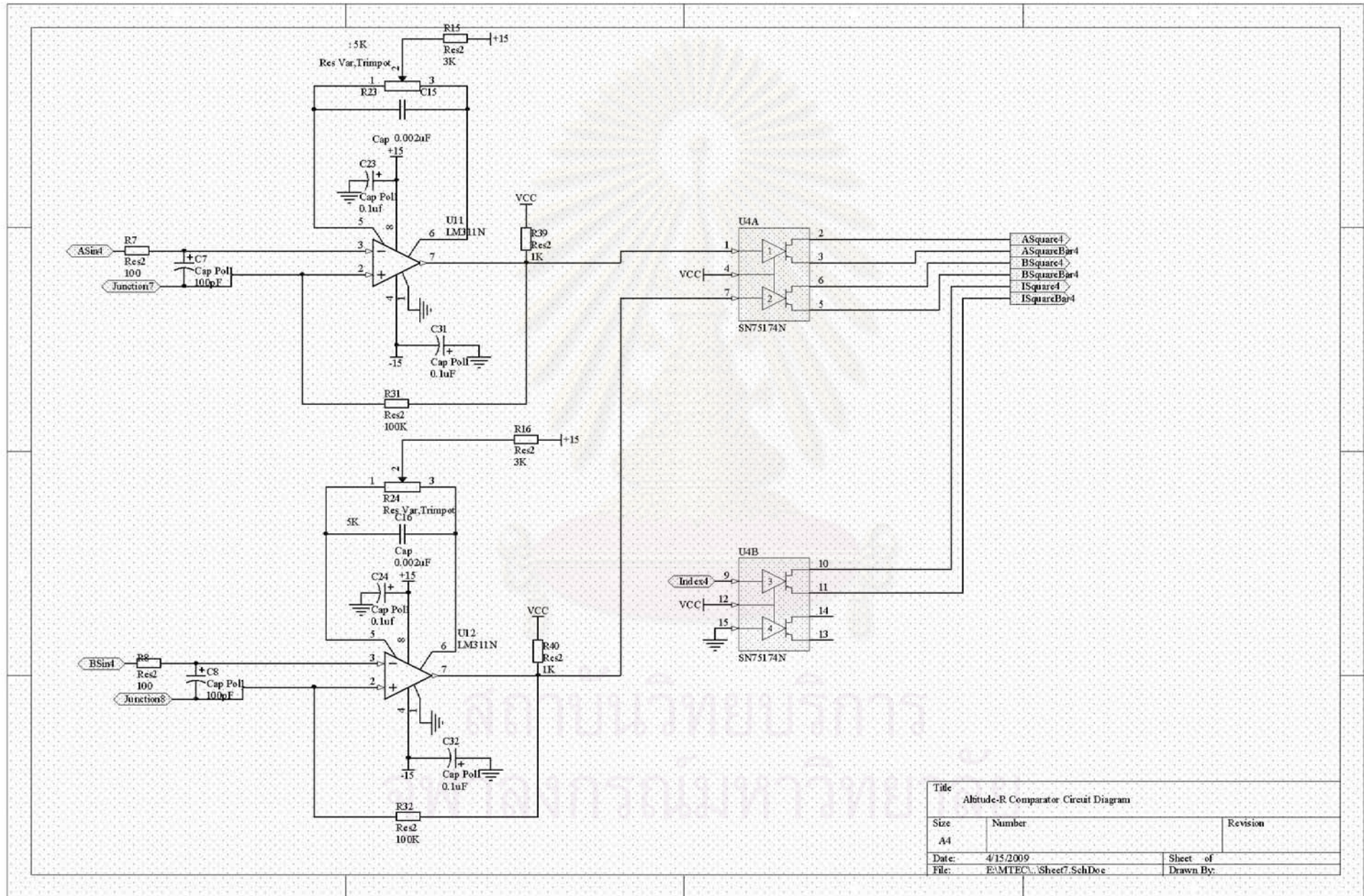
Title		
Azimuth-L Comparator Circuit Diagram		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/15/2009	Sheet of
File:	E:\MTEC\...Sheet1.SchDoc	Drawn By:



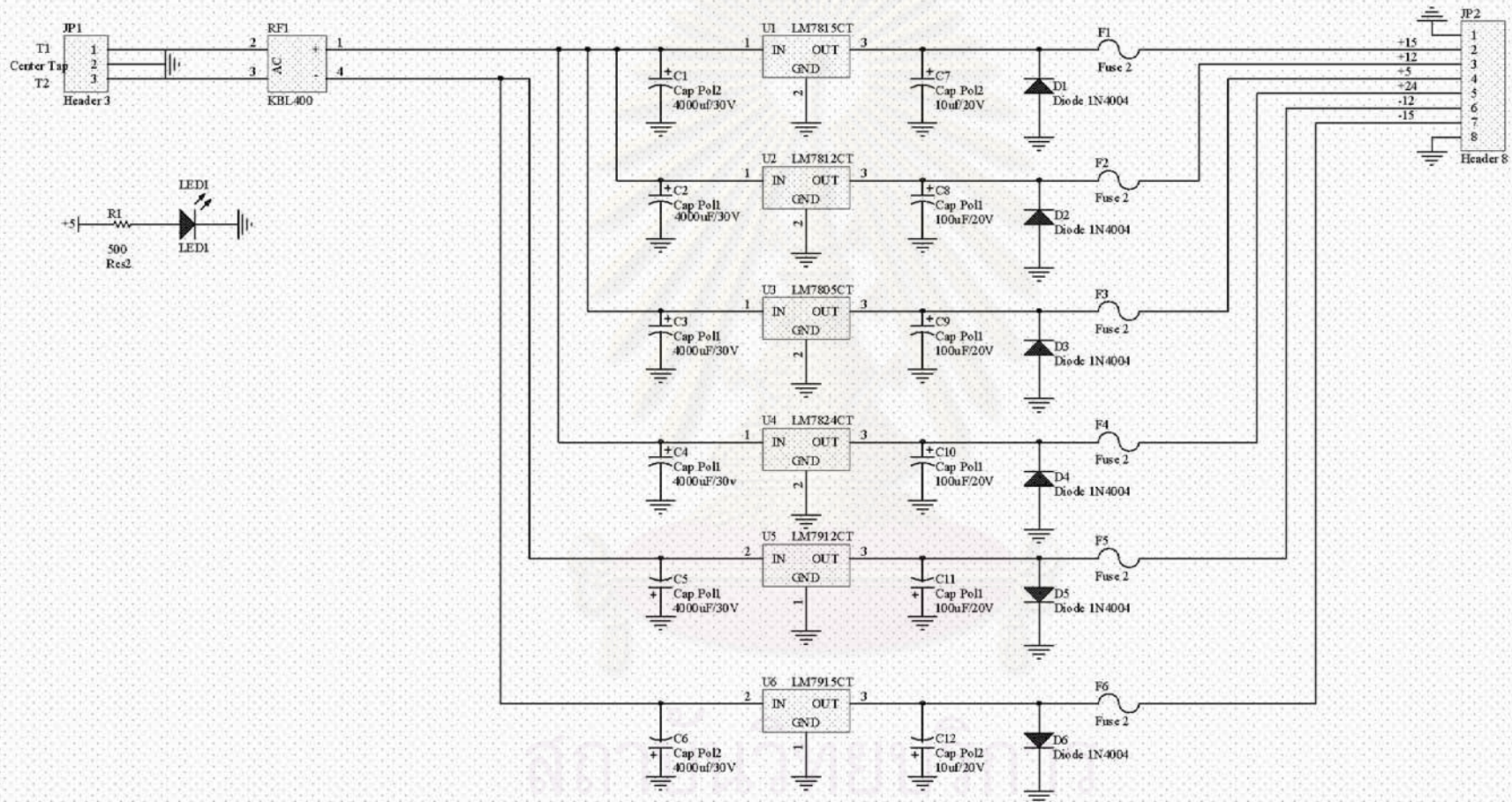
Title		
Altitude-L Comparator Circuit Diagram		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/15/2009	Sheet of
File:	EAMTEC...Sheet5.SchDoc	Drawn By:



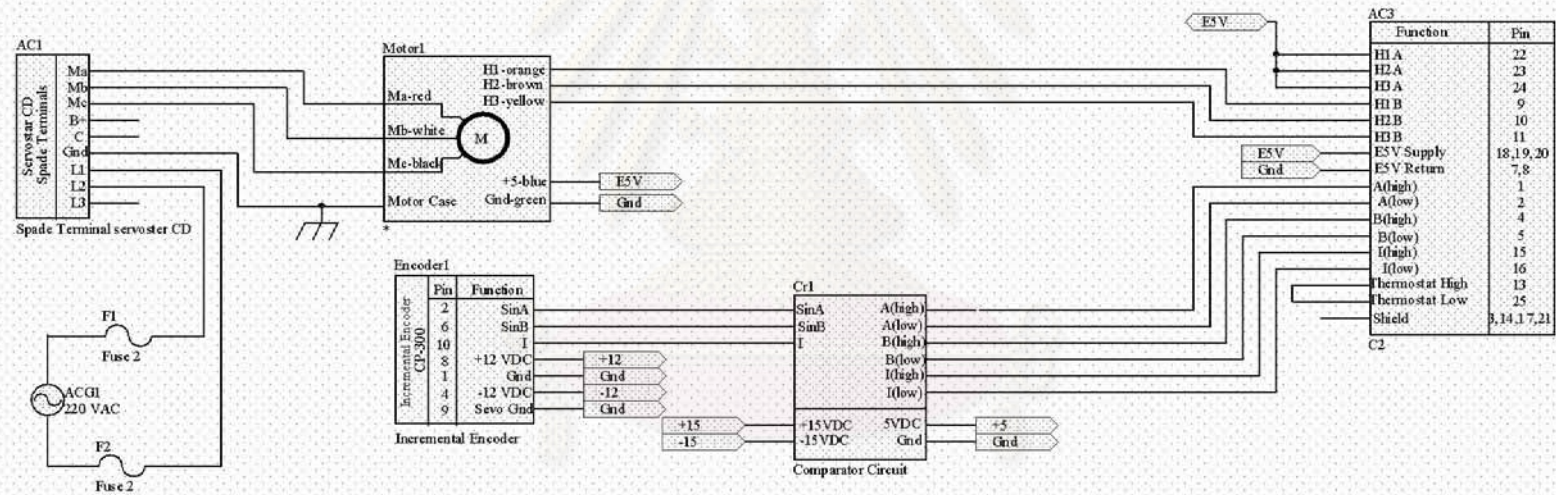
Title		
Azimuth-R Comparator Circuit Diagram		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/15/2009	Sheet of
File:	E:\MTEC\Sheet6.SchDoc	Drawn By:



Title		
Abtude-R Comparator Circuit Diagram		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/15/2009	Sheet of
File:	E:\MTEC\Sheet7.SchDoc	Drawn By:



Title: Power Supply Circuit		
Size: A4	Number:	Revision:
Date: 4/15/2009	Sheet of	
File: E:\MTEC\Power Supply and Rectifier	Sheet No.:	



Title		
Motor Wiring Connection Diagram		
Size	Number	Revision
A4		
Date:	4/15/2009	Sheet of
File:	E:\MTEC\...Connection Diagram.SCHDOC	Drawn By:



ภาคผนวก จ
บทความที่รับการตีพิมพ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tracking Controls of a Laser Positioning System

Supavut Chantranuwathana^{1*} Ratchatin Chanchareon² Jaruboot Kananai³ Prasittiporn Phongwasin⁴
^{1,2,3,4} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok 10330
*E-mail: supavut.c@chula.ac.th

Abstract

Laser Positioning System (LPS) is a type of coordinate measuring systems that can measure positions of a small and easily movable target generally mounted with a retroreflector. LPS operates by orienting a motor-driven mirror to direct a laser beam to the center of the retroreflector. When the retroreflector moves the LPS must keep the laser pointed at the center. This is done by measuring the offset of the laser beam entering the retroreflector and the reflected beam using a Photo Sensitive Detector (PSD) and adjusting the mirror orientation accordingly. This paper discusses control systems and control laws for this tracking task used by an LPS prototype built at Chulalongkorn University. The proposed controller composes of a PD inner-loop closed with an encoder signal and a PI outer-loop closed with the PSD signal. Experimental results are given in terms of tracking speed at 0.5 m and a maximum tracking range. After a further investigation, however, it was found that the open loop gain of the system is highly affected by the distance of the retroreflector. To allow full flexibility of the system, this paper also discusses methods of adjusting the control gain without directly measuring the retroreflector distance. Two methods were proposed and preliminary simulation results are provided.

Keywords: Laser Positioning System, Control System Designs, Tracking Controls

1. Introduction

In a typical robotic manufacturing, design and production of jigs and fixtures constitute a significant portion of the manufacturing cost. This is mainly because, although motions of manufacturing robots are highly repeatable, they have low accuracy [1]. Workpieces must be hold rigidly in a fixed location to exploit repeatability of the robots. As a result, jigs and fixtures, which are generally custom made for each product, are essential.

In order to reduce the fixture cost, a manufacturing technique called "Fixtureless Robotics Manufacturing" is being developed at Chulalongkorn University. In the study, a workpiece is assumed to be hold rigidly (by a low cost universal fixture), however it will arrive at the manufacturing cell with unknown position and orientation. Once arrived, the position and orientation of the workpiece will be measured using a Laser Positioning System (LPS). This data allows the robot to work on the workpiece regardless of the location of the workpiece.

The LPS was also proposed for measuring the robot's end-effector directly to improve the accuracy of the robot. As such, the LPS system is the key component of the fixtureless manufacturing technique. An example of the fixtureless manufacturing cell is shown in Figure 1. The system might employ a single station LPS (using interferometer to measure distance) or a two station LPS. A few LPS prototypes were made and are being made at Chulalongkorn University [2].

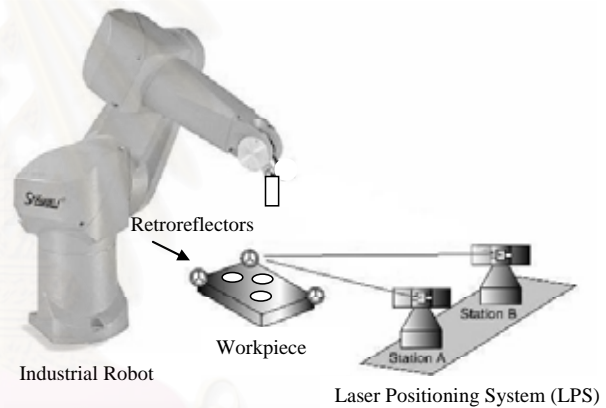


Figure 1, A fixtureless robotic manufacturing system.

This paper will focus on the control issues of this LPS system. Laser Positioning System (LPS) is a type of coordinate measuring systems that can measure positions of a small and easily movable target generally mounted with a retroreflector. For a continuous operation, LPS must be able to keep the laser pointed at the retroreflector as it moves to various measuring positions. This is done by measuring the offset of the laser beam entering the retroreflector and the reflected beam using a Photo Sensitive Detector (PSD) and adjusting the mirror orientation accordingly. This paper discusses control systems and control laws for this tracking task. Two types of control laws were tuned experimentally using PID controllers. The first use only the PSD signal to close the loop while the second use both the PSD signal and the mirror angle measurement to close the loop.

Furthermore, it is found that the open loop gain of the system is highly affected by the distance of the retroreflector. As the system operates, the open-loop gain of the system can vary as much as 10 times of the minimum value. The distance can be measured using an interferometer and can be used to adjust to control gain

[3]. The interferometer is, however, very expensive. If LPS is used only to measure a stationary object such as the workpieces, it is possible to use only one LPS system without using the interferometer. Position of a stationary retroreflector can be found by triangulation using only a single movable LPS system, which is also under development at Chulalongkorn University. Similarly, a system with two LPSs (triangulation) may not have the distance value at all times, especially at the beginning of their operation where each LPS must be brought to point at the retroreflector one system at a time. As a result, to allow full flexibility of the LPS system, this paper also discusses methods of adjusting the control gain without directly measuring the retroreflector distance. Two methods for adjusting the control gain are proposed. Simulation results are given in this paper.

2. LPS prototype

Typical components of an LPS system required to track a retroreflector are shown in Figure 2. To track the retroreflector, the system adjusts the tracking mirror to direct a laser beam to the center of the retroreflector. When the retroreflector moves, the LPS must keep the laser pointed at the center. This is done by measuring the offset of the laser beam entering the retroreflector and the reflected beam using a Photo Sensitive Detector (PSD) and adjusting the mirror orientation accordingly.

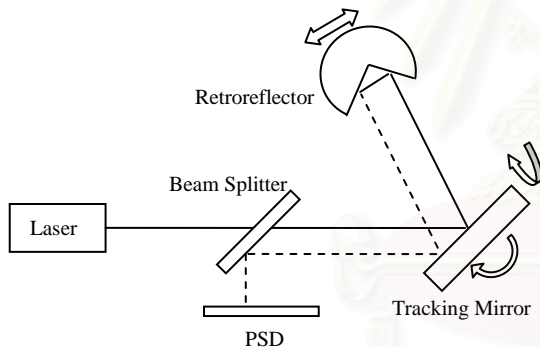


Figure 2, Tracking components of an LPS.

An LPS prototype is shown in the Figure 3. The followings are some details of the components (for more information please see [2]). The mirror is adjusted using two motors with no transmission. The azimuth motor is a 80W brushless DC motor from Maxon motor (EC32) with a maximum torque of 355 mN-m and the altitude motor is a 17W brushless DC motor from Computer Optical Product (CM335) with a maximum torque of 232 mN-m. The mirror and the altitude motor are mounted on a platform that can be rotated by the azimuth motor. Angular positions of the two motor are measured using the CM335 motor/encoder sets. The encoders are sine wave encoders with 2048 cycles/rev. Square waves are generated from these signals at 2048 cycle/rev for commutation by power amplifiers which are running in current mode with a 1 KHz bandwidth. With interpolation, the sine wave signal is used to measure position with accuracy around 8×10^{-3} degree or 47000

pulse/rev [2]. The retroreflector has an opening of 0.25 inch and the PSD have a working area of 10×10 mm.

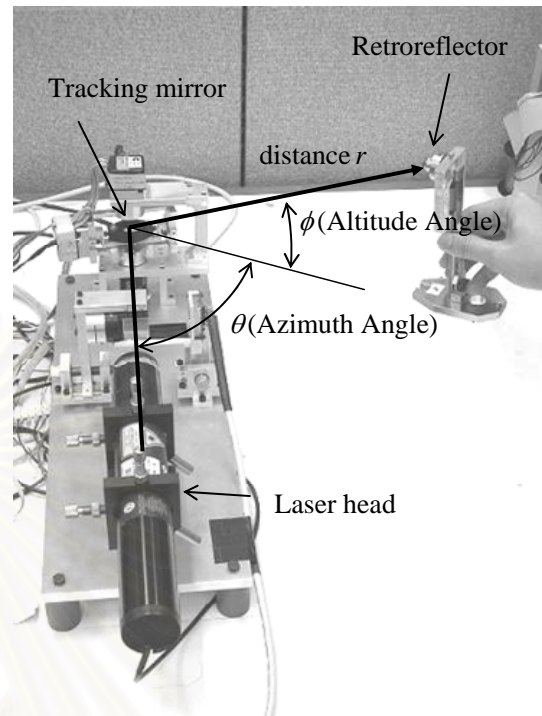


Figure 3, An LPS prototype.

3. Control design

Two types of control laws were studied: a single loop system and a two-loop system. The schematic of the control system is shown in Figure 4. For a single loop system, the angular position encoder is not used, $C_1(s) = 1$ and $C_2(s)$ is a PID controller. For the two-loop system, the controller $C_1(s)$ and $C_2(s)$ are PID controllers.

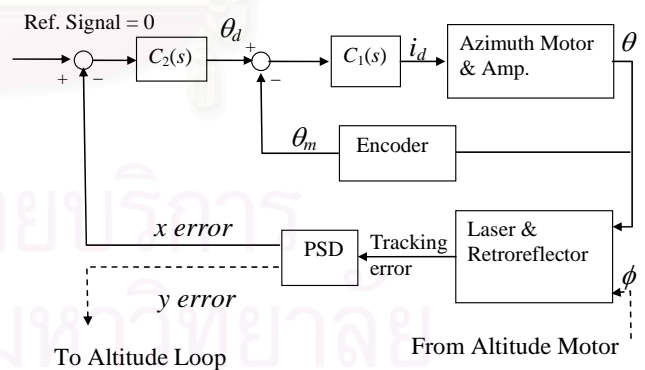


Figure 4, Control system schematic.

3.1 The single loop controller

Evaluation of the single loop controller was performed using only the azimuth motor (with the altitude motor fixed). Performing a number of experiments, it was found that a PD ($C_2(s)$) controller performs best. An experimental result is shown in Figure 5. In this experiment, the retroreflector was fixed at 1 meter and a reference signal asking for an azimuth offset (x error in Figure 4) of the laser from the center point of

the PSD was used instead. Note that the error at the retroreflector is only half of this value. As seen in Figure 5, the rise time of the response is around 12 msec and the settling time is 65 msec. However, the overshoot is 25% and 75% depending on which way the movement was.

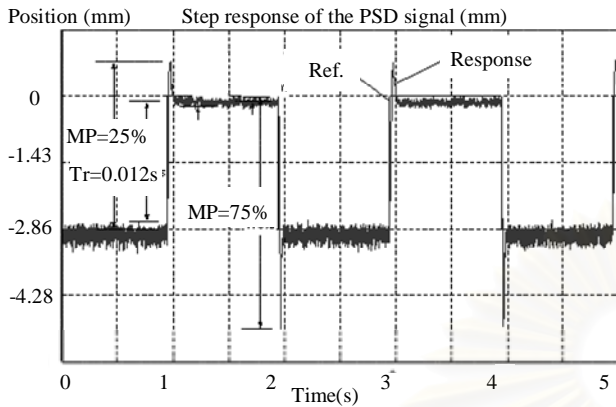


Figure 5, Step response of the PSD signal.

Using this PD controller, the maximum distance of the retroreflector was found to be less than 2 m which is significantly smaller than the 5 m goal. It was found that the system is highly oscillatory at the distant around 2 m. One of the reasons is that the PSD signal is rather noisy. Hence, K_d , the derivative gain, in the PD controller cannot be set higher to provide more damping. Hence K_p , the proportional gain, must be kept small to avoid excessive overshoot which is necessary to keep the laser from falling off the retroreflector. As a result, the motor in this system is quite sensitive and cannot hold the mirror even against a small disturbance. When touch lightly at the mirror, the mirror can be knock off the desired orientation. One can feel that the motor does not provide enough torque against disturbance to hold the mirror in place. As a result, another type of controller was investigated to reduce these shortcomings.

3.2 The two-loop system

The two-loop system is shown in Figure 4. Tuning of the controller was done for the inner-loop first. Figure 6 and 7 are the step response of the azimuth angle and the altitude angle to a 1 degree step command. A suitable controller was found to be a PD controller ($C_1(s)$). Again, the system still suffers from limited K_d (derivative gain of the PD controller) due to the fact that only position measurements are available. Then, the outer-loop was tuned. Figure 8 and 9 show the step response of the laser location on the PSD (0.1 volts or approximately 0.5mm step). The outer-loop controller is a PI controller where K_I (the integral gain) dominates. The tuning was done with the retroreflector at the distance of 0.5m.

Tracking range and tracking speed were measured. The maximum range was found to be 5 m (with interpolated encoder signal). The maximum speed is 0.6 m/s when the retroreflector is moving primarily in the azimuth direction at distance of 0.5m. The tracking speed is, however, significantly less than the goal of 4 m/s.

After a closer inspection, two problems were found.

The first is that the regulation performance of the altitude motor is much worst than that of the azimuth motor. As a result, the tracking performance is limited by the performance of the altitude loop. It was found that the altitude regulation is oscillatory as shown in Figure 10. In the figure, location of the return laser on the PSD when the retroreflector is not moving is plotted (0.1 volt corresponds to approximately 0.5mm). Clearly, the altitude regulation is much more oscillatory (the y direction). A new LPS prototype is being made to reduce this problem.

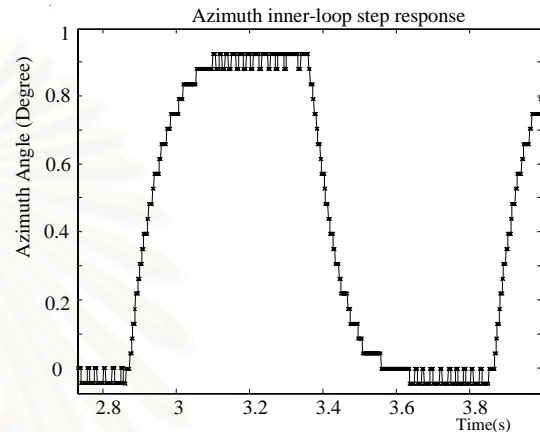


Figure 6, Step response of the azimuth inner-loop.

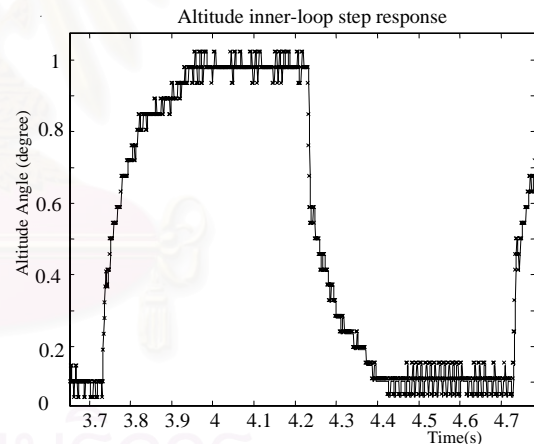


Figure 7, Step response of the altitude inner-loop.

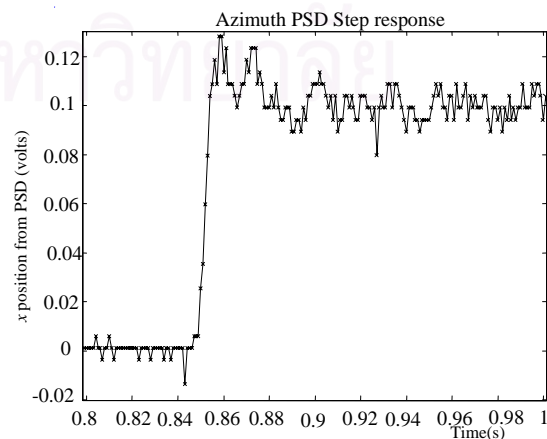


Figure 8, Step response of the azimuth PSD voltage.

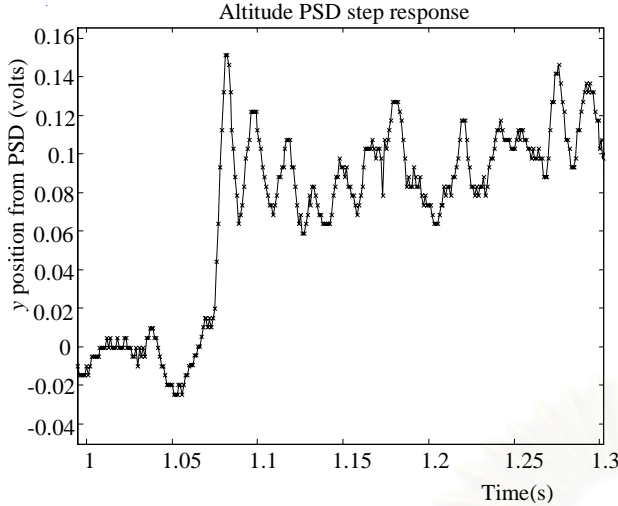


Figure 9, Step response of the altitude PSD voltage

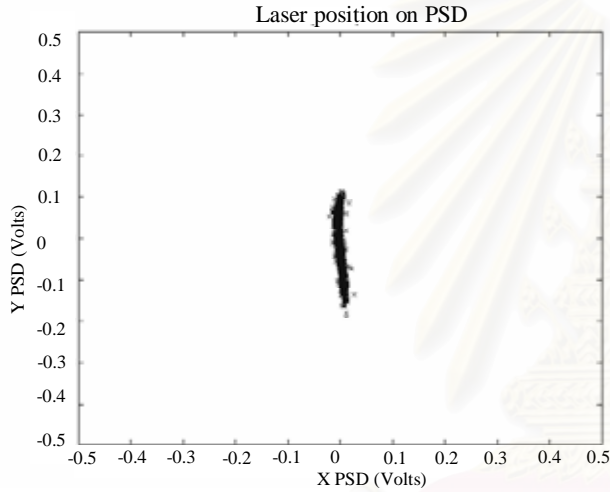


Figure 10, Laser position of the PSD

The second problem found was that the open loop gain of the system is highly affected by the distance of the retroreflector. As the system operates the open-loop gain of the system can vary as much as 10 times of the minimum value. This results from the distance of the retroreflector to the tracking mirror which can vary from near zero to 5 meters and the fact that a degree rotation of the mirror causes the reflected laser beam to turn by two degrees. In particular, the loop gain of the closed-loop system has a factor of $2R$, where R is the distance of the retroreflector to the tracking mirror. In the experiments, it was convenient to use a higher value of K_p (in $C_2(s)$) when the retroreflector is closed and to use a smaller value otherwise.

4. Distance adaptation

The distance of the retroreflector are generally used in the control law to compensate for the difference of the loop gain resulting from the distance of the retroreflector [3-5]. As stated in the introduction, it is desirable to design a system that can adjust the K_p automatically without actually measuring the distance. This section discusses two approaches to solve this problem. However, only preliminary simulation results (with only

one degree of freedom mirror motion) are available at this point.

4.1 Distance estimation

Standard recursive least-square technique was applied to estimate the distance R of the retroreflector and the tracking mirror. Figure 11 shows related parameter. In the figure, the distance of the retroreflector from the tracking mirror is R , the desired direction of the laser beam is θ_d , the actual direction is θ , the mirror orientation is θ_m ($\theta = 2\theta_m$), and the error of the laser from the center of the retroreflector is d (twice of this error shows up on PSD).

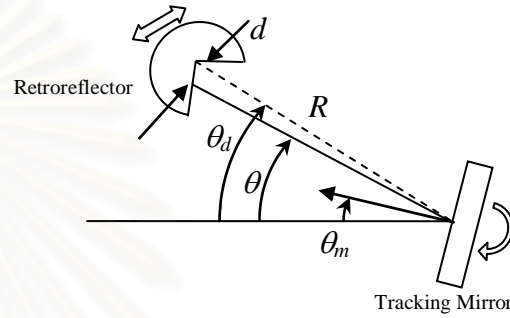


Figure 11, Parameters related to the estimation for the distance (R).

Since the tracking mirror is controlled to keep θ close to θ_d , it can be approximated that

$$d = R (\theta_d - \theta) \quad (1)$$

Assuming that R and θ_d change only slowly, they can be estimated by using d and θ . To apply a discrete-time recursive estimator, Eq. (1) is written as

$$y(k) = \phi^T(k) \alpha(k) \quad (2)$$

where k is used to indicate the k^{th} time step, $y(k) = d(k)$, $\phi^T(k) = [1 - \theta(k)]$, $\alpha(k) = [R\theta_d(k), R(k)]^T$. Let $A = [a, b]^T$ where a is an estimate of $R\theta_d$ and b is the estimate of R , the recursive least-square estimator with exponential forgetting factor is given by [6]

$$\begin{aligned} A(k) &= A(k-1) + K(k)(y(k) - \phi^T(k)A(k-1)) \\ K(k) &= P(k-1) \phi(k) (\lambda - \phi^T(k) P(k-1) \phi(k))^{-1} \\ P(k) &= (I - K(k) \phi^T(k)) P(k-1) / \lambda \end{aligned} \quad (3)$$

where λ is the exponential forgetting factor.

When R and θ_d are constants, it is easy to show that the estimator in Eq. (3) can be used to estimate both R and θ_d . Figure 12 shows the time trajectory of the estimates of a simulation. In this simulation, $\theta(t)$ is a signal generated by passing a pulse train with the amplitude of $0.01\pi/180$ and frequency of 1 rad/sec through a filter $F(s) = 1/(s/0.1+1)$, $\lambda = 0.9$, $P(0) = [2, 1; 1, 2]$, $a(0) = b(0) = 1$, $R = 3$, $\theta_d = 0$, sampling time of the estimator is 0.01 sec. Clearly, the estimate converged as expected.

In actual application, however, R and θ_d are not constants. Furthermore, θ is controlled using d to follow θ_d as much as possible. In simulation, it was found that R and θ_d can only vary very slowly. For example, if θ is assumed to be controlled such that θ_d as $\theta(s) = F(s)\theta_d(s)$, R and θ_d can vary only as slowly as from 3 to 3.5 m and from 0 to 0.1 degree in 50 second, respectively. Furthermore, an excitation signal (a band limited white noise filtered with $F(s)$) must also be added to $\theta(t)$ to allow the estimator to work as desired. Figure 13 shows the time trajectory of the estimates in this case.

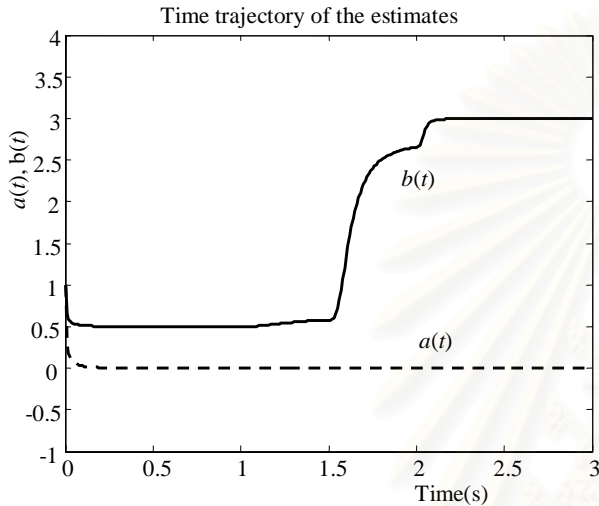


Figure 12, Time trajectory of the estimates when R and θ_d are constants

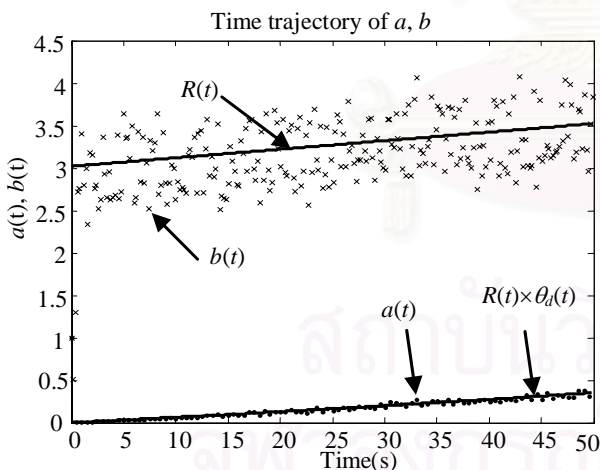


Figure 13, Time trajectory of the estimates when R and θ_d are not constants

In this figure, $\lambda = 0.7$, $P(0) = [2,1;1,2]$, $a(0) = b(0) = 1$, sampling time of the estimator is 0.01 sec, and the band-limited white noise added was generated at 0.01 sampling time and with the power of $1e-7$.

Based on this simulation results, this method based on estimating R is not expected to perform well in actual applications. While adding the excitation signal improves the estimates, it is not desirable because it may cause the laser to fall off the retroreflector. In fact, when

R is large, only small variation in the laser direction is acceptable.

4.2 Direct adaptation

Another approach investigated is similar to the direct adaptive control technique [6]. In particular, the controller gain is adjusted to compensate for changes in the distance of the retroreflector in order to fix the loop gain at a fixed value. This is done by trying to set up an indicator for the loop gain of the system and adjust the control gain such that this indicator is at a desired value.

The following is proposed. By feeding the system output to a lightly damp 2nd order filter with poles around the desired closed-loop pole of the system, the output of this 2nd order filter can be used to as an indicator of how much the system's loop gain differs from the desired value. The controller's gain is then adjusted in order to move the loop gain closer to the desired value. The idea is similar to that of [7] but is in a more simple form.

To show that the method can be applied, a simulation is performed as follows. The two loop control system in Figure 4 is used but only with the azimuth motor. The motor transfer function is $(K_m/d) / ((s/\tau + 1)(J/b s^2 + s))$ where $K_m = 0.0205$, $\tau = 1000 \times 2\pi$, $J = 6 \times 10^{-4}$, $b = 3.4 \times 10^{-6}$. The Laser and PSD are modeled with a gain of $2R$. The encoder is a unity gain. The controller $C_1(s)$ and $C_2(s)$ are tuned as described in section 3.2. $C_1(s)$ is a PD controller with $K_P = 100$ and $K_D = 5$ and $C_2(s)$ is a PI controller with $K_P = 0.04$ and $K_I = 200$. The inner-loop has rise time ≈ 0.1 sec. (compared to 0.13 in Figure 6) and %overshoot = 0% and the outer-loop has rise time ≈ 8 msec. (compared to 3.3 msec. in Figure 8) and %overshoot $\approx 30\%$ (compared to 30% in Figure 8). The tuning was done with $2R = 1$ m.

Using these gains, the closed-loop transfer function can be found to have a pair of under damped poles at $-78.6 \pm 172i$. The PSD signal is then feeds to a 2nd order filter with a unity DC gain and with two poles at $-3 \pm 172i$. The output of this system is squared and used as the indicator, ind . Let's factoring out a gain K to be adapted from $C_2(s)$ and set its nominal value to be 5. Figure 14 shows the maximum value of ind as a function of the gain ($K \times 2R$) when the reference signal is a pulse train with amplitude of 0.005 m.

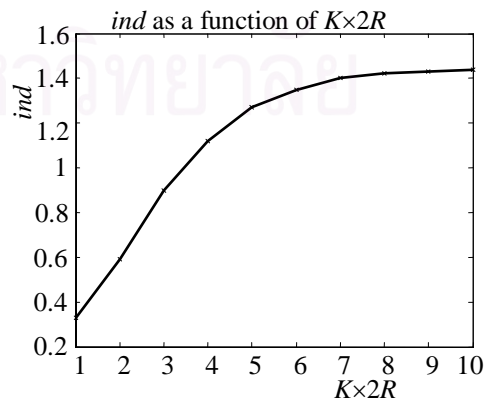


Figure 14, ind as a function of $K \times 2R$

The following adaptation rule was used for the gain

K. Note that the desired value of $K \times 2R$ is 5.

$$\frac{dK}{dt} = \begin{cases} 0.1 & , \text{if } ind \leq 1.1 \times 10^{-4} \\ -10 & , \text{if } ind > 1.1 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (4)$$

A number of simulations were done using various value of R when the reference signal is a pulse train with amplitude of 0.005 (m) and frequency of 1 Hz. In Figure 15, it can be easily seen that the adaptation law works as desired and the value of $K \times 2R$ is close to 5 in all of the cases. Figure 16 shows the difference between the response of the PSD signal when the simulation was started (solid line with $K(0) = 3$) and after 60 seconds (dashed line when $K(60) = 1$). The solid line is the desired response with %overshoot at around 30%. The dashed line can also be used to show what might happen if the system is designed with the nominal value $K \times 2R = 5$ but the loop gain is increased by 3 times; e.g., R increases 3 times. Large value of R can cause more oscillatory and can cause the laser to fall off the retroreflector in actual applications.

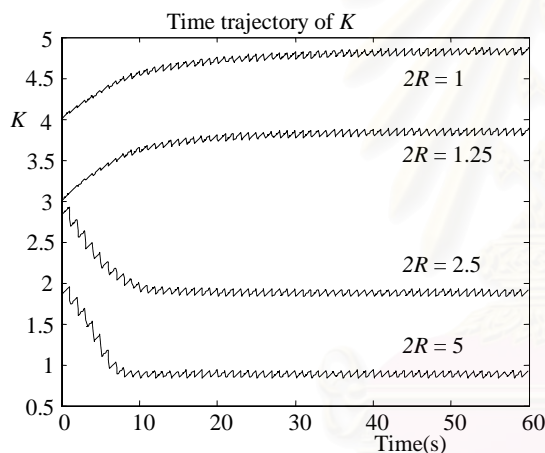


Figure 15, Trajectory $K(t)$ with various R and $K(0)$.

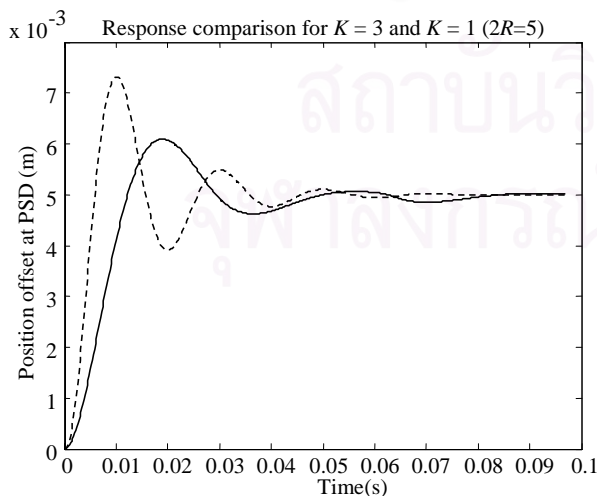


Figure 16, PSD Response for $K = 3$ and $K = 1$ ($R=5$)

5. Conclusion

This paper describes the tracking control issues of the LPS system. Two control laws were studied. Tuning of the controllers on the actual hardware was performed and the two-loop system was found to be superior. One of the problems found was the significant of the distance of the retroreflector from the tracking mirror. To reduce this problem without directly measures this distance, two approaches were proposed. Base on simulation results, the second method of adapting the controller's gain using an indicator of how much the system's loop gain differs from the desired value is more suitable for actual implementations.

Acknowledgments

This research was financially supported by MTEC.

References

- [1] V. Lertpiriyasawat, M.C. Berg, and K.W. Buffinton, "Extended Kalman Filtering Applied to a Two-Axis Robotics Arm with Flexible Links., International Journal of Robotics Research," Vol. 19, No. 3, pp 254-270.
- [2] S. Chantranuwathana, J. Kananai, and R. Chanchareon, "Development of Laser Positioning System for Fixtureless Robotic Manufacturing," National Science and Technology Development Agency (NSTDA) Annual Conference 2005, March 28-30, 2005, Science Park, Thailand (CD-ROM)
- [3] J. Yen, C. Jeng, and K. Fan, "Servo Design for a 3-D Laser Tracking Measurement System," ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 118, September 1996, pp 476-481.
- [4] T.A.G. Heeren and F.E. Velpaus, "An Optical System to Measure the End Effector Position for Online Control Purposes," International Journal of Robotics Research, Vol. 11, No.1, pp 53-63.
- [5] S. Decker, H. Gander, M. Vincze, and J.P. Prenninger, "Dynamic Measurement of Position and Orientation of Robots," IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 41, No.6, pp 897-901.
- [6] K.J. Astrom and B. Wittenmark, Adaptive Control, Second Edition, Addison Wesley.
- [7] S. Chantranuwathana and H. Peng, "Practical Adaptive Robust Controller for Active Suspensions," Proceedings of the 2000 ASME International Congress and Exposition, Orlando, Florida.

การพัฒนาาระบบวัดตำแหน่งด้วยแสงเลเซอร์สำหรับ
การผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน
**Development of Laser Positioning System for Fixtureless Robotic
Manufacturing**

ศุภวุฒิ จันทร์ภูวนันท์ , จารุบุตร คณะนัย , รัชทิน จันทร์เจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กทม. 10330

โทรศัพท์ 02 2186591 โทรสาร 02 2522889 email: supavut.c@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในการผลิตที่ใช้หุ่นยนต์นั้น โดยทั่วไปแล้วต้นทุนการผลิตจำนวนมากจะตกอยู่ที่การออกแบบและผลิตอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ที่ต้องใช้ในการจับยึดให้ชิ้นงานแต่ละชิ้นให้อยู่ที่ตำแหน่งคงที่เทียบกับหุ่นยนต์ ในบทความนี้นำเสนอแนวทางการผลิตอัตโนมัติในรูปแบบใหม่ที่สามารถนำมาใช้ในการลดต้นทุนส่วนนี้ โดยการผลิตแบบนี้จะมีอุปกรณ์หลักคือระบบวัดตำแหน่งด้วยแสงเลเซอร์ ที่ใช้ในการวัดตำแหน่งของชิ้นงาน และใช้ในการวัดตำแหน่งปลายของแขนหุ่นยนต์ในขณะที่ใช้งานจริง บทความนี้นำเสนอการพัฒนาต้นแบบของระบบวัดตำแหน่งด้วยแสงเลเซอร์นี้ ทั้งในด้านการทำงาน อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ การออกแบบระบบควบคุม และผลการทดสอบเบื้องต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการติดตามตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ในเวลาจริง

คำสำคัญ : ระบบวัดตำแหน่ง, แสงเลเซอร์, การผลิต, หุ่นยนต์

Abstract

In a typical robotic manufacturing, significant manufacturing cost is on design and production of jigs and fixtures required to hold workpieces in accurate positions relative to the robots. This paper describes a new robotic manufacturing technique that can be used to cut the fixture cost. The main component of this technique is the Laser Positioning System (LPS) that can be used to measure position of the workpiece and to measure the robot's end-effector directly in real-time. In this paper, the development of a Laser Positioning System (LPS) prototype is presented. Its designs, components, controller designs, and preliminary experimental results are given, especially on the ability to track a moving target in real-time.

Keywords: Position measuring device, Laser, Manufacturing, Robotics

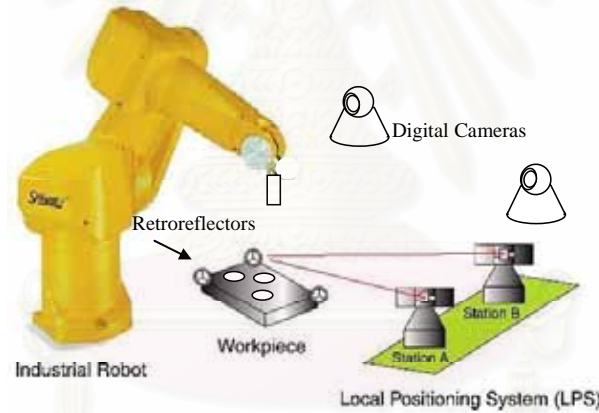
1. บทนำ

ระบบการผลิตอัตโนมัติในปัจจุบันได้มีการนำแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เข้ามาใช้อย่างกว้างขวาง เพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการเปลี่ยนระบบการผลิตให้ทันกับความต้องการของตลาด อย่างไรก็ตามเนื่องจากแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม มีความสามารถในการทำซ้ำ (high repeatability) แต่มีความถูกต้องต่ำ (low accuracy) [1] ทำให้ระบบการผลิตดังกล่าวจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน (jigs and fixtures) ในขณะใช้งาน เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่แน่นอน และจำเป็นต้องมีการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมของหุ่นยนต์ โดยเทียบกับตำแหน่งของชิ้นงานนั้น การใช้แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในลักษณะดังกล่าว มีข้อเสียคืออุปกรณ์จับยึดชิ้นงานมีราคาแพง และเมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของชิ้นงานที่จะผลิตหรือเปลี่ยนวิธีการผลิตชิ้นงาน ก็จำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานใหม่ โดยทั่วไปมูลค่าของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่ใช้ตลอดช่วงอายุการใช้งานของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตัวหนึ่งๆนั้น ยังสูงกว่ามูลค่าของตัวหุ่นยนต์

หลายเท่าตัว ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชนิดของชิ้นงานที่ผลิต จำเป็นต้องมีการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์เสียใหม่ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเสียเวลานาน นอกจากนี้ยังต้องหยุดขบวนการผลิตและการใช้งานแขนหุ่นยนต์เพื่อทำการปรับตั้งโปรแกรม ทำให้ลดความคล่องตัวในการเปลี่ยนระบบการผลิต ที่คาดว่าจะได้จากการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้

จากเหตุผลดังกล่าวคณะผู้วิจัยจึงได้ทำโครงการวิจัย เพื่อนำเอาแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้ ในระบบการผลิตอัตโนมัติในรูปแบบใหม่ ซึ่งไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานที่มีราคาแพง และไม่ต้องเสียเวลานานในการปรับตั้งโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ ที่เรียกว่า "Fixtureless Robotics Manufacturing" หรือระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน ในระบบการผลิตแบบนี้จะใช้การวัดตำแหน่งของชิ้นงานแทนการใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และใช้การวัดตำแหน่งปลายของแขนหุ่นยนต์ในขณะที่ใช้งานจริงเพื่อเพิ่มความถูกต้องในการควบคุมการเคลื่อนที่ แทนการปรับตั้งโปรแกรมระบบควบคุมหุ่นยนต์ตามตำแหน่งของชิ้นงาน หรือการประมาณความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของแขนกลจากปัจจัยต่างๆ (เช่น [2]) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะใช้ Local Positioning System (LPS) เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งและมุมเอียงในสามมิติที่มีความถูกต้องสูงโดยใช้แสงเลเซอร์

จะเห็นได้ว่า ระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานนั้นที่ผู้วิจัยนำเสนอ นั้น เทคโนโลยีหลักที่จำเป็นคือ ระบบ LPS แต่เนื่องจากระบบดังกล่าวมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยในส่วนนี้จึงมีความจำเป็น เพื่อพัฒนาและผลิตเทคโนโลยีของตนเอง เพิ่มขีดความสามารถทางเทคโนโลยีของเมืองไทย ลดการนำเข้าของเทคโนโลยีจากต่างประเทศ นอกจากนี้แล้วเทคโนโลยีนี้ก็ยังสามารถพัฒนา เพื่อให้ได้ความรู้ใหม่ได้ต่อไป บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบของระบบวัดตำแหน่งด้วยแสงเลเซอร์นี้ ทั้งในด้านการทำงาน อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ การออกแบบระบบควบคุม และผลการทดสอบเบื้องต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการติดตามตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ในเวลาจริง

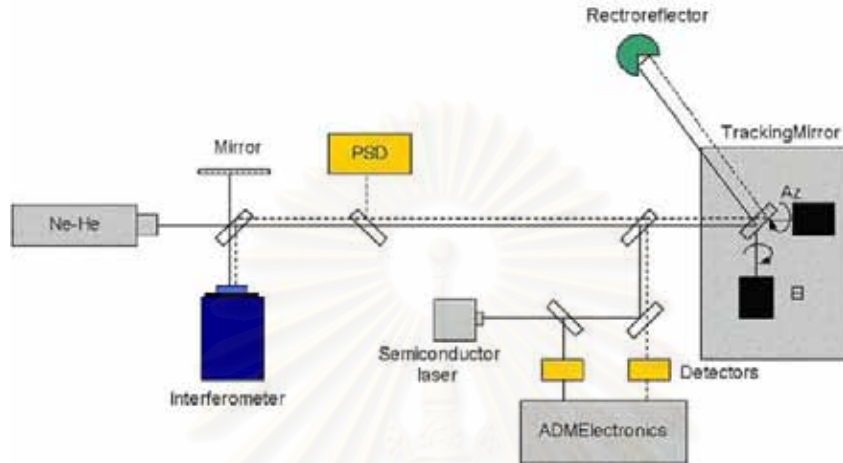


รูปที่ 1 ระบบการผลิตด้วยหุ่นยนต์แบบไม่ต้องพึ่งอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน

2. ระบบ LPS

ระบบการทำงานของ LPS โดยทั่วไป [3] จะอาศัยการวัดมุมจากการบิดของกระจกเงาติดตามจำนวน 2 มุม และระยะห่างจากกระจกติดตามกับอุปกรณ์ retroreflector โดยอุปกรณ์ชุด LPS จะยิงลำแสงเลเซอร์ไปสะท้อนกระจกติดตามไปที่อุปกรณ์ retroreflector ที่ติดกับวัตถุตั้งในรูปที่ 2 ซึ่ง retroreflector นี้จะมีลักษณะคล้ายกระจกเงาสามบานมาวางตั้งฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งจะมีผลทำให้ ลำแสงที่เข้า retroreflector จะสะท้อนกลับมาในแนวขนานกับทางเดิม โดยที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างแสงขาเข้าและออกจะอยู่ในแนวกึ่งกลางของ retroreflectorพอดี ลำแสงที่สะท้อนกลับมาจะถูกแบ่งด้วย Beam Splitter ไปยังอุปกรณ์ PSD (Position Sensitive Detector) เพื่อใช้ในการวัดค่า offset ของแสงขาไปและขากลับ สัญญาณค่า offset นี้จะนำไปใช้ในการปรับมุมของกระจกทั้งสองเพื่อให้ค่า offset นี้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะส่งผลให้กระจกติดตามสามารถสะท้อนแสงไปสู่อุปกรณ์ retroreflector ได้ตลอดเวลาแม้ retroreflector จะมีการเคลื่อนที่ นอกจากนี้แล้วแสงอีกส่วนจะถูกแบ่งไปยังอุปกรณ์วัดระยะ เช่น interferometer หรือ ADM (Absolute Distance Meter) เพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทางระหว่าง กระจกติดตาม กับ retroreflector ดังรูปที่ 2 การวัดระยะนั้น อุปกรณ์ Interferometer เป็นอุปกรณ์มาตรฐานทั่วไปในงานอุตสาหกรรม ทำงานโดยอาศัยการแทรกสอดของแสง สำหรับ interferometer แบบ Michelson นั้น ลำแสงที่ออกมาจากตัวกำเนิดจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นลำแสงอ้างอิง ส่วน

ที่เหลือจะไปตกกระทบตัวสะท้อนแสง แล้ววิ่งกลับมาเพื่อรวมกับลำแสงอ้างอิง ทำให้เกิดปรากฏการณ์แทรกสอดของแสงขึ้น การนับจำนวน fringe ที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงนั้นจะถูกแปลงให้เป็นระยะทางที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเริ่มต้น(ตำแหน่งอ้างอิง)ได้ แต่มีข้อเสียคือแนวของแสงจะถูกบังไม่ได้ตลอดการทำงาน แต่ข้อเสียนี้จะไม่สำคัญสำหรับอุปกรณ์ ADM ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ค่าระยะสัมบูรณ์และไม่ต้องมีการปรับเทียบตำแหน่งอ้างอิง แต่จะทำให้ระบบมีราคาสูงขึ้นมาก



รูปที่ 2 อุปกรณ์ต่างๆของ ระบบ LPS

2.1 ระบบต้นแบบ Laser Tracking System (LTS)

ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาระบบกระจกติดตาม(LTS)ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งในระบบนี้จะมีส่วนประกอบต่างๆดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว แต่จะไม่มีระบบวัดระยะระหว่างกระจกติดตามและ retroreflector โดยการวัดระยะจะสามารถทำได้โดยใช้ระบบ LTS สองตัวแล้วใช้วิธีการคำนวณแบบ triangulation จากข้อมูลแนวของแสงจากกระจกติดตามทั้งสอง (มุม Azimuth และ Altitude ดังแสดงในรูปที่ 3) ระบบที่พัฒนามีอุปกรณ์หลักต่างๆดังนี้คือ

(1) มอเตอร์ในแนว Azimuth (แกนตั้ง) เป็น Brushless DC motor, Maxon รุ่น EC 32, ขนาด 80watts แรงบิดสูงสุด 355mN-m มอเตอร์ในแนว Azimuth นี้จะต้องขับชุดหมุนกระจกในแนว Altitude (แกนนอน) รวมทั้งมอเตอร์ของแกน Altitude ด้วยโดยไม่มีการใช้เฟืองทดทั้งนี้เพื่อแก้ปัญหาต่างๆจากเฟืองทด เช่น ปัญหาจาก backlash และจากแรงเสียดทานของเฟืองทด

(2) มอเตอร์ในแนว Altitude (แกนนอน) เป็น Brushless DC motor, ของ Computer Optical Products รุ่น CM 335 ขนาด 17 Watts แรงบิดสูงสุด 232 mNm โดยมอเตอร์มี incremental encoder ประกอบมาด้วย ซึ่งนำมาใช้ในการวัดมุมทั้งสองแกน encoder นี้เป็นแบบ sine wave ที่มีจำนวนลูกคลื่นเท่ากับ 2048 ลูกต่อรอบ มอเตอร์ในแกนนี้ไม่ใช่เฟืองทดเช่นกัน

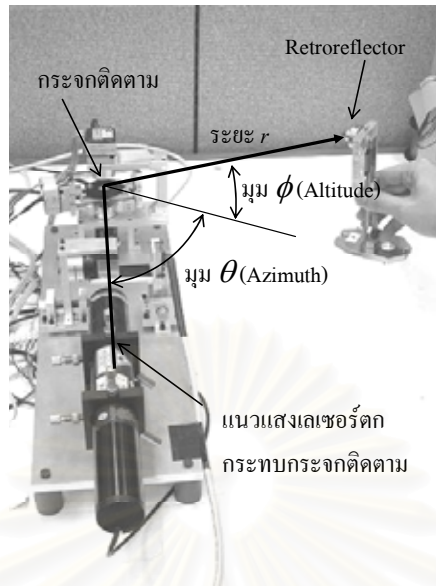
(3) ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นแบบ PWM ของ Maxon รุ่น DES 50 โดยใช้การทำงานแบบ current mode การทำ commutation เป็นแบบ sine wave โดยใช้ทั้งสัญญาณ Hall และ encoder signal แบบ square wave แต่เนื่องจากสัญญาณ Encoder นั้นเป็นแบบ sine wave ที่นำมาใช้โดยตรงไม่ได้จึงจำเป็นต้องมีวงจรเพื่อเปลี่ยนสัญญาณ sine wave มาเป็น square wave ก่อน

(4) Ball Mounted Hollow Retroreflector รุ่น BMR-0.5 ของ ATT Metrology Services ขนาดหน้าปัด 0.25"

(5) He-Ne Laser ขนาด 2mW ขนาด 0.79mm, 1mrad divergence

(6) Position Sensitive Detector (PSD) ของ Pacific Silicon Sensor ขนาดรับแสง 1cm x 1cm ที่ resolution มากที่สุด 0.5 ไมครอน (ขึ้นกับความเข้มของแสง)

(7) Computer และ Data Acquisition cards สำหรับการควบคุมและการคำนวณตำแหน่งมุมของกระจก โดยที่การคำนวณค่ามุมของกระจกนั้นใช้สัญญาณ sine wave จาก encoder เป็นหลัก



รูปที่ 3 ต้นแบบ Laser Tracking System

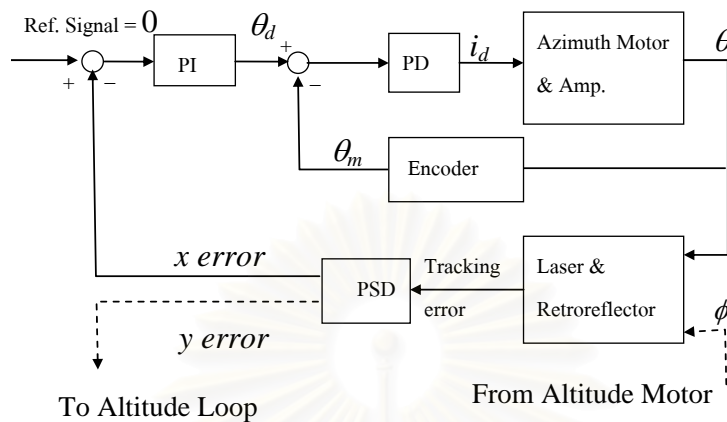
2. 2 ระบบควบคุมการติดตามของต้นแบบ LTS

หน้าที่หลักของกระจกติดตามคือการควบคุมแสงเลเซอร์ให้ตกกระทบบที่กึ่งกลางของ retroreflector ซึ่งจะมีผลโดยตรงกับความแม่นยำในการวัดตำแหน่งของ retroreflector ในการนี้จะต้องมีระบบควบคุมที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณให้มอเตอร์เพื่อปรับมุมกระจกโดยใช้ข้อมูลจากค่าผิดพลาดที่วัดได้จากอุปกรณ์ PSD สำหรับระบบควบคุมแบบแรกๆนั้น [3-5] ใช้ระบบควบคุมแบบ PID ที่นำเอาค่าผิดพลาดที่วัดได้จากอุปกรณ์ PSD มาผ่านตัวควบคุมแบบ PID แล้วใช้สัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณควบคุมมอเตอร์ ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณความเร็วที่ต้องการ หรือสัญญาณกระแสที่ต้องการก็ได้ แล้วจึงใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ (power amplifier) ในการจัดการให้มอเตอร์ทำงานตามคำสั่งนี้ แต่เนื่องจากการที่ค่าความผิดพลาดเชิงมุมของแนวแสงที่สะท้อนออกไปจากกระจกติดตามที่ผิดไปจากกึ่งกลางของ retroreflector นั้น มีผลต่อความแตกต่าง (offset) ของแสงที่สะท้อนออกไปและที่สะท้อนกลับมาจาก retroreflector (ที่อ่านได้จากอุปกรณ์ PSD) ในลักษณะที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างกระจกติดตามและ retroreflector ด้วย(ค่า r ในรูปที่3) คือที่ค่า offset ค่าเดียวกันนั้น ที่ระยะ r น้อย จะต้องมีการปรับมุมของมอเตอร์มาก และที่ระยะ r มาก ก็จะต้องมีการปรับน้อย ซึ่งผลของค่า r นี้ทำให้ค่าอุปแทนของระบบมีค่าเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของ retroreflector ทำให้การออกแบบระบบควบคุมนั้นทำได้ยาก และมีผลให้ความสามารถในการติดตามค่าที่ระยะ r น้อยๆ และ เกิดปัญหาของเสถียรภาพของระบบที่ค่า r มากๆ ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมแบบหลังๆก็นำเอาค่า r ใช้ในการควบคุมด้วย โดยที่ค่า r จะนำมาใช้ในการคำนวณค่ามุมที่ต้องปรับเพื่อใช้ค่ามุมนี้ในรูปการควบคุมมุมของมอเตอร์ [3-5]

การนำค่า r มาใช้นั้นจำเป็นต้องมีระบบวัดเช่น Interferometer หรือต้องมี LTS จำนวนสองตัวแล้วคำนวณระยะจากวิธี triangulation แต่เนื่องจากระบบ Interferometer นั้นมีราคาสูงและระบบแบบ LTS สองตัวนั้นอาจจะไม่สามารถทำการติดตาม retroreflector ได้พร้อมๆกันตลอด เช่นในตอนเริ่มทำงานอาจจะต้องเริ่มทำการปรับให้แสงส่องไปที่ retroreflector จาก LTS ทีละตัว อย่างไรก็ตามการวัดตำแหน่งแบบ triangulation นั้นก็ไม่จำเป็นจะต้องมี LTS ถึงสองตัว ถ้าเป้าที่ retroreflector นั้นไม่เคลื่อนที่ เช่น การใช้งานที่ต้องการวัดตำแหน่งของชิ้นงานเพียงอย่างเดียว ดังในรูปที่ 1 นั้นเราสามารถมี LTS เพียงตัวเดียว แต่ใช้การปรับตำแหน่งของ LTS ระหว่างจุดสองจุดแทนได้ ซึ่งระบบที่ใช้ปรับนี้จะมีราคาต่ำกว่าการใช้ LTS ตัวที่สองมาก เพราะไม่จำเป็นจะต้องมีการวัดที่แม่นยำ (ดังเช่นการวัดมุมในระบบ LTS) เพียงใช้กลไกที่เที่ยงตรงก็พอแล้ว ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้ระบบการควบคุมดังในรูปที่ 4 โดยไม่มีการนำเอาค่า r มาใช้ ซึ่งขณะนี้ผู้วิจัยกำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนาาระบบที่สามารถปรับค่าอุปแทนได้โดยไม่ใช้ค่า r

ในรูปที่ 4 นั้นแสดงระบบควบคุมในแนวแกน azimuth โดยระบบที่ใช้นั้นเป็นแบบสองลูปซ้อนกัน โดยที่ลูปในเป็นลูป PD ที่ใช้ในการควบคุมมุมของมอเตอร์ และในลูปนอกเป็นลูป PI ที่ใช้ในการควบคุมให้ค่าบน PSD มีค่าน้อย โดยการออกแบบนั้นใช้การปรับ ลูปในก่อนให้ step response นั้นเป็นที่พอใจ แล้วจึงทำการปรับลูปนอก โดยผู้วิจัยได้พบว่าลูปในนั้นถูกจำกัดด้วยค่าแกน D

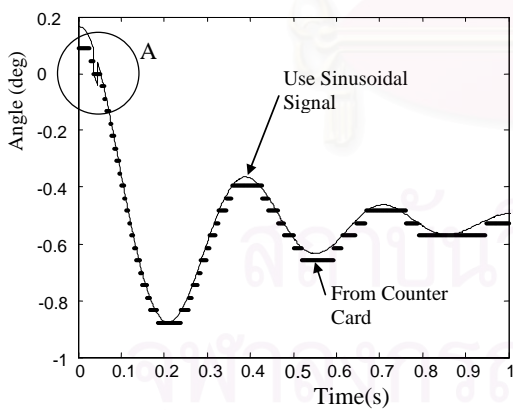
ที่ไม่สามารถมีค่ามากพอ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระบบไม่มีอุปกรณ์วัดความเร็วเชิงมุมโดยตรง และในรูปบนออกนั้นได้พบว่ามีค่าแกนส่วนใหญ่นั้นจะตกอยู่ที่ค่า I



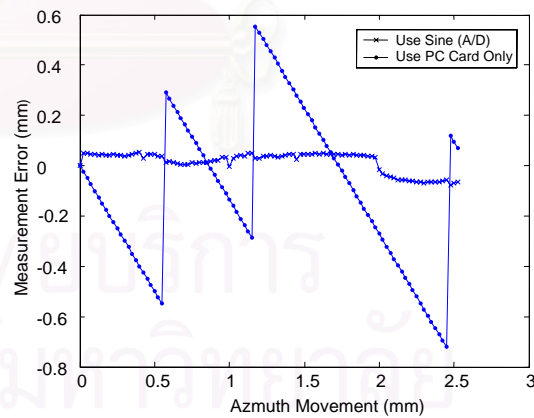
รูปที่ 4 ระบบควบคุมของระบบคั่นแบบ LTS

2.3 ผลการทดลอง และการปรับปรุง

จากการทดลองพบว่าระบบคั่นแบบที่ได้สร้างขึ้นนั้นสามารถควบคุมให้แสงเลเซอร์ตกอยู่บน retroreflector ได้ตลอดเวลา ที่ระยะสูงสุดเท่ากับ 1.05 m และค่าความเร็วสูงสุดของ retroreflector ที่ระบบสามารถติดตามได้ที่ระยะ 0.5 m คือ 18.8 cm/s เมื่อ retroreflector เคลื่อนที่ในแนว Azimuth (แนวราบ) และที่ความเร็ว 6.2 cm/s ในแนว Altitude (แนวตั้ง) โดยที่ระบบนี้ใช้เพียงค่าสัญญาณมุม sine wave ที่แปลงเป็น square wave แล้วที่ความละเอียด 2048 pulse ต่อรอบ (8192 เมื่อทำ quadrature แล้ว) ซึ่งพบว่าความสามารถที่ได้ขี้นน้อยกว่าที่ควรไปมาก (ขึ้นอยู่กับความเร็วของปลายแขนของหุ่นยนต์) จึงจำเป็นต้องปรับปรุงโดยในขั้นตอนนี้ได้นำเอาสัญญาณ sine wave ของ encoder มาใช้ในการควบคุมกระบอกด้วย



รูปที่ 5 ค่ามุมที่อ่านได้จาก encoder card และที่คำนวณที่ได้จากค่าที่อ่านจาก A/D card



รูปที่ 6 ค่าตำแหน่งของ retroreflector (ที่ระยะ 56cm) ที่คำนวณได้เมื่อใช้ sine wave และไม่ใช่

การนำเอาสัญญาณ sine มาใช้นั้นโดยทั่วไปจะต้องใช้กับชุดขับมอเตอร์ที่สามารถรับสัญญาณ sine wave ได้ แต่เนื่องจากชุดขับแบบนี้มีราคาสูง ในงานนี้จึงใช้ชุดขับแบบที่ต้องใช้สัญญาณ square wave โดยสัญญาณ sine wave จะนำมาใช้ในการคำนวณมุม (θ_m) เพื่อใช้ในระบบควบคุมมุนเท่านั้นดังในรูปที่ 4 โดยการใช้อุปกรณ์ A/D data acquisition card อ่านสัญญาณ sine wave เข้ามาในคอมพิวเตอร์ควบคุมเพื่อทำการคำนวณออกมาเป็นมุม โดยค่ามุมที่ได้จะละเอียดขึ้นมากดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงค่าที่ได้เทียบค่าที่อ่านได้จากสัญญาณ square wave ผ่าน encoder quadrature card ที่มีความละเอียด 8192 pulse ต่อรอบ ซึ่งในการใช้งาน

นั้นพบว่าจะต้องใช้ทั้งสัญญาณจาก encoder card และ ที่ค่าคำนวณจาก sine wave ได้ประกอบกัน เพราะความเร็วในการคำนวณ นั้นจะเร็วไม่พอเมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว ดังจะเห็นได้ที่ตำแหน่ง A ในรูปที่ 5 ดังนั้นจะต้องคอยตรวจค่าที่คำนวณได้เทียบกับค่าที่ได้จาก encoder card อยู่เสมอและเมื่อค่าแตกต่างกันมากเกินไปจะต้องแก้การคำนวณให้ตรงกับค่าที่ได้จาก encoder card ในด้าน ความแม่นยำที่ได้เพิ่มขึ้นนั้นในรูปที่ 6 แสดงค่าความแม่นยำที่ได้จากการใช้สัญญาณ square wave เทียบกับการใช้เฉพาะ square wave ซึ่งทำให้ค่ามุมที่ได้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้น โดยความแม่นยำในการวัดเพิ่มขึ้นจากจาก 721 micron เป็น 75 micron เมื่อใช้วัด ตำแหน่งของ retroreflector ที่ระยะ 56 cm จากกระจกติดตาม (นั่นคือการใช้สัญญาณ Sinusoidal จะได้ความถูกต้องประมาณ 7.7×10^{-3} องศา หรือที่ประมาณ 27 arcsec หรือ ที่ 47000 pulse/rev, หรือดีขึ้น 10 เท่า) นอกจากนี้แล้วยังพบว่าระบบสามารถ ติดตาม retroreflector ได้ที่ระยะถึง 5 m (หรือดีขึ้น 5 เท่า) และสามารถติดตาม retroreflector ได้ที่ความเร็วสูงสุดถึง 60cm/s ใน แนว Azimuth (หรือดีขึ้น 3 เท่า)

4. สรุป

การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบ LTS เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งหุ่นยนต์ สามารถทำงานได้ในระยะรัศมี 5 เมตร การควบคุมติดตามกระจกเงา เพื่อให้แนวลำแสงเลเซอร์ชี้ไปที่ retroreflector ซึ่งเคลื่อนที่ใน 3 มิติตลอดเวลาในรัศมี 1 เมตร มีเสถียรภาพ ในระดับหนึ่ง และยังสามารถพัฒนาให้สมรรถนะการควบคุมสูงขึ้นไปได้อีกโดยนำสัญญาณ sinusoidal จาก encoder มาใช้โดยตรง ความเร็วในการติดตามก็สามารถพัฒนาให้เพิ่มขึ้นอีกโดยพัฒนาการสร้างระบบควบคุมที่มีความเร็วสูงขึ้น เมื่อการควบคุมกระจกเงามี เสถียรภาพ ตำแหน่งของมุมกระจกสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าตำแหน่งใน 3 มิติของ retroreflector ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่องรูปแบบใหม่ของเทคโนโลยีการผลิตเชิงหุ่นยนต์ขั้นสูง ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนในโครงการนี้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lertpiriyasawat, V., Berg, and M.C., Buffinton, K.W. (2000) Extended Kalman Filtering Applied to a Two-Axis Robotics Arm with Flexible Links., *International Journal of Robotics Research*, Vol. 19, No. 3, pp 254-270.
- [2] Huang, M.Z., and Masory, O. (1993) A Simple Method of Accuracy Enhancement for Industrial Manipulators. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.8, pp. 114-122.
- [3] Heeren, T.A.G., Veldpaus, F.E. (1992) An Optical System to Measure the End Effector Position for On-line Control Purposes. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 11, No. 1, pp 53-63
- [4] Decker, S., Gander, H., Vincze, M., Prenninger, J.P. (1992) Dyanmic Measurement of Position and Orientation of Robots. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 41, No. 6. pp 897-901
- [5] Yen, J., Jeng, C., and Fan, K. (1996) Servo Design for a 3-D Laser Tracking Measurement System., *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 118, September 1996, pp 476-481.



ประวัติผู้นำเสนอผลงาน ศุภวุฒิ จันทร์พานิชย์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และปริญญาโท-เอกที่ University of Michigan, Ann Arbor ปัจจุบันรับราชการเป็นอาจารย์อยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีความสนใจเกี่ยวกับระบบควบคุมต่างๆและการนำไปใช้ รวมทั้งเทคโนโลยีด้านยานยนต์และการผลิต

Fixtureless Robotic Manufacturing System

Ratchatin Chanchareon^{1*} Jaruboot Kananai¹ Supavut Chantranuwathana¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok 10330, Thailand.

E-mail: Ratchatin.C@eng.chula.ac.th

Abstract

The use of dedicated fixture to hold and align workpieces in the manufacturing process is costly, time consuming and inflexible. Therefore, the demonstration of Fixtureless Robotic Manufacturing System is presented. The manufacturing cell consists of an articulated robot, an XY robot, and a positioning sensor (Fastrak®). The system uses Fastrak® to determine the workpiece position and orientation in real time. This information is then sent to the robotic control unit. The trajectory of the robotic end-effector is then adapted based on the real time workpiece position/orientation, and thus *a priori* knowledge of workpiece position/orientation is not required. The control units of the commercial CRS robotic system and the Roland XY plotter are modified so that joint level control technique can be implemented. Thus, all the machines in the cell system can be fully controlled. The experiment also demonstrates a fully integrated manufacturing cell that manufacturing capability is improved through this integrity.

Keywords: Robot, Control, Manufacturing.

1. Introduction

Robotic operation usually requires dedicated fixtures to precisely secure workpiece in their right position. The fixtures are part specific, and therefore must be redesigned when parts changes. The custom-made fixtures are costly and time-consuming to build and install. The flexible fixtureless assembly (FFA) [1] and the robotic fixtureless assembly (RFA) [2] uses machine vision to estimate the target pose so that the robot can servo and grasp the part. The robot recognizes the part and is able to grasp it when it has been placed in an unstructured manner within the robot workspace.

In this project, a fixtureless robotic manufacturing system is developed. In the paper, a position sensor is used to sense the position and orientation of workpiece frame. The motion of the robot is programmed based on this movable workpiece frame. Thus, the workpiece can be at any position within the workspace of the robot and can be in motion. The aim is not only to assemble parts, but also to process it. This is a very challenging task, requiring innovation in many area of robotics.

Since the robot motion is programmed based on the workpiece frame, a precise mathematic is used to map the robot motion into joint space in real time. A real time controller is then used this mapped motion in joint space to simultaneously control all the robot's joints. This is a challenging task, requiring a much more difficult control technique compared to the conventional PID controller.

In this project, we developed a fully integrated robotic manufacturing cell. The controller of the CRS articulated robot is modified such that joint level control technique can be implemented. The Roland XY plotter is also modified such that its motion can be programmed. The TCP network is used to communicate between machines in the cell.

The preliminary results demonstrate that the robot can perform its task in floating workpiece frame. The workpiece needs not to be fixed in operation. The manufacturing workcell is more flexible.

2. The CRS Robotic System

The CRS robotic system is a 5 Degrees of freedom articulated robot. Each joint is driven by DC servo motor through harmonic drive and its position is sensed by incremental encoder. The DH parameters of the robot are as followings:

Table 1 DH parameter of the CRS robotic system

i	α_i	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	10"	θ_1
2	-90°	0	0	θ_2
3	0	$L_1=10"$	0	θ_3
4	0	$L_2=10"$	0	θ_4
5	-90°	0	2"	θ_5

The forward kinematics can be expressed as [3]

$${}^0_T = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & c_1(L_1c_2 + L_2c_{23}) \\ s_1 & -c_1 & 0 & s_1(L_1c_2 + L_2c_{23}) \\ 0 & 0 & -1 & L_1s_2 + L_2s_{23} + 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

The inverse kinematics of the CRS robotics system is found to be [3]

$$\theta_1 = a \tan 2(Y, X) \text{ or } a \tan 2(Y, X) + \pi \quad (2)$$

$$\theta_3 = a \tan 2(s_3, c_3) \quad (3)$$

where
$$c_3 = \frac{X^2 + Y^2 + Z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}$$

$$s_3 = \pm \sqrt{1 - c_3^2}$$

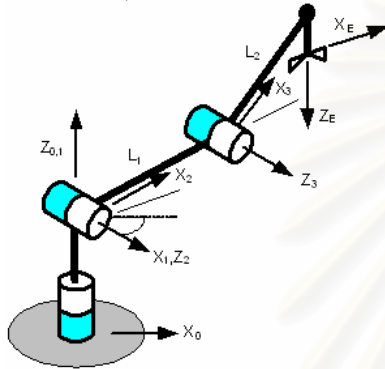
and
$$\theta_2 = a \tan 2(s_2, c_2) \quad (4)$$

where
$$s_2 = \frac{(L_1 + L_2c_3)X - (L_2s_3\sqrt{X^2 + Y^2})}{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$c_2 = \frac{(L_1 + L_2c_3)\sqrt{X^2 + Y^2} - L_2s_3Z}{X^2 + Y^2 + Z^2}$$



a) The CRS robot



b) Kinematics diagram

Figure 1 The CRS Robotic System

The 4x4 matrix operator, B_wT , in this equation is called homogeneous transform.

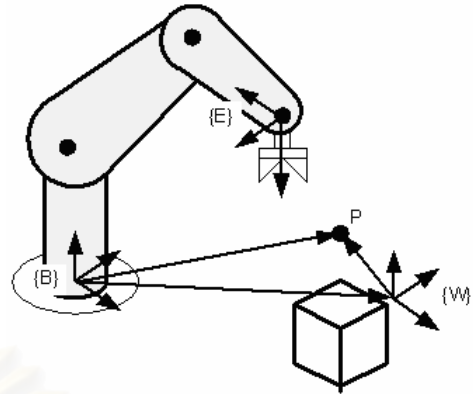


Figure 2 Transformation

In the project, the position and orientation of workpiece frame {P} wrt robot base frame {B} is sensed by Fastrak® positioning sensor in real time. Thus, the homogeneous transform at each servo time can be determined and the trajectory described in frame {P} can be transformed into its description in frame {B}. The robot's inverse kinematics is then used to mapped the trajectory described in robot frame {B} into robot's joint space.

4. Manufacturing Cell Architecture

3. The Mapping

In general, position vector described with respect to (wrt) some frame, {W} can be mapped or described wrt another frame, {B}. In order to transform its description, the position (origin) and orientation of frame {W} wrt frame {B} is required. The origin of frame {W} wrt frame {B} is usually called ${}^B P_{PORG}$ and the orientation of frame {W} wrt frame {B} can be described by rotation matrix B_wR . The general mapping can be expressed as follows [2];

$${}^B P = {}^B_wR {}^W P + {}^B P_{WORG} \quad (5)$$

where ${}^B P$ is the position vector described in {B}
 ${}^W P$ is the position vector described in {W}
 B_wR is the rotation of {W} wrt {B}
 ${}^B P_{PORG}$ is the origin of {W} wrt {B}

This mapping expression can be written in a compact form as follows [4];

$$\begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^B_wR & {}^B P_{WORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^W P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

or

$${}^B P = {}^B_wT {}^W P \quad (7)$$

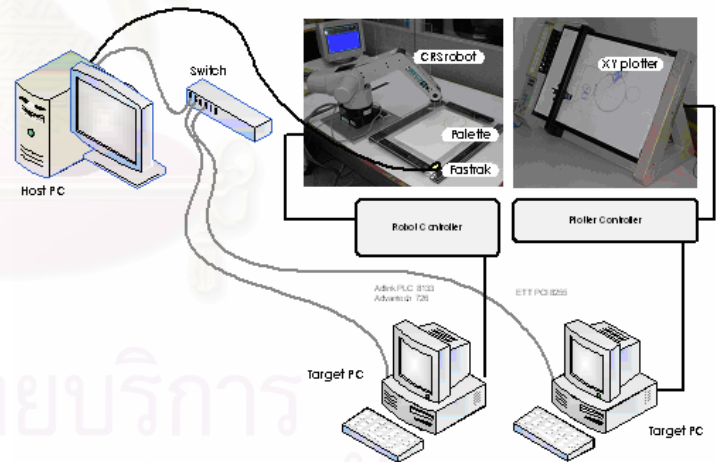


Figure 3 System Architecture

The Fixtureless Manufacturing Cell, shown in Fig 3., consists of the CRS robotics system, Roland plotter, Fastrak® positioning sensor, the movable palette and three computers. The CRS robotics and the Roland plotter controllers are modified such that the joint level control technique can be implemented. The Matlab-xPC is used for real time control of both systems. Using the xPC, the robot control is written in Matlab-simulink in host computer and is then uploaded to the target xPC where control cards are installed and is being used for real time control. All the robot joints are simultaneously controlled at 0.1 msec speed.

Fastrak® is used to sense the position of the movable palette and then sending the position and orientation of the palette to the target xPC via the host PC. This host PC feeds the position information to the target xPC through 10 Mbps TCP/UDP protocol. The xPC then, maps the reference trajectory, which is defined in movable workpiece frame into the fixed reference frame, then performs the inversed kinematics calculation. The trajectory is now mapped into robot's joint space. The xPC, again, simultaneously controls all joints to follow the joint trajectory. The roughly designed PD controller is used to control these joints. In the experiment, the axes of the robot fixed reference frame and the transmitter of Fastrak® are aligned but the relative position is unknown.

The target xPC sends the results including joint position, the joint position command, and the reference position of the workpiece, back to the host PC through TCP/UDP protocol. The host PC then displays the graphic interpretation of the results without degrade the speed of the real time control.

5. Experimental Results

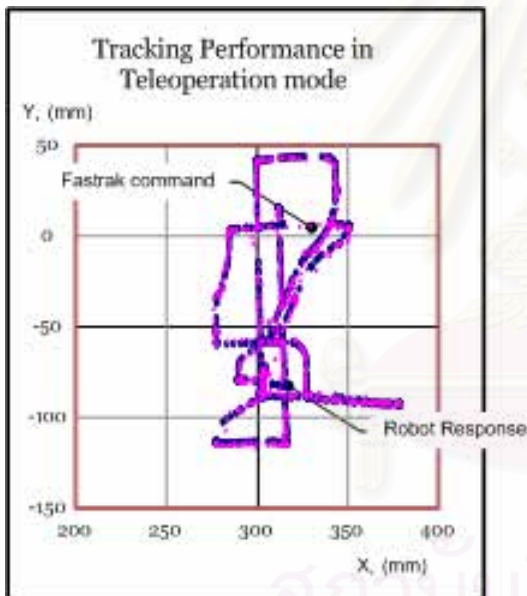


Figure 4 The performance in master-slave mode

In the first experiment, the system is tested in master-slave mode where the robot is to follow the trajectory of Fastrak® which is fixed at the palette and is manually translated in XY plane. It is noted that the origin of Fastrak® wrt to the origin of the robot frame is unknown. Thus, the trajectory of the robot is shifted to the trajectory of Fastrak® so that we are able to see the following error as shown in Fig. 4.

The PD control, which the PD gains are roughly tuned, is used for position based joint control. The result demonstrates that the robot motion follows the motion of Fastrak® quite well as shown in Fig. 4. However, the robot motion is not very smooth since the point to point control (PTP) technique is used to control the robot motion.

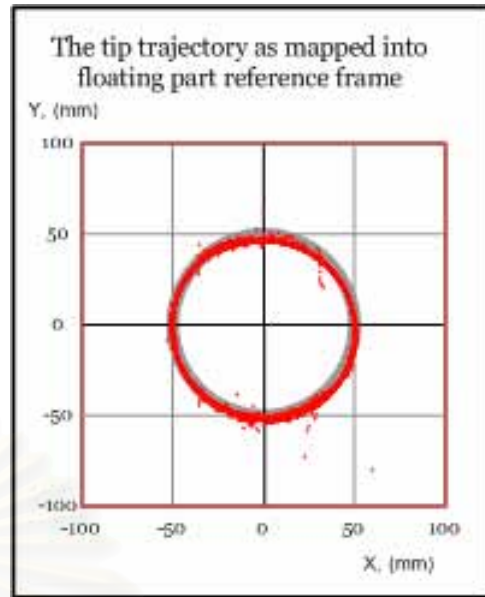


Figure 5 The tip trajectory in part frame

In the second experiment, the robot is programmed to draw a circle of radius 50 mm on a movable palette. The palette is able to translate in XY horizontal plane. The performance of the PD controller is shown in Fig 5. The relative position between Fastrak®'s transmitter and the robot fixed frame is unknown.

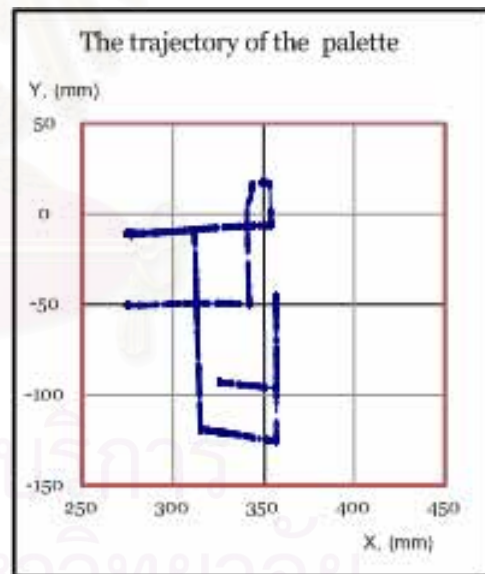
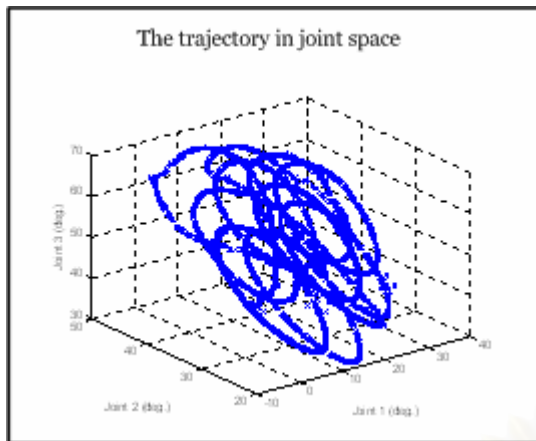
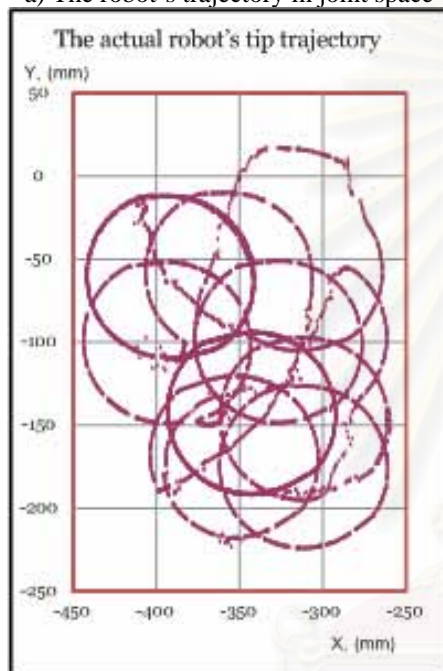


Figure 6 The position of the movable palette

After the robot drew a circle for a couple times, we translate the palette in both X and Y directions as shown in Fig 6. The robot is able to adapt its tip trajectory to follow the circle as shown in Fig 5. The robot trajectory, measured by joint's encoders are shown in Fig 7., both in joint space (Fig 7a) and in Cartesian space (Fig. 7b). The joint trajectory can be mapped into robot's Cartesian space using robot forward kinematics. It is obviously seen that the tip trajectory, either in joint space or in Cartesian space, has a response to Fastrak® receiver's position.



a) The robot's trajectory in joint space



a) The robot's trajectory in cartesian space
Figure 7 The trajectory of the robot

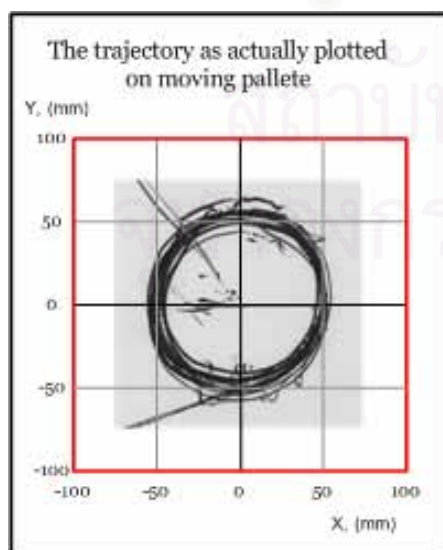


Figure 8 The tip's trace on the movable pallette

The Fastrak®'s receiver position, which is the position of workpiece reference frame, is used to compensate the tip trajectory in realtime, the result is shown in Fig 5. It is demonstrated that the robot is able to draw a circle on the movable pallette as desired. The actual tip trace on the pallette is shown in Fig 8. We are now able to demonstrate that the robot can perform its task on a movable pallette. The simulated plot, shown in Fig 5., differs from the real plot, shown in Fig 8., since the axes of Fastrak® transmitter, the movable pallette, and the robot are not perfectly aligned.

In fact, we need to know the position of Fastrak®'s transmitter relative to the robot fixed frame in order to demonstrate the performance of our technique when rotation of the pallette is involved. The result is not shown in the paper.

6. Conclusion

In this project, the robot is able to perform its task on movable workpiece. The proposed technique used positioning sensor to sense workpiece position in real time and also perform mapping and inverse kinematics calculation in real time to map the motion defined in workpiece frame to the robot joint space. The manufacturing cell is then more flexible and can handle more comprehensive manufacturing tasks.

7. Future Works

We are now developing a Laser Positioning System (LPS) [5] to sense the robot's end effector and workpiece directly in real time. This device is designed to sense the position faster and more accurate and thus enhance the overall performance. The adaptive control is to be developing for control the robot's joints along with control library to support a complicated control technique. We aim to develop a new control strategy to directly control the motion of the robot's end effector relative to the workpiece by using our developed LPS to sense both the tip and the workpiece.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors gratefully acknowledge the grant support from MTEC (National Metal and Materials Technology Center), Thailand.

References

- [1] C.S. Langley, G.M.T. D'Eleuterio, "Pose Estimation for Fixtureless Assembly Using a Feature CMAC Neural Network," The 31st international symposium on robotics, Montreal, Canada, May 2000.
- [2] G.M. Bone, D. Capson, "Vision-guided Fixtureless Assembly for Automotive Components," Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 19 (2003), pp 79-87.
- [3] L. Sciavicco, B. Siciliano, Modeling and Control of Robot Manipulators, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [4] J.J. Craig (1989), Introduction to ROBOTICS: mechanics and control, Addison-Wesley Publishing Company, 0-201-09528-9, USA.

- [5] S. Chantranuwathana, J. Kananai, R. Chanchaen,
"Development of Laser Positioning System for
Fixtureless Robotic Manufacturing," NSTDA Annual
Conference 2005, March 28-30, 2005, Science Park,
Thailand.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจรรูปตร คณะนัย เกิดเมื่อวันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2525 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดแพร่ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิริยาลัยจังหวัดแพร่ หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกลจาก ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2543 และได้เข้าศึกษาต่อวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย