

การสอบเทียบอัตโนมัติของใจโรสโคปราคาถูก 2 แกน



นางสาวชามา สารพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2556

**AUTOMATIC CALIBRATION OF TWO AXIS
LOW-COST GYROSCOPE**



Chama Saraporn



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2013**

การสอบเทียบอัตโนมัติของไอโรสโคปราคาถูกลง 2 แกน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ธีรุต คลวิชัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.กิริติ สุลักษณ์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชามา สารพร : การสอบเทียบอัตโนมัติของไจโรสโคปราคาถูกลง 2 แกน (AUTOMATIC CALIBRATION OF TWO AXIS LOW-COST GYROSCOPE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 114 หน้า.

ไจโรสโคปเป็นเครื่องมือวัดสถานะเชิงมุมชนิดหนึ่งซึ่งสามารถวัดความเร็วเชิงมุมของวัตถุที่เคลื่อนที่ ซึ่งนิยมประยุกต์ใช้สำหรับการควบคุมวัตถุในการเคลื่อนที่ อาทิเช่น เครื่องบิน ยานไร้คนขับ ยานยนต์ จักรยานไร้คนขับและหุ่นยนต์ เป็นต้น ความถูกต้องของสัญญาณและความไวต่อการตอบสนองของไจโรสโคปมีผลต่อประสิทธิภาพของการควบคุมการเคลื่อนที่ ในปัจจุบันไจโรสโคปได้พัฒนาอยู่ในรูปของ MEMS (Micro-machined Electro-Mechanical Systems) ทำให้มีราคาถูกลง จากการศึกษาพบว่าปัญหาของไจโรสโคปราคาถูกลงคือค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ผลิตระบุไว้ในคู่มือการใช้งาน อุณหภูมิและสัญญาณรบกวนส่งผลให้พารามิเตอร์บางตัวนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ เมื่อนำมาใช้งานจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการวัดและควบคุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสอบเทียบอัตโนมัติของไจโรสโคปราคาถูกลง 2 แกน โดยออกแบบและสร้างเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป ทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ที่ทำงานร่วมกับตัวกรองคาลมานในการลดสัญญาณรบกวนและใช้การทดสอบแบบสุ่มในการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมของไจโรสโคป ซึ่งทำให้การนำไจโรสโคปราคาถูกลงไปใช้งานมีประสิทธิภาพในการวัดและควบคุมดีขึ้น

CHAMA SARAPORN : AUTOMATIC CALIBRATION OF TWO AXIS

LOW-COST GYROSCOPE . THESIS ADVISOR : ASST. PROF.

JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 114 PP.

LOW-COST GYROSCOPE / KALMAN FILTER / CALIBRATION

Gyroscopes are commonly used as sensors for measuring angular velocity of objects in several applications such as unmanned aerial vehicle (UAV), robot balance control, car navigation, etc. Usually, sensitivity and accuracy of response are essential parameters of gyroscopes to affect the performance of the motion control. The gyroscopes based on micro-electromechanical system (MEMs) have been receiving increasing attention since the micro-machining technology was developed. A reduction in cost, size and weight is an attractive aspect of MEMs-based gyroscopes. However, the low-cost MEMs-based gyroscopes have more sensitivity to disturbance noise and scaling factor in their output signal. According to the literature reviews, some parameters of low-cost gyroscopes do not meet the specification mentioned by manufacturers and they are very sensitive to ambient temperature and noise during the operation, leading to error in measurement and control systems. The objective of this research is to propose the automatic calibration to improve the efficiency of two axis low-cost gyroscopes. The calibration technique was developed based on a platform with two axes of rotation and exact orientation feedbacks. The adaptive compensator with the Kalman filter was employed to estimate parameters of gyroscopes and the random test method was applied to calibrate the angular displacement and velocity.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพ เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นาวาอากาศเอก ดร.วรพจน์ ขำพิศ รองศาสตราจารย์ ดร. ทวิช จิตรสมบูรณ์ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา

คุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ คุณอาภรณ์พรรณ ศรีอัครวิทยา และคณะเจ้าหน้าที่ประจำ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ

วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพ่อสนธิ สารพร และคุณแม่เสาวณีย์ สารพร รวมถึงครอบครัว ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมาและขาดไม่ได้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกคน ที่มีส่วนทำให้การเรียนในระดับปริญญาโทเป็นช่วงชีวิตที่มีสีสันและน่าจดจำ

ชามา สารพร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	2
2 ปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ไจโรสโคป.....	3
2.1.1 Rotary (Classical) Gyroscope	4
2.1.2 Vibrating Structure Gyroscope	5
2.1.3 Optical Gyroscope	6
2.2 ตัวกรอง	7
2.2.1 ตัวกรองคาลมาน	7
2.2.2 ตัวกรองคาลมานแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (The Discrete-Time Kalman Filter)	8

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3	ตัวกรองคาลมานแบบเวลาต่อเนื่อง (The Continuous-Time Kalman Filter or Kalman-Bucy Filter)	11
2.3	การชดเชยปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System) โดยใช้วิธีการ Gradient Method.....	12
2.4	การสอบเทียบ.....	13
2.4.1	การสอบเทียบแบบสถิติ	14
2.4.2	การสอบเทียบแบบพลวัต	15
2.4.3	ความไวของการวัด.....	15
2.4.4	ความเป็นเชิงเส้นและความไม่เป็นเชิงเส้น	16
2.4.5	ความเที่ยงตรง ความสามารถในการวัดซ้ำ และความสามารถในการทำซ้ำ	16
2.4.6	ย่านวัดหรือช่วงการวัด.....	17
2.4.7	ความละเอียดของการวัด	18
2.4.8	ความผิดพลาดและความไม่แน่นอน.....	18
2.5	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.6	สรุป	21
3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	22
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณไจโรสโคป.....	22
3.2	ตัวกรองคาลมาน.....	23
3.3	การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ โดยใช้วิธี Gradient Method	24
3.4	สรุป.....	29
4	เครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปและผลการจำลองสถานการณ์.....	30
4.1	เครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกน	30
4.1.1	โครงสร้างเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป	30

สารบัญ (ต่อ)

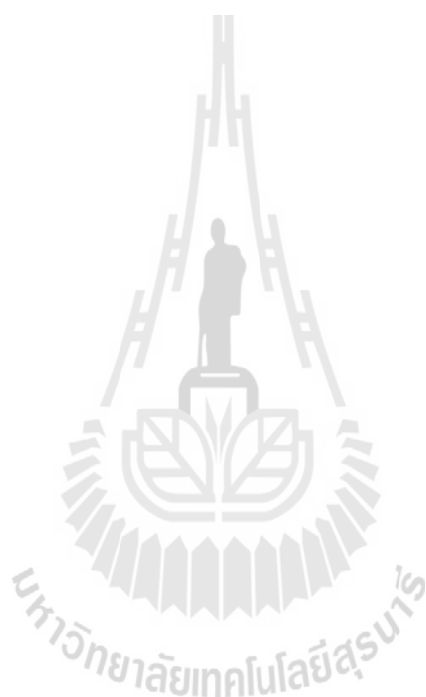
หน้า

4.1.2	ส่วนประกอบของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป และการควบคุมการทำงาน	32
4.1.3	การทดสอบการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป	34
4.1.4	ขั้นตอนการสอบเทียบไจโรสโคป.....	36
4.2	ผลการจำลองสถานการณ์.....	39
4.2.1	การกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองคาถมาน	41
4.2.2	การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้.....	42
4.2.3	การชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้กับสัญญาณไจโรสโคป.....	43
4.3	สรุป.....	45
5	ผลการทดสอบการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสอบเทียบไจโรสโคป.....	46
5.1	การประมาณค่าพารามิเตอร์.....	47
5.1.1	การกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองคาถมาน	47
5.1.2	การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้.....	49
5.1.3	การชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้กับสัญญาณไจโรสโคป.....	50
5.2	การสอบเทียบความเร็วเชิงมุม.....	52
5.3	การสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุม.....	64
5.4	ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสอบเทียบ	75
5.5	สรุป.....	76
6	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	78
6.1	สรุป.....	78
6.2	ข้อเสนอแนะ	79
	รายการอ้างอิง	80
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลทางเทคนิคของ ROBOTIS Dynamixel Servo Motor.....	82
	ภาคผนวก ข. คู่มือการใช้งาน	86

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	102
ประวัติผู้เขียน	114



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ตารางพารามิเตอร์ของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกน	31
4.2	ผลการประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิ่งแฟกเตอร์	43
5.1	พารามิเตอร์ของไจโรสโคป LPY503AL จากคู่มือการใช้งาน	47
5.2	ผลการประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิ่งแฟกเตอร์	51
5.3	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมแกน x สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1	56
5.4	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมแกน z สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1	57
5.5	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมแกน x สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 2	58
5.6	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมแกน z สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 2	59
5.7	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุมแกน x สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1	60
5.8	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุมแกน z สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1	61
5.9	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุมแกน x สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 2	62
5.10	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุมแกน z สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 2	63
5.11	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุมแกน x สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1	65
5.12	การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุมแกน z สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.13 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุมแกน x สำหรับไวรัสโคโรนาที่ 2	67
5.14 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุมแกน z สำหรับไวรัสโคโรนาที่ 2	68
5.15 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุมแกน x สำหรับไวรัสโคโรนาที่ 1	71
5.16 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุมแกน z สำหรับไวรัสโคโรนาที่ 1	72
5.17 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุมแกน x สำหรับไวรัสโคโรนาที่ 2	73
5.18 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุมแกน z สำหรับไวรัสโคโรนาที่ 2	74
5.19 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับไวรัสโคโรนาที่ 1 และ 2	75
5.20 ผลการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมสำหรับไวรัสโคโรนาที่ 1 และ 2	75
5.21 ผลการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมสำหรับไวรัสโคโรนาที่ 1 และ 2	76

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	Rotary (Classical) Gyroscopes 5
2.2	แบบจำลองพื้นฐานของ MEMS ไจโรสโคปชนิดแกนเดี่ยว 6
2.3	ลำดับการทำงานของตัวกรองกาลมานแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง..... 10
2.4	แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS 12
2.5	กระบวนการวัดพื้นฐาน 14
2.6	กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิต 15
2.7	การเปรียบเทียบความเที่ยงตรงและความถูกต้องของผลลัพธ์ 17
2.8	ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่มและความผิดพลาดทั้งหมด 18
3.1	การทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ 25
3.2	แผนภาพบล็อกของการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธี Gradient Method 28
4.1	เครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป 31
4.2	การควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี..... 32
4.3	มอเตอร์ RX-28 และ RX-64..... 33
4.4	USB-RS-485 adapter 33
4.5	การควบคุมการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป..... 34
4.6	ผลการตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดของแกน x..... 35
4.7	ผลการตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดของแกน z..... 35
4.8	ขั้นตอนการสอบเทียบไจโรสโคป..... 38
4.9	การจำลองสถานการณ์ 39
4.10	ตำแหน่งเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์..... 40
4.11	ความเร็วเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์ 40
4.12	สัญญาณไจโรสโคปจำลอง 41
4.13	สัญญาณจากตัวกรองกาลมาน 41
4.14	การชดเชยสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์เทียบกับสัญญาณอ้างอิง 42
4.15	การประมาณค่าเบี่ยงเบน(δ)..... 42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16	การประมาณค่าสเกลลิงแฟกเตอร์($\hat{\alpha}$) 43
4.17	สัญญาณความเร็วเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์ 44
4.18	สัญญาณตำแหน่งเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์ 44
5.1	LPY503AL Gyroscope 47
5.2	ตำแหน่งเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์ 48
5.3	ความเร็วเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์ 48
5.4	สัญญาณจากตัวกรองคาลมาน 49
5.5	การชดเชยสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์เทียบกับสัญญาณอ้างอิง 49
5.6	การประมาณค่าพารามิเตอร์ 50
5.7	สัญญาณความเร็วเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์ ที่ชดเชยด้วยพารามิเตอร์จากคู่มือของผู้ผลิต 51
5.8	สัญญาณความเร็วเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์ 51
5.9	สัญญาณตำแหน่งเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์ 52
5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมแกน x ของเอ็นโค้ดเดอร์ และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 56
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมแกน z ของเอ็นโค้ดเดอร์ และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 57
5.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมแกน x ของเอ็นโค้ดเดอร์ และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 58
5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมแกน z ของเอ็นโค้ดเดอร์ และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 59
5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมแกน x ของเอ็นโค้ดเดอร์ และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 69
5.15	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมแกน z ของเอ็นโค้ดเดอร์ และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 69
5.16	ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมแกน x ของเอ็นโค้ดเดอร์ และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมแกน z ของเอ็นโค้ดเดอร์ และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2	70
ข.1 การตั้งค่าฟังก์ชันสวิตช์ของ USB to Dynamixel Adapter	87
ข.2 หน้าต่าง New Hardware Search.....	88
ข.3 หน้าต่าง Found New Hardware Wizard.....	88
ข.4 หน้าต่าง System Properties.....	89
ข.5 หน้าต่าง Driver Manager	90
ข.6 หน้าต่างการตั้งค่า USB Serial Properties.....	90
ข.7 หน้าต่าง Getting Started ในโปรแกรม LabVIEW	91
ข.8 หน้าต่าง Specify Create or Update Mode	91
ข.9 หน้าต่าง Select Shared Library and Header File	92
ข.10 หน้าต่าง Configure Include Paths and Preprocessor Definitions	92
ข.11 หน้าต่าง Select Functions to Convert	93
ข.12 หน้าต่าง Configure Project Library Setting.....	93
ข.13 หน้าต่าง Select Error Handling Mode	94
ข.14 หน้าต่าง Configure VIs and Controls	94
ข.15 หน้าต่าง Generation Summary.....	95
ข.16 หน้าต่าง Generation Progress	95
ข.17 หน้าต่าง Finish.....	96
ข.18 หน้าต่าง User Libraries สำหรับเรียกใช้ Dynamixel SDK Functions	97
ข.19 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 1: START *	98
ข.20 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 2	99
ข.21 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 3	99
ข.22 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 4	100
ข.23 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 5	100
ข.24 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 6: FINISH **	101

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\dot{\theta}$	=	ความเร็วเชิงมุมจริงของวัตถุ (degree/s)
ω_g	=	สัญญาณความเร็วเชิงมุมของไจโรสโคป (degree/s)
δ	=	ค่าเบี่ยงเบน (V)
α	=	ค่าสเกลลิ่งเฟคเตอร์ ((degree/s)/V)
v_g	=	สัญญาณรบกวนในการวัด
w_k	=	สัญญาณรบกวนจากการวัดของ Process Model
v_k	=	สัญญาณรบกวนจากการวัดของ Measurement Model
Q	=	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจากการวัดของ Process Model
R	=	ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนจากการวัดของ Measurement Model
K	=	Kalman Gain
$\hat{\omega}_g$	=	สัญญาณไจโรสโคปจากตัวกรองคาลมาน
$\dot{\theta}_{en}$	=	สัญญาณความเร็วเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์ (degree/s)
$\hat{\dot{\theta}}_{en}$	=	สัญญาณความเร็วเชิงมุมจากตัวหัดเซชแบบปรับตัวได้
$\hat{\alpha}$	=	ค่าเบี่ยงเบนจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ (V)
$\hat{\delta}$	=	ค่าสเกลลิ่งเฟคเตอร์จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ (V/(degree/s))
$\hat{\omega}_{g,comp}$	=	สัญญาณไจโรสโคปที่ได้จากการหัดเซชค่าพารามิเตอร์ (degree/s)
$\theta_{x,ref}$	=	ตำแหน่งเชิงมุมอ้างอิงในแนวแกน x
θ_x	=	ตำแหน่งเชิงมุมในแนวแกน x
$\theta_{z,ref}$	=	ตำแหน่งเชิงมุมอ้างอิงในแนวแกน z
θ_z	=	ตำแหน่งเชิงมุมในแนวแกน z
$e_L(x)$	=	ค่าความคลาดเคลื่อนจากความสัมพันธ์เชิงเส้น
$y(x)$	=	ค่าจากการวัด
$y_L(x)$	=	ความสัมพันธ์เชิงเส้นในรูปสมการเส้นตรง
$e_{L_{max}}$	=	ค่าความคลาดเคลื่อนจากความสัมพันธ์เชิงเส้นที่มากที่สุด
r_0	=	ค่าเต็มสเกล
N	=	จำนวนข้อมูล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P	=	ระดับความเชื่อมั่น
S_x	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล
x_{true}	=	ค่าอ้างอิง
$\bar{x}$	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
S_{max}	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุดของชุดข้อมูล



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไจโรสโคป (Gyroscope) เป็นเครื่องมือวัดสถานะเชิงมุมชนิดหนึ่งซึ่งสามารถวัดความเร็วเชิงมุมของวัตถุได้ ในงานด้านการควบคุมการเคลื่อนที่เชิงมุมที่ต้องการความถูกต้องสูง เช่น เซอร์โวจาโรสโคปที่ใช้งานจึงจำเป็นต้องมีความถูกต้องของสัญญาณและมีการตอบสนองไว ผู้ใช้งานทั่วไปหรือในการแข่งขันหุ่นยนต์ของนักเรียนนั้นนิยมเลือกใช้ไจโรสโคปราคาถูกในการใช้งานเพื่อบอกสถานะเชิงมุมของอุปกรณ์ที่ติดตั้ง เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่าย และราคาที่ถูกลงจึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือวัดในปฏิบัติการให้นักศึกษาได้ทดลองใช้งาน ไจโรสโคปราคาถูกในปัจจุบันอยู่ในรูปแบบของ MEMs ซึ่งเป็นชิปอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ที่ซึ่งผู้ผลิตได้ระบุค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นไว้ในคู่มือการใช้งาน แต่ในการใช้งานจริง พารามิเตอร์บางตัวนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิการใช้งาน การนำชิปไจโรสโคปราคาถูกไปประกอบเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้งาน (Printed Circuit Board, PCB) รวมถึงสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ก็ส่งผลให้พารามิเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากข้อมูลที่ผู้ผลิตกำหนด จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบไจโรสโคปราคาถูกก่อนจะนำมาใช้งานเสมอ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสอบเทียบอัตโนมัติของไจโรสโคปราคาถูก 2 แกน ซึ่งสามารถทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นได้ ณ สถานะที่ใช้งานและประมาณค่าความไม่แน่นอนของไจโรสโคปแต่ละตัว เพื่อใช้ประกอบในกระบวนการวัดและการควบคุม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของไจโรสโคปราคาถูก

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

สามารถสอบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมแบบอัตโนมัติของไจโรสโคปราคาถูกได้ 2 แกน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ไจโรสโคปราคาถูกมีราคาไม่เกินหนึ่งหมื่นบาท
2. สร้างอัลกอริทึมที่ใช้ในการประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟลเตอร์

3. ทำการสอบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมของไจโรสโคปราคาถูกลง 2 แกน กับค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ของมอเตอร์

4. ความถี่ของการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการสอบเทียบไม่เกิน 4 Hz

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของไจโรสโคปราคาถูกลง
2. เป็นการลดต้นทุนของการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุได้
3. ได้เครื่องมือและอัลกอริทึมสำหรับสอบเทียบอัตโนมัติของไจโรสโคปราคาถูกลง

แบบ 2 แกน

1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับไจโรสโคป ตัวกรองสัญญาณ การประมาณค่าตัวแปรของระบบและกระบวนการสอบเทียบ รวมถึงปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณไจโรสโคป ตัวกรองคาลมาน และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์

บทที่ 4 กล่าวถึงเครื่องสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกน ขั้นตอนการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมของไจโรสโคป ผลการจำลองสถานการณ์การทำงานของตัวกรองคาลมาน ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์ พร้อมทั้งสรุป

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดสอบการทำงานของการประมาณค่าพารามิเตอร์รวมถึงผลการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมของไจโรสโคป

บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปรัทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับการสอบเทียบเซนเซอร์ไจโรสโคปราคาถูกลสามารถทำได้หลายวิธีการ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าเบี่ยงเบน (Bias) และค่าสเกลลิงแฟกเตอร์ (Scaling Factor) โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ร่วมกับการลดสัญญาณรบกวน (Noise) ด้วยตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) ซึ่งเป็นตัวสังเกตแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal Observer) ที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการได้ แล้วชดเชยค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณค่าได้ให้กับสัญญาณไจโรสโคป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานไจโรสโคปราคาถูกให้มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยได้ค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับเซนเซอร์ไจโรสโคป ตัวกรองคาลมาน ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ และกระบวนการสอบเทียบ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการออกแบบกระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสอบเทียบไจโรสโคป

2.1 ไจโรสโคป

ไจโรสโคป คือ ล้อที่ติดตั้งในกรอบวงแหวนหมุนได้ ที่ยอมให้ล้อหมุนโดยอิสระในทิศทางใด ๆ ก็ได้ เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อหมุนเพื่อช่วยรักษาทิศทางของแกนหมุน โมเมนตัมเชิงมุมของล้อหมุนดังกล่าวทำให้ไจโรสโคปสามารถรักษาทิศทางการหมุนได้แม้ว่ากรอบล้อจะเอียง จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำหลักการรักษาทิศทางการหมุนไปประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ต่าง ๆ มากมาย เช่น เข็มทิศไจโรสโคปที่ไม่ขึ้นกับการหมุนของโลก การสร้างนักบินอัตโนมัติโดยใช้คุณสมบัติการรักษาทิศทางของไจโรสโคปเพื่อให้เครื่องบินบินได้ตรงเส้นทาง มีการใช้ไจโรสโคปแบบ 2 กรอบวงแหวนเพื่อสร้างอุปกรณ์รักษาเสถียรภาพ ที่เรียกว่าไจโรสแตบิไลเซอร์ (Gyrostabilizer) สำหรับใช้ลดการโคลงของเรือ ซึ่งเท่ากับลดความเสียหายของสินค้าลงเหลือน้อยที่สุดและลดความเค้นในโครงสร้างกระดูกงู อีกทั้งยังเพิ่มความรู้สึกสบายในการนั่งเรือของผู้โดยสารด้วย สำหรับไจโรสโคปแบบ 3 กรอบวงแหวนมีการใช้ในการออกแบบเส้นขอบฟ้าประดิษฐ์ครั้งแรกสำหรับอากาศยาน เครื่องมือนี้แบ่งบอกระดับการเงย (Pitch) และการหมุน (Roll) ต่อตัวนักบินหรือคนขับ และมีประโยชน์อย่างยิ่งโดยเฉพาะเมื่อไม่สามารถมองเห็นเส้นขอบฟ้าได้เนื่องจากสภาพอากาศไม่ดี นอกจากนี้ยังมีการใช้ไจโรสโคปแบบ 3 กรอบวงแหวนร่วมกับไจโรสโคปแบบ 2 กรอบวงแหวนในการบังคับทิศทางอัตโนมัติของจรวดนำวิถี

และในดาวเทียมบางดวงก็ใช้หลักของไจโรสโคปเพื่อปรับตำแหน่งของดาวเทียมในอวกาศ หรือใช้ในการหมุนแผงโซลาร์เซลล์ให้หันไปทางดวงอาทิตย์ตลอดเวลา

จากประโยชน์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้น ไจโรสโคปที่มีลักษณะเป็นล้อหมุนและกรอบวงแหวนนั้นยังมีข้อเสียที่สำคัญ นั่นคือขนาดของไจโรสโคป ทำให้ต้องการพื้นที่ในการติดตั้ง อีกทั้งการเคลื่อนที่ของแต่ละกรอบวงแหวนอาจมีการติดขัดของจุดหมุนได้ ซึ่งส่งผลต่อการวัด และการควบคุมทิศทางของอุปกรณ์ จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ไจโรสโคป จึงถูกพัฒนาให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งนั่นคือ ซิปอีเล็กทรอนิกส์ ที่มีขนาดเล็กลงอย่างมากเมื่อเทียบกับ ไจโรสโคปแบบล้อหมุน ทำให้มีการประยุกต์ใช้งานไจโรสโคปอย่างกว้างขวางมากขึ้น โดยเฉพาะในอุปกรณ์ขนาดเล็ก ยกตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์บังคับและเครื่องบินไร้คนขับขนาดเล็ก เป็นต้น

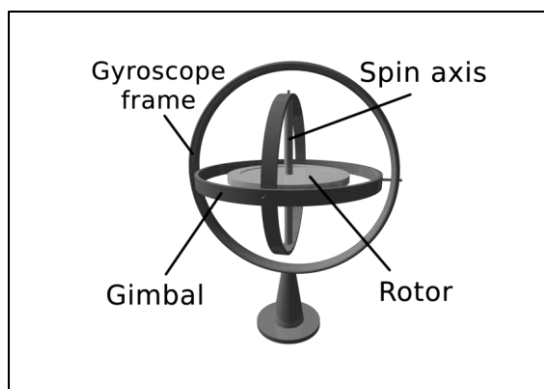
ไจโรสโคปสามารถแบ่งชนิดตามหลักการทำงานพื้นฐานได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. Rotary (Classical) Gyroscopes
2. Vibrating Structure Gyroscopes
3. Optical Gyroscope

2.1.1 Rotary (Classical) Gyroscopes

Rotary Gyroscopes เป็นไจโรสโคปแบบดั้งเดิมใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม สามารถกล่าวได้ว่า เมื่อแรงกระทำเนื่องมาจากแรงบิดภายนอกของระบบเท่ากับศูนย์ ผลรวมโมเมนตัมเชิงมุมของระบบจะมีค่าคงที่ทั้งขนาดและทิศทาง ไจโรสโคปชนิดนี้ประกอบไปด้วยล้อหมุน ซึ่งติดไว้บนชุดของกรอบวงแหวน ในขณะที่ไจโรสโคปหมุนมันจะรักษาคำแหน่งหรือวงโคจรให้คงที่ เมื่อมีแรงบิดภายนอกหรือการหมุนของแกนใดแกนหนึ่งมากระทำกับอุปกรณ์นี้ คำแหน่งหรือวงโคจรจะเปลี่ยนแปลงไปทำให้สามารถวัดความเร็วเชิงมุมได้ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปรากฏการณ์ไจโรสโคปิก (Gyroscopic Phenomenon)

ปรากฏการณ์ไจโรสโคปิกเกิดขึ้นเมื่อวัตถุซึ่งหมุนรอบแกนหมุน (Spin Axis) มีแรงบิดภายนอกมากระทำในทิศทางตั้งฉากกับแกนหมุน เรียกแกนที่มีแรงบิดภายนอกมากระทำนี้ว่าแกนอินพุต (Input Axis) ในระบบที่มีการหมุนรอบแกนเมื่อมีแรงบิดภายนอกมากระทำ เวกเตอร์ของโมเมนตัมเชิงมุมซึ่งเดิมอยู่ในทิศทางแกนหมุน จะย้ายเข้ามาในทิศทางของเวกเตอร์แรงบิดที่มากระทำ ผลเนื่องจากแรงบิดทำให้แกนหมุน หมุนรอบแกนที่ตั้งฉากกับแกนหมุน และแกนอินพุต เรียกแกนนี้ว่า แกนเอาต์พุต (Output Axis)



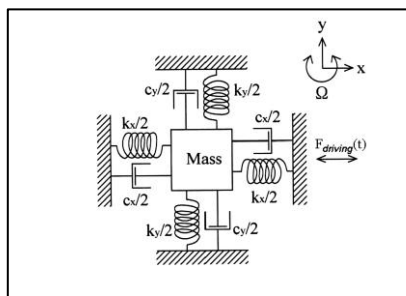
รูปที่ 2.1 Rotary (Classical) Gyroscopes

ปัจจุบัน Rotary Gyroscopes ถูกประยุกต์ใช้ในการรักษาเสถียรภาพเป็นหลัก และสำหรับชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ไม่ว่าจะเป็นกรอบวงแหวน (Gimbal) หรือล้อหมุน (Rotor) นั้นหมายความว่าไจโรสโคปชนิดนี้อาจเกิดการชำรุดหรือติดขัดเมื่อใช้งานไปเป็นเวลานาน มีการพัฒนาลูกปืน (Bearing) เพื่อลดการชำรุดและโอกาสที่จะเกิดการติดขัดขึ้นในไจโรสโคปนี้ ผลของการมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่อีกอย่างหนึ่งก็คือมีข้อจำกัดเรื่องขนาดของของไจโรสโคป อย่างไรก็ตามในปัจจุบันไจโรสโคปชนิดนี้ยังมีการใช้งานในงานด้านการทหารหรือการเดินเรือ ที่ซึ่งขนาดทางกายภาพของไจโรสโคปชนิดนี้ไม่ได้เป็นอุปสรรคในการทำงาน

2.1.2 Vibrating Structure Gyroscopes

Vibrating Structure Gyroscopes เป็นอุปกรณ์ชนิด มีโครงสร้างเป็นโพลีซิลิกอน (Polysilicon) หรือคริสตัลซิลิกอน ไจโรสโคปแบบ MEMS มีขนาดเล็กกว่าไจโรสโคปแบบล้อหมุน หลายเท่าและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้นซึ่งปัจจุบันสามารถหาซื้อได้ง่าย

หลักการทำงานของ Vibrating Structure Gyroscopes เมื่อพิจารณาแบบจำลอง ไจโรสโคปชนิดแกนเดียว (Single Z-axis Vibratory Gyroscope) สามารถอธิบายหลักการทำงานของ ไจโรสโคปชนิดนี้นบนพื้นฐานของระบบมวล สปริงและตัวหน่วง โดยมวลจะถูกขับให้สั่นตามแนวแกน x (Driving Axis) แสดงดังรูปที่ 2.2 เมื่อมีความเร็วเชิงมุมเป็นอินพุตตามแนวแกน z มากระทำต่อไจโรสโคป จะทำให้เกิดการสั่นของมวลตามแนวแกนที่ตั้งฉากกันแนวการสั่นเดิมนั้นคือแนวแกน y อันเนื่องมาจากแรงหนีศูนย์กลาง (Coriolis Force) ความเร็วเชิงมุมสามารถหาค่าได้จากการวัดแอมพลิจูดการสั่นในแนวแกน y



รูปที่ 2.2 แบบจำลองพื้นฐานของ MEMS ไจโรสโคปชนิดแกนเดียว

2.1.3 Optical Gyroscope

Optical Gyroscope ได้ถูกพัฒนาขึ้นภายหลังจากการค้นพบเทคโนโลยีเลเซอร์ ความน่าสนใจของไจโรสโคปชนิดนี้คือตัวไจโรสโคปไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ Optical Gyroscope มีความแตกต่างจากไจโรสโคปชนิดอื่นคือ หลักการทำงานของไจโรสโคปชนิดนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับหลักการการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of Angular Momentum) แต่ขึ้นอยู่กับความคงที่ของความเร็วของแสง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไจโรสโคปราคาถูกชนิด Vibrating Structure Gyroscopes ที่ให้เอาต์พุตเป็นแรงดันที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วเชิงมุม ตัวอย่างการใช้งานไจโรสโคปในการวัดความเร็วเชิงมุมของหุ่นยนต์ เมื่อมีการเคลื่อนที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงซึ่งเอาต์พุตของไจโรสโคปนั้นจะแกว่งขึ้นลงตามทิศทางการเอียงของหุ่นยนต์ ไจโรสโคปมีการทำงานในลักษณะที่เป็นการตอบสนองทางพลวัต (Dynamic Response) เมื่อหุ่นยนต์มีการเอียงหรือมีการเปลี่ยนแปลงมุมไปมา เอาต์พุตที่จ่ายออกมาจากไจโรสโคปก็จะมีการแกว่งขึ้นหรือลงตามทิศทางการเคลื่อนที่ แต่หากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปแล้วหยุดการเคลื่อนที่ ไม่ว่าจะหยุดที่มุมใดเอาต์พุตของไจโรสโคปก็จะแกว่งกลับมาที่จุดอ้างอิงเหมือนเดิม พฤติกรรมลักษณะนี้ทำให้ไจโรสโคปนั้นไม่สามารถวัดค่าทางสถิต (Static) ได้และปัญหาของไจโรสโคปราคาถูกชนิด Vibrating Structure Gyroscopes คือมีสัญญาณรบกวนและมีค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณที่ขึ้นกับอุณหภูมิการใช้งาน ในการใช้งานจึงต้องมีการสอบเทียบก่อนการใช้งานเพื่อประมาณค่าเบี่ยงเบนที่เปลี่ยนแปลงของไจโรสโคปก่อนการใช้งานเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนของสัญญาณที่ทำการวัดซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการควบคุมการทำงานในส่วนอื่นๆได้

2.2 ตัวกรอง

สัญญาณรบกวนในการวัดหรือการส่งข้อมูลจะพบได้เสมอในทุกสภาวะ โดยสัญญาณรบกวนมักอยู่ในรูปแบบของสัญญาณแบบสุ่ม (Random Signal) ซึ่งการออกแบบระบบการวัดที่ดีจะสามารถลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้มาก ผู้ทำการวัดควรมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความถี่ของสัญญาณที่ต้องการวัด เช่น ต้องการวัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อม อาจคาดได้ว่าอุณหภูมิดังกล่าวจะมีค่าคงที่ในช่วงเวลาสั้น ๆ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลที่เป็นสัญญาณความถี่ต่ำจึงเป็นเพียงส่วนเดียวที่ต้องคำนึงถึง ดังนั้นสัญญาณความถี่สูงจึงเป็นสัญญาณรบกวนและสามารถกำจัดไปได้โดยไม่ทำให้ข้อมูลที่ได้อาจจากการวัดเกิดการสูญหายหรืออีกตัวอย่างหนึ่งคือการค้นหาสัญญาณรบกวนการได้ยินของมนุษย์ ซึ่งปกติมนุษย์จะได้ยินเสียงในช่วงความถี่เสียง 20 Hz ถึง 20 kHz ดังนั้นการกำจัดสัญญาณรบกวนที่อยู่นอกช่วงดังกล่าวจะทำให้ข้อมูลที่ได้น่าเชื่อถือมากขึ้น

ตัวกรองสัญญาณโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) คือตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ผ่าน โดยไม่มีการลดทอนของสัญญาณหรือมีการลดทอนสัญญาณในปริมาณน้อยมาก
2. ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง (High Pass Filter) คือตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าค่าความถี่ตัดผ่าน
3. ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter) คือตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่อยู่ในช่วงความถี่ที่กำหนดผ่าน สัญญาณที่มีความถี่อยู่นอกช่วงที่กำหนดจะถูกลดทอนสัญญาณลงไปตามลำดับ
4. ตัวกรองลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Notch Filter) คือตัวกรองที่ลดทอนสัญญาณในช่วงที่กำหนดออกไป บางครั้งเรียกว่า Band Reject Filter

ตัวกรองทั้ง 4 ประเภทนั้นเป็นตัวกรองที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้ตัวกรองอีกชนิดหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมอย่างมากเช่นกันในงานด้านการรวมสัญญาณและระบบควบคุม นั่นคือ ตัวกรองคาลมาน

2.2.1 ตัวกรองคาลมาน

ในการวิเคราะห์ระบบจำเป็นต้องรู้สถานะ (State) ของระบบว่าเป็นอย่างไร และมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือไม่อย่างไร การศึกษากระบวนการโดยมากมักตั้งสมมุติฐานว่าค่าทุกค่าของระบบเป็นค่าแน่นอน การพิจารณาระบบจึงมีลักษณะเป็นแบบ Deterministic ในทางปฏิบัติ

การหาสถานะของระบบมีความซับซ้อนมากกว่า ทั้งนี้เพราะมีข้อจำกัดหลายปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงได้แก่

1. ไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดที่สมบูรณ์แบบตลอดเวลา
2. ไม่มีเซนเซอร์ใดที่วัดค่าได้ถูกต้องแม่นยำ
3. ปัจจัยอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้

ด้วยเหตุนี้เราจึงไม่สามารถพิจารณาระบบด้วยการวิเคราะห์แบบ Deterministic เพียงอย่างเดียวได้ จึงจำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์ระบบแบบ Stochastic กล่าวคือ เราต้องพิจารณาความไม่แน่นอนของระบบไปพร้อมกับการวิเคราะห์ระบบ วิธีการหนึ่งสำหรับการประมาณสถานะของระบบคือ ตัวกรองคาลมาน ซึ่งในปัจจุบันตัวกรองคาลมานถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในศาสตร์ของ Data Fusion เพื่อใช้ประมวลข้อมูลจากเซนเซอร์หลายประเภทภายใต้สัญญาณรบกวนเพื่อประมาณค่าของสถานะที่ดีที่สุดของระบบ

ตัวกรองคาลมานถูกตั้งชื่อตาม รูดอล์ฟ อี. คาลมาน (Rudolf E. Kalman) ซึ่งคาลมานได้ใช้เป็นครั้งแรก เพื่อแก้ปัญหาการประมาณสถานะของระบบนำร่องด้วยคอมพิวเตอร์ในยานอวกาศ

2.2.2 ตัวกรองคาลมานแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (The Discrete-Time Kalman Filter)

ตัวกรองคาลมานมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนคือ โครงสร้างของระบบพลวัตและอัลกอริทึมของตัวกรองคาลมาน จากปัจจัยที่ทำให้ระบบเป็นแบบ Stochastic ดังที่ได้กล่าวมาแล้วจึงตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ ไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดที่สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีเซนเซอร์ใดวัดค่าได้ถูกต้อง 100 เปอร์เซ็นต์และมีปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั่วไปของระบบพลวัตเพื่อประมาณสถานะของ x ณ เวลาใดเวลาหนึ่งแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง คือ

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad : \text{Process Model} \quad (2.1)$$

สมการสำหรับการวัดค่าเอาต์พุตจากเซนเซอร์ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง คือ

$$z_k = Hx_k + v_k \quad : \text{Measurement Model} \quad (2.2)$$

โดยมี w_k และ v_k เป็นสัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัดมีลักษณะเป็น Gaussian White noise ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเป็น Q และ R ตามลำดับ มีเพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum) คงที่ทุกย่านความถี่ สามารถเขียนการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability) ได้ดังนี้

$$p(w) \sim N(0, Q) \quad (2.3)$$

$$p(v) \sim N(0, R) \quad (2.4)$$

กำหนดให้ $\hat{x}$ คือ สถานะที่ประมาณได้จากตัวกรองคาลมาน สามารถประมาณค่าล่วงหน้าของสถานะ ($\hat{x}_k^-$) ได้จากสมการ

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (2.5)$$

กำหนดความผิดพลาดจากการประมาณค่าล่วงหน้า (Predicted Error Covariance) คือ

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2.6)$$

ความผิดพลาดภายหลังการกรองสัญญาณ (Filtered Error Covariance)

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (2.7)$$

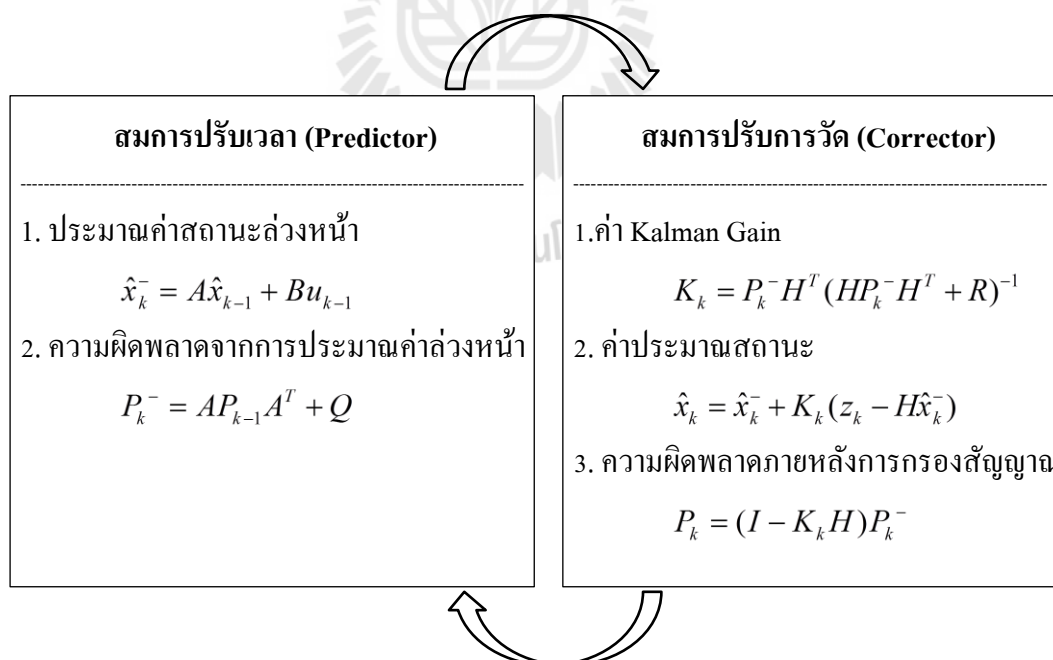
โดยที่ K คือ Kalman gain และสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (2.8)$$

K คือค่า Kalman Gain ในรูป Scalar เมื่อทราบค่า Kalman Gain แล้วค่าประมาณสถานะของ $\hat{x}$ ที่ดีที่สุดจากตัวกรองคาลมานคือ

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (2.9)$$

จากสมการในตัวกรองคาลมานแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้นสามารถแบ่งสมการออกเป็น 2 ส่วน คือ สมการปรับเวลา (Time Update) และสมการปรับการวัด (Measurement Update) สมการปรับเวลาคือ ตัวตอบสนองต่องานล่วงหน้าที่สถานะเวลาปัจจุบันและโควาเรียนของการประมาณที่ผิดพลาดเพื่อให้ได้มาซึ่งการประมาณล่วงหน้าของช่วงเวลาต่อไป ส่วนสมการปรับการวัดจะตอบสนองต่อการป้อนกลับ คือ การวัดครั้งใหม่จะถูกรวมเข้ากับการประมาณเพื่อให้ได้มาซึ่งการปรับปรุงการประมาณล่วงหน้า โดยสมการปรับเวลาสามารถเรียกได้ว่าเป็น สมการตัวทำนาย (Predictor) และสมการปรับการวัดจะเรียกได้ว่าเป็น สมการตรวจแก้ (Corrector) สำหรับลำดับการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบเวลาไม่ต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลำดับการทำงานของตัวกรองคาลมานแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

2.2.3 ตัวกรองคาลมานแบบเวลาต่อเนื่อง (The Continuous-Time Kalman Filter or Kalman-Bucy Filter)

ตัวกรองคาลมานแบบเวลาต่อเนื่องเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของตัวกรองคาลมาน ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั่วไปของระบบพลวัตเพื่อประมาณสถานะคือ

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (2.10)$$

$$z = Hx + v \quad (2.11)$$

โดยมี w และ v เป็นสัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัดมีลักษณะเป็น Gaussian White Noise ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนเป็น Q และ R ตามลำดับกำหนดให้ $\hat{x}$ คือสถานะของระบบที่ประมาณได้จากตัวกรองคาลมาน สามารถหาค่าได้จากสมการ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(z - H\hat{x}) \quad (2.12)$$

โดยที่ K คือ Kalman Gain และสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$K = PH^T R^{-1} \quad (2.13)$$

สามารถหาค่า P จากวิธี Matrix Riccati Differential Equation

$$\dot{P} = AP + PA^T + GQG^T - KRK^T \quad (2.14)$$

ในการออกแบบตัวกรองคาลมานเพื่อใช้งานนั้นการหาค่าความแปรปรวน Q และ R นั้นทำได้ค่อนข้างยาก ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้การสุ่มหรือประมาณค่าเพื่อให้การประมาณสถานะของสัญญาณเป็นที่ยอมรับได้ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวกรองคาลมานแบบเวลาต่อเนื่องซึ่งเหมาะกับการจำลองสถานการณ์ในโปรแกรม MATLAB ร่วมกับ Simulink มากกว่าแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง สำหรับตัว Kalman Gain นั้นเลือกใช้เป็น Kalman Gain ที่สภาวะคงตัว

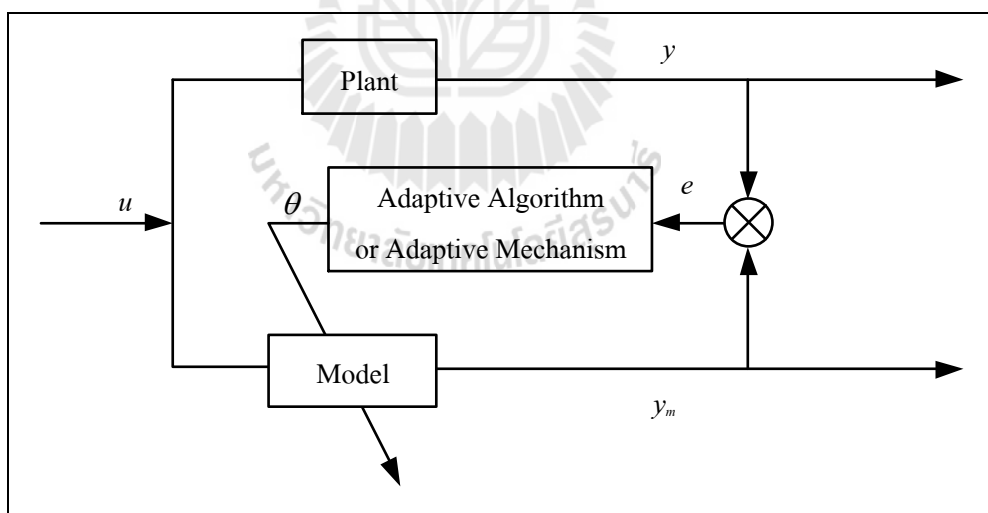
(Steady State Kalman Gain) โดยทำการคำนวณค่า Kalman Gain จากสมการ 2.13 แล้วใช้ค่าคงที่ที่สถานะคงตัวมาใช้ในการประมาณสถานะของระบบในสมการที่ 2.12

2.3 การชดเชยปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง (Model Reference Adaptive System) โดยใช้วิธีการ Gradient Method

การปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง มีหลักในการทำงานคือจะปรับค่าตัวแปรต่างๆ ภายในระบบเพื่อทำให้ความแตกต่างของเอาต์พุตของแบบจำลอง (Model) และระบบที่ต้องการ (Plant) หดไป จากรูปที่ 2.4 ให้เอาต์พุตของแบบจำลองเป็น y_m เอาต์พุตของระบบเป็น y และ e เป็นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสอง (Error) และมีตัวแปรที่ทำการปรับค่า คือ θ

การปรับค่าตัวแปร (θ) เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของแบบจำลองและระบบที่ต้องการหดไป โดยกำหนดให้ Loss Function (J) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.4 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

การปรับค่าของของตัวแปร(θ) กำหนดโดย

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (2.16)$$

$$e = y - y_m \quad (2.17)$$

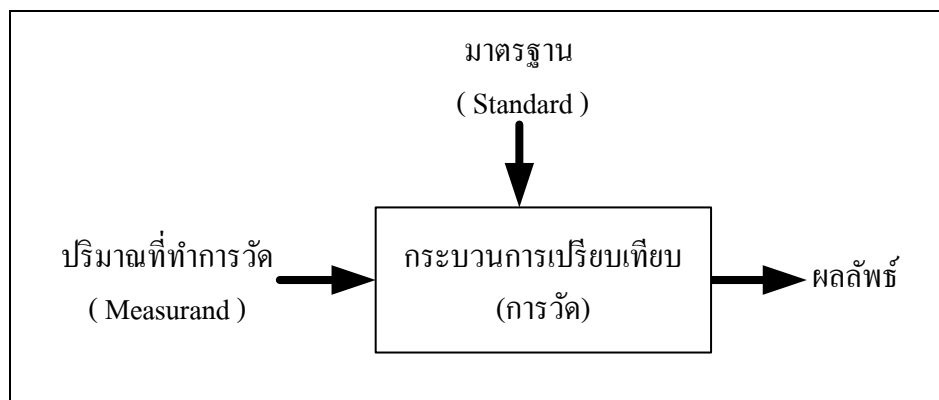
$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{dy_m}{d\theta} \quad (2.18)$$

เมื่อ $-\gamma$ คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

การควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากทฤษฎีของ Gradient Method จะทำการปรับค่าตัวแปรภายในระบบที่สนใจในทิศทาง Negative of Loss Function (J) เพื่อให้ค่าความแตกต่างระหว่างระบบและแบบจำลองหมดไป โดยความเร็วในการปรับตัวจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการปรับตัว ซึ่งค่าอัตราการปรับตัวต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสมเนื่องจากอาจจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

2.4 การสอบเทียบ

ระบบการวัดทุกระบบจะต้องให้ผลการวัดที่มีความน่าเชื่อถือ โดยกระบวนการที่ใช้ในการตรวจสอบสเกลการวัดของระบบเรียกว่า กระบวนการสอบเทียบ คือการให้อินพุตที่ทราบค่าแก่ระบบการวัด เพื่อวัตถุประสงค์ในการสังเกตเอาต์พุตของระบบ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตและเอาต์พุต โดยอินพุตที่ทราบค่าสำหรับกระบวนการสอบเทียบเรียกว่า ค่ามาตรฐาน (Standard)

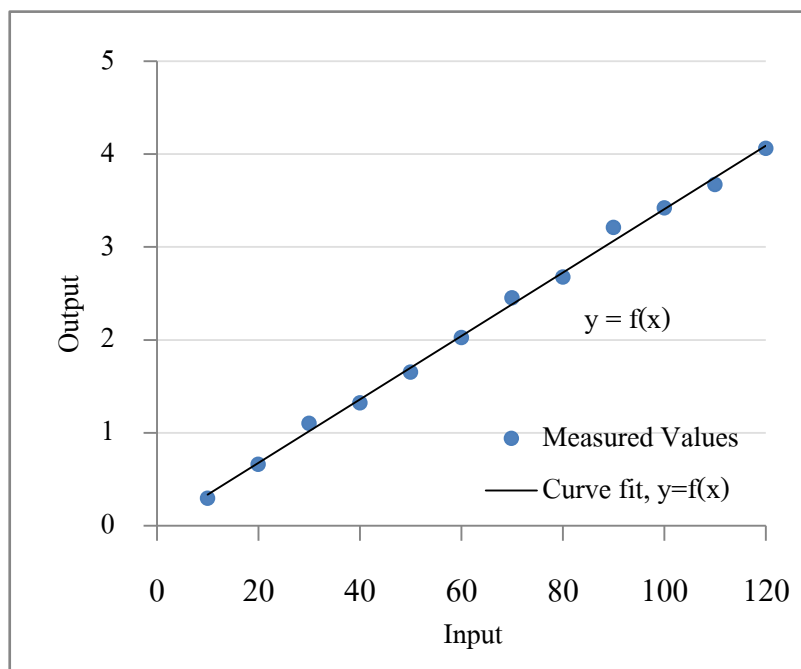


รูปที่ 2.5 กระบวนการวัดพื้นฐาน

2.4.1 การสอบเทียบแบบสถิต

การสอบเทียบแบบสถิต (Static Calibration) เป็นการสอบเทียบพื้นฐานประเภทหนึ่ง ในกระบวนการนี้เป็นการให้อินพุตที่ทราบค่าแน่นอนให้กับระบบที่ทำการสอบเทียบ และเอาต์พุตของระบบจะถูกบันทึก คำว่า “สถิต” หมายถึงวิธีการสอบเทียบที่ค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นค่าคงที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง นั่นคือตัวแปรเหล่านั้นไม่ขึ้นกับเวลา ในการสอบเทียบแบบสถิตนั้นจะมีเพียงขนาดของอินพุตที่ทราบค่าและเอาต์พุตที่วัดได้เท่านั้นที่สำคัญ

จากการให้อินพุตที่ทราบค่าแก่ระบบและสังเกตเอาต์พุตของระบบ กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิตที่แสดงดังรูปที่ 2.6 นั้นเป็นการพล็อตอินพุต (x) บนแกนแนวนอน เปรียบเทียบเอาต์พุตจากการวัด (y) บนแกนแนวตั้ง ค่าอินพุตในการสอบเทียบนั้นโดยปกติแล้วจะเป็นตัวแปรอิสระในขณะที่เอาต์พุตของการวัดเป็นตัวแปรตาม กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิตสามารถใช้ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต สมการความสัมพันธ์จะอยู่ในรูปแบบ $y = f(x)$ ซึ่งหากจากการใช้เทคนิค Curve Fitting เราสามารถนำความสัมพันธ์นี้ไปใช้ในกระบวนการวัดครั้งต่อไป เพื่อหาค่าอินพุตที่ต้องการทราบค่าจากค่าเอาต์พุตของเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.6 กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิต

2.4.2 การสอบเทียบแบบพลวัต

เมื่อตัวแปรที่สนใจมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อหาข้อมูลเหล่านี้เราจึงต้องการข้อมูลทางพลวัต (Dynamic Information) ตัวแปรทางพลวัตเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับเวลาทั้งขนาด (Magnitude) และความถี่ (Frequency) ที่รับได้ กระบวนการสอบเทียบแบบพลวัต (Dynamic Calibration) นี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตที่ทราบพฤติกรรมทางพลวัตและเอาต์พุตของระบบที่ทำการวัด โดยปกติการทำการสอบเทียบแบบพลวัตส่วนใหญ่จะใช้สัญญาณเช่น Sinusoidal หรือ Step ที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณอินพุตให้กับระบบที่ทำการวัด

2.4.3 ความไวของการวัด

ความไวของการวัด (Sensitivity of Measurement) คือการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณที่ต้องการวัดซึ่งเป็นอัตราส่วนของผลลัพธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ ดังนั้นความไวของการวัดคือความชัน (Slope) ของเส้นตรงในรูปที่ 2.6 เมื่อ S_k คือความชันของกราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิต

$$S_k = \frac{dy}{dx} \quad (2.19)$$

เมื่อ S_k เป็นฟังก์ชันของ x ความไวของการวัดถูกวัดให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิติอาจเป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรงก็ได้ขึ้นกับกระบวนการวัดและตัวแปรที่ต้องถูกวัด ดังนั้น S_k อาจเป็นค่าคงตัวหรือไม่เป็นค่าคงตัวตลอดช่วงของค่าอินพุต

2.4.4 ความเป็นเชิงเส้นและความไม่เป็นเชิงเส้น

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity and Non-linearity) หมายถึงการที่ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอินพุตของปริมาณที่ต้องการวัด เช่น เมื่อปริมาณอินพุตเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ค่าเอาต์พุตของเครื่องวัดจะเปลี่ยนไป 1 หน่วย หรือเมื่อค่าอินพุตของการวัดเปลี่ยนไป 2 หน่วย ค่าเอาต์พุตที่ได้จากเครื่องวัดจะเปลี่ยนไป 2 หน่วยเป็นต้น ซึ่งความเป็นเชิงเส้นเป็นคุณสมบัติการวัดที่ต้องการ จากรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปมักใช้การลากเส้นตรงผ่านจุดข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณในแกนตั้งและแกนนอนให้มากที่สุด โดยใช้เทคนิคทางสถิติ ส่วนความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) จะหมายถึงจุดข้อมูลที่เบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงมากที่สุด โดยค่าความไม่เป็นเชิงเส้นนี้มักแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล

2.4.5 ความเที่ยงตรง ความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำ

ความเที่ยงตรง (Precision) เป็นค่าที่ใช้อธิบายของศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom) ของเครื่องวัดจากความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) โดยความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดจะพิจารณาจากขนาดของความแปรผันที่เกิดขึ้นจากการวัดวัตถุชิ้นเดียวกันหลายครั้ง โดยใช้ผู้วัด วิธีวัด เครื่องวัดชุดเดียวกัน ถ้าได้ค่าใกล้เคียงกันโดยไม่คำนึงว่าค่านั้นเป็นค่าที่ถูกต้องหรือไม่ แสดงว่าขนาดของความแปรผันในการวัดซ้ำเกิดขึ้นน้อยหรือระบบการวัดมีความเที่ยงตรงสูง

ความเที่ยงตรงนี้มักใช้สับสนกันกับความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องวัด เครื่องวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงอาจไม่ใช่เครื่องวัดที่มีความถูกต้องสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าเครื่องวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงอาจมีความถูกต้องต่ำได้ ซึ่งการวัดที่มีความถูกต้องต่ำจากเครื่องวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงมักเกิดจากความเอนเอียงของการวัด ซึ่งสามารถลดหรือกำจัดได้โดยการสอบเทียบใหม่

ความสามารถของการวัดซ้ำ (Repeatability) หมายถึงความสามารถของเครื่องวัดที่จะสามารถให้ค่าเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกันเมื่อวัดซ้ำหลายครั้งภายใต้เงื่อนไขการวัดเดียวกันหรือค่าความแปรปรวนของของผลการวัดเมื่อใช้ผู้วัด วิธีการวัด สถานการณ์ และสถานที่วัดเดียวกัน

ความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) คือความสามารถของเครื่องวัดในการให้ผลการวัดสิ่งเดียวกันที่มีความใกล้เคียงกัน เมื่อเปลี่ยนวิธีวัด ผู้วัด เครื่องวัด สถานที่ สถานการณ์และเวลาที่ทำการวัด

ความสามารถในการวัดซ้ำและความสามารถในการทำซ้ำเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้แสดงความเที่ยงตรงของการวัด ซึ่งใช้อธิบายการกระจายของผลการวัดสิ่งเดียวกัน โดยหากทำการวัดภายใต้สภาวะเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จะแสดงการกระจายของผลลัพธ์ในการวัดซ้ำ แต่หากการวัดกระทำภายใต้สภาวะต่างกันข้อมูลที่ได้จะแสดงการกระจายของผลลัพธ์ในการทำซ้ำ รูปที่ 2.7 แสดงผลการยิงปืนของผู้ยิงสามคน โดยมีเป้าหมายของการยิงอยู่ที่ศูนย์กลางของวงกลม จุดดำแต่ละจุดแสดงจุดที่ผู้ยิงแต่ละคนยิงโดนเป้า จากรูปจะเห็นว่าผู้ยิงคนที่ 1 (a) มีความถูกต้องและความเที่ยงตรงของการยิงต่ำ ในขณะที่ผู้ยิงคนที่ 2 (b) สามารถยิงโดนเป้าในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน แต่เป็นตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง ผลการยิงของผู้ยิงคนที่ 2 จึงถือได้ว่ามีความเที่ยงตรงสูงแต่มีความถูกต้องต่ำ ส่วนผู้ยิงคนที่ 3 (c) จะมีความถูกต้องและเที่ยงตรงสูงเพราะสามารถยิงตรงจุดที่ถูกต้องอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบความเที่ยงตรงและความถูกต้องของผลลัพธ์

2.4.6 ย่านวัดหรือช่วงการวัด

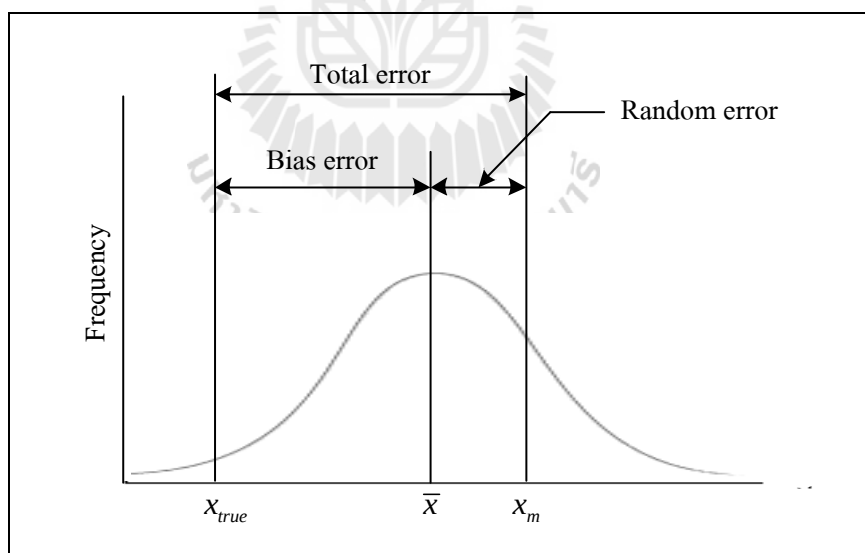
ย่านวัดหรือช่วงการวัด (Range or Span) ของเครื่องวัดใช้ระบุค่าต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องวัดได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้งาน

2.4.7 ความละเอียดของการวัด

ความละเอียดของการวัด (Resolution) คือ จีดจำกัดล่าง (Lower Limit) ของขนาดอินพุตที่เปลี่ยนแปลงหรือขนาดของอินพุตที่น้อยที่สุดที่เปลี่ยนแปลงแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต ซึ่งการระบุความละเอียดของการวัดอาจแสดงด้วยค่าสัมบูรณ์หรือเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนของค่าเต็มสเกลได้

2.4.8 ความผิดพลาดและความไม่แน่นอน

ความผิดพลาดในการวัดเป็นความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้ (Measured Value) และค่าที่แท้จริงที่ควรจะเป็น (True Value) ความผิดพลาดพื้นฐานที่เกิดขึ้นในการวัดมี 2 ชนิด คือ ความผิดพลาดระบบ (Systematic, or Bias Error) และความผิดพลาดความเที่ยงหรือความผิดพลาดแบบสุ่ม (Precision, or Random Error) ในกระบวนการวัดจริง เราไม่รู้ค่าที่ถูกต้องนั่นคือเราไม่ทราบค่าความผิดพลาด จึงมีการประมาณค่าของเขตของความผิดพลาด โดยขอบเขตนั้นเราเรียกว่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ซึ่งความผิดพลาดจะมีขนาดไม่เกินความไม่แน่นอน



รูปที่ 2.8 ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่มและความผิดพลาดทั้งหมด

ความไม่แน่นอนของการวัด เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลการวัด ซึ่งบอกลักษณะการกระจายของค่าที่วัดได้และสามารถบอกค่าของสิ่งที่ถูกวัดอย่างสมเหตุสมผล ความไม่แน่นอนของการวัดประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบบางอย่างอาจประเมินได้จากการแจกแจงทางสถิติของผลลัพธ์ของอนุกรมการวัดและสามารถบอกลักษณะได้ด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง องค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งสามารถบอกลักษณะได้โดยการประเมินจากการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีพื้นฐานจากความชำนาญหรือข้อมูลอื่น ๆ

จากการวิเคราะห์ทางสถิติของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดและการวิเคราะห์แหล่งของความผิดพลาดที่มีอิทธิพลต่อค่าจากการวัด เราสามารถประมาณค่า $\bar{x}$ ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนข้อมูลที่ได้มาจากการวัดค่า x ซ้ำ ๆ ได้ดังสมการ

$$x' = \bar{x} \pm u_x \quad (P\%) \quad (2.20)$$

เมื่อ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยที่แทนการประมาณค่า x' ที่เป็นไปได้มากที่สุดบนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้ และ u_x คือความไม่แน่นอนในการประมาณค่าที่ระดับความเป็นไปได้ $P\%$ ช่วงของความเชื่อมั่นหรือความไม่แน่นอนอยู่บนพื้นฐานของความผิดพลาดแบบสุ่มและความผิดพลาดระบบในการวัดค่า x

ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องระบุสาเหตุหรือแหล่งของความไม่แน่นอนในการวัด จากนั้นจึงประเมินขนาดของความไม่แน่นอนของแต่ละแหล่ง โดยแยกจากกัน แล้วจึงนำทั้งหมดมารวมกัน การประเมินความไม่แน่นอนนี้มี 2 แนวทางคือ Type A และ Type B

- การประเมินแบบ A (Type A Evaluation) เป็นการประเมินความไม่แน่นอนโดยใช้เทคนิคสถิติ สูตรที่ใช้ในการคำนวณของ Type A คือ

$$\mu = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.21)$$

เมื่อ	μ	คือ ค่าความไม่แน่นอน
	s	คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	n	คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

- การประเมินแบบ B (Type B Evaluation) เป็นการประเมินความไม่แน่นอนจากข้อมูลข่าวสารอย่างอื่นที่อาจประกอบด้วยประสบการณ์ในอดีตของการวัด จากใบรับรองการสอบเทียบจากข้อกำหนดของผู้ผลิต จากการคำนวณจากสิ่งพิมพ์ต่าง ๆ และจากสามัญสำนึกสมการที่ใช้ในการคำนวณของ Type B คือ

$$p = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.22)$$

เมื่อ p คือ ค่าความไม่แน่นอน
 a คือ ครึ่งหนึ่งของค่าความไม่แน่นอนที่ระบุมากับเครื่องมือ

2.5 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ กลไกหรืออากาศยานนั้น ความถูกต้องของสัญญาณที่วัดได้เป็นเรื่องที่สำคัญ ทำให้กระบวนการสอบเทียบสัญญาณและเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณจากเซนเซอร์ที่ใช้เป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก ปัญหาของไจโรสโคปราคาถูกที่เลือกใช้ในงานวิจัยคือมีสัญญาณรบกวนและมีค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณที่ขึ้นกับอุณหภูมิการใช้งาน จึงเป็นที่มาของงานวิจัยการสอบเทียบไจโรสโคปราคาถูกแบบอัตโนมัติเพื่อปรับปรุงสัญญาณและประมาณค่าเบี่ยงเบนและพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการใช้งาน

Leavitt, Sideris, and Bobrow (2006) นำเสนอเทคนิคการวัดความเอียงย่านการวัดสูงโดยใช้เซนเซอร์ราคาถูก เซนเซอร์ที่ใช้ได้แก่ 1. Inclinator ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดความเอียงซึ่งมีความหวังด้านพลศาสตร์และตอบสนองการเปลี่ยนแปลงในช่วงความถี่ที่จำกัด 2. ไจโรสโคปราคาถูกซึ่งมีค่าความเบี่ยงเบนและสัญญาณรบกวนและ 3. เซนเซอร์ความเร่ง (Accelerometer) ซึ่งมีการตอบสนองไวทำให้มีสัญญาณรบกวนมาก การประมาณค่ามุมเอียงใช้หลักการของคาลมานฟิลเตอร์ในการรวบรวมสัญญาณของตัวตรวจรู้โดยทำการทดสอบในช่วงความถี่ 0.2-5 Hz ผลจากการประมาณค่ามุมเอียงมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเอ็นโค้ดเดอร์ และสามารถประมาณได้ทุกช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ

Lim, Goh, Dong, Nguyen, Chen, Yeo, Duh, and Kim (2008) ศึกษาการบอกตำแหน่งของแขนกล 2 ข้อต่อ โดยใช้ Linear encoder ร่วมกับ IMU (Inertia Measurement Unit) ซึ่งประกอบด้วยเซนเซอร์ความเร่ง เข็มทิศแม่เหล็ก (Magnetic compass) และไจโรสโคป การรวมสัญญาณเพื่อใช้

ในการบอกตำแหน่งของแขนกลโดยวิธีนี้คือใช้ Linear encoder ร่วมกับ IMU นั้นสามารถบอกทั้งตำแหน่งเชิงมุมและตำแหน่งเชิงเส้นได้อย่างแม่นยำ

Lai, Jan, and Hsiao (2010) นำเสนออุปกรณ์สอบเทียบเครื่องมือวัดในการประมาณค่ามุมเอียงทั้ง 3 แนวแกน โดยเซนเซอร์ราคาถูกที่ใช้ได้แก่ ตัวตรวจรู้ความเร่ง ไจโรสโคปและเข็มทิศดิจิทัล (Digital Compass) การสอบเทียบเซนเซอร์แต่ละตัวใช้หลักการ Least Square Method จากนั้นจึงรวมสัญญาณของเซนเซอร์เพื่อประมาณตำแหน่ง ผลการทดสอบพบว่าสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์แต่ละตัวและสามารถประมาณค่ามุมเอียงได้อย่างถูกต้อง โดยโครงสร้างของอุปกรณ์สอบเทียบเครื่องมือวัดในงานวิจัยนี้ได้เป็นต้นแบบในการพัฒนาเครื่องสอบเทียบอัตโนมัติของไจโรสโคปราคาถูกแบบ 2 แกนของงานวิจัยนี้

Nebot and Durrant-Whyte (1999) นำเสนอการสอบเทียบ IMU ราคาถูกสำหรับการประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่งของรถยนต์ใน 2 มิติ โดยเมื่อทำการสอบเทียบเพื่อหาค่าเบี่ยงเบนของค่าจาก IMU แล้วทำการประมาณค่าตำแหน่งของรถยนต์เทียบกับผลที่ได้จาก GPS

Wang, Hao, and Wang (2011) นำเสนอการสอบเทียบ IMU ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและราคาถูก IMU จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สำคัญคือ ค่าเบี่ยงเบน (Bias) ค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) และค่า Misalignment Error งานวิจัยนี้ทำการสอบเทียบโดยใช้ตัวกรองคาลมานในการประมาณค่าพารามิเตอร์และลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

2.6 สรุป

จากงานวิจัยที่กล่าวมานั้นกระบวนการสอบเทียบสัญญาณและเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณเป็นประโยชน์อย่างมากต่องานวิจัยการสอบเทียบไจโรสโคปราคาถูกแบบอัตโนมัติ ซึ่งปัญหาของไจโรสโคปราคาถูกที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นคือสัญญาณรบกวนและค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณที่ขึ้นกับอุณหภูมิการใช้งาน ในงานวิจัยเลือกใช้ตัวกรองคาลมานร่วมกับตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ เพื่อใช้ในกระบวนการสอบเทียบไจโรสโคปและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานไจโรสโคปราคาถูก

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สัญญาณไจโรสโคปราคาถูกเป็นสัญญาณที่ประกอบด้วย ค่าเบี่ยงเบน ค่าสเกลลิ่งแฟคเตอร์ และสัญญาณรบกวน ซึ่งค่าเบี่ยงเบนสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิใช้งานทำให้การประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงและการลดสัญญาณรบกวนเป็นสิ่งจำเป็นที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานไจโรสโคปราคาถูกให้มากขึ้น ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของไจโรสโคปเริ่มจากการหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณไจโรสโคปเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบ Kalman Gain ที่เหมาะสมสำหรับกรองสัญญาณรบกวนและใช้ในการออกแบบโครงสร้างของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณไจโรสโคป

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ไจโรสโคปชนิดที่ส่งสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณแบบ Analog สัญญาณไจโรสโคปที่อ่านค่ามาได้นั้นประกอบไปด้วย ความเร็วเชิงมุมจริงของวัตถุ (Actual Angular Velocities) ค่าเบี่ยงเบน ค่าสเกลลิ่งแฟคเตอร์ รวมทั้งสัญญาณรบกวนในการวัด โดยปกติอุปกรณ์การวัดอิเล็กทรอนิกส์มักจะมีข้อมูลพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการใช้งานระบุมาในคู่มือการใช้งาน สำหรับไจโรสโคปราคาถูกก็เช่นเดียวกัน ผู้ผลิตได้แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นไว้ในคู่มือการใช้งาน แต่ในการใช้งานจริงพารามิเตอร์บางตัวนั้นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิการใช้งาน อีกทั้งสัญญาณรบกวนต่างๆ ก็ส่งผลให้พารามิเตอร์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากข้อมูลที่ผู้ผลิตกำหนด ทำให้การลดสัญญาณรบกวนในสัญญาณที่วัดได้และการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการใช้งานไจโรสโคปราคาถูกสัญญาณจากไจโรสโคปราคาถูกสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\omega_g = \frac{1}{\alpha}(\dot{\theta} + \delta) + v_g \quad (3.1)$$

เมื่อ	$\dot{\theta}$	คือ ความเร็วเชิงมุมจริงของวัตถุ
	ω_g	คือ Measured Angular Velocity
	δ	คือ ค่าเบี่ยงเบน
	α	คือ ค่าสเกลลิงแฟกเตอร์
	v_g	คือ สัญญาณรบกวนในการวัด (Gyro Measurement Noise)

ค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณไจโรสโคป โดยปกติจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้งาน ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงได้สมมติให้อุณหภูมิที่ใช้งานมีค่าคงที่ แบบจำลองของค่าเบี่ยงเบนของไจโรสโคปปรากฏแสดงดังสมการ

$$\dot{\delta} = 0 \quad (3.2)$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนในรูปปริภูมิสแตต (State Space Model) ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta} \right\} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b \\ v_g \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$z = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_g \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ปริภูมิสแตตของสัญญาณไจโรสโคปปรากฏที่แสดงดังสมการ 3.3 และ 3.4 จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวกรองคาลมานเพื่อการประมาณสถานะที่ดีที่สุดของระบบภายใต้สัญญาณรบกวน และใช้ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสัญญาณไจโรสโคปปรากฏด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Gradient Method

3.2 ตัวกรองคาลมาน

ในกระบวนการวัดสัญญาณไจโรสโคปนั้นจะมีความผิดเพี้ยนโดยการรบกวนของสัญญาณต่างๆที่เราไม่ต้องการหรือที่เรียกว่า สัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนมีหลายชนิดซึ่งต่างส่งผลให้สัญญาณไจโรสโคปมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวกรองคาลมานสำหรับการลดสัญญาณรบกวนนั้น

จากสมการ 3.1 กำหนดให้ $\hat{\omega}_g$ คือสถานะของระบบที่ประมาณได้จากตัวกรองคาลมานและจากสมการ 2.12 จะได้ว่า

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$H = [0 \quad 1] \quad (3.8)$$

ดังนั้นปริภูมิสถานะสำหรับคาลมานฟิลเตอร์คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\delta}} \\ \dot{\hat{\omega}}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta} \\ \hat{\omega}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} [\theta_g - \hat{\theta}_g] \quad (3.9)$$

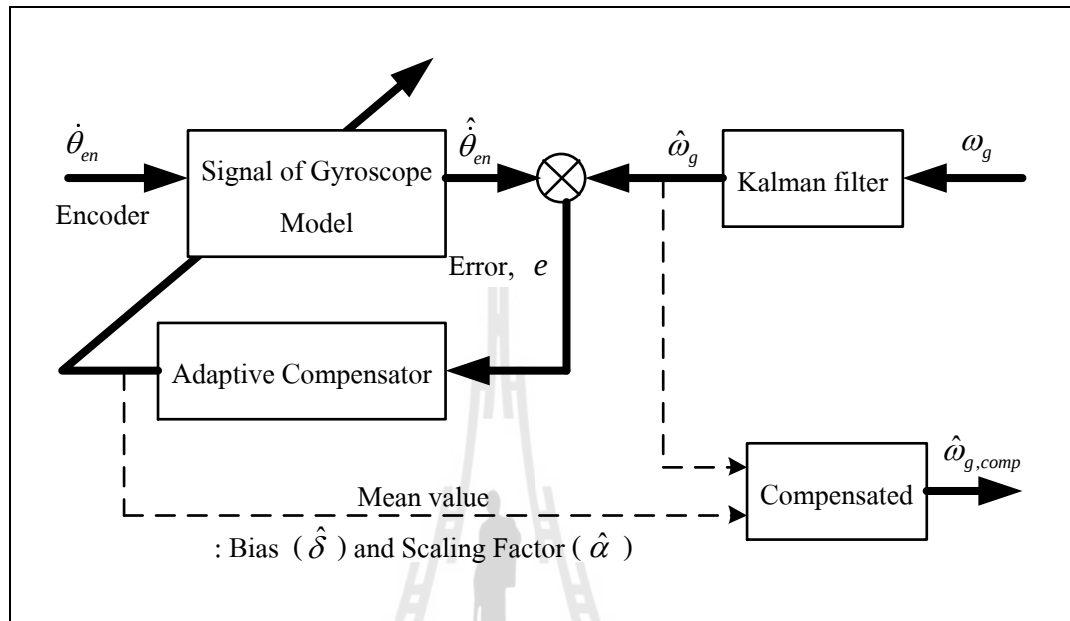
โดย K_1 และ K_2 คือ Kalman Gain ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ 2.13 และ 2.14

3.3 การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยใช้วิธี

Gradient Method

ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณจากใจโรสโคปนั้น วิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือการใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยวิธีการของ Gradient Method และเงื่อนไขในการปรับค่าพารามิเตอร์ในหลักการการชดเชยจะใช้ค่าของความแตกต่างระหว่างความเร็วเชิงมุมของใจโรสโคปที่ผ่านตัวกรองคาลมานกับสัญญาณความเร็วเชิงมุมของเอ็นโค้ดเดอร์ กำหนดให้สัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์เป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ โดยปกติตัวชดเชยแบบปรับตัวได้นั้นจะชดเชยให้กับระบบที่ทำการประมาณค่าเพื่อให้มีความแตกต่าง

จากระบบอ้างอิงน้อยที่สุด แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การชดเชยให้กับสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ ซึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อให้มีความแตกต่างจากสัญญาณของไจโรสโคปน้อยที่สุด



รูปที่ 3.1 การทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

สัญญาณจากไจโรสโคปราคาถูกที่ผ่านตัวกรองกาลมาน สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$\hat{\omega}_g = \frac{1}{\alpha}(\dot{\theta} + \delta) \quad (3.10)$$

การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยมีสัญญาณจากไจโรสโคปราคาถูกที่ผ่านตัวกรองกาลมาน เป็นสัญญาณอ้างอิง สัญญาณความเร็วเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์ ($\dot{\theta}_{en}$) สำหรับใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.11)

$$\hat{\theta}_{en} = \hat{\alpha}\dot{\theta}_{en} + \hat{\delta} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ (3.11) พารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ $\hat{\alpha}$ และ $\hat{\sigma}$ ดังนั้นเพื่อให้ค่าความผิดพลาดของสัญญาณจากสมการที่ (3.10) ละ (3.11) หดไป จึงใช้หลักการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับค่าคือ การปรับค่าตัวแปร $\hat{\alpha}$ และ $\hat{\sigma}$ ให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหดไปโดยกำหนดให้ Loss Function ($J(\hat{\alpha}, \hat{\sigma})$) มีค่า

$$J(\hat{\alpha}, \hat{\sigma}) = \frac{1}{2} e^2 \quad (3.12)$$

เมื่อ $e = \hat{\omega}_g - \hat{\theta}_{en}$ พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{\alpha}$) ในทิศทาง Negative Gradient of Loss Function (J) คือ

$$\frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial t} = -\gamma_1 \frac{\partial J}{\partial \hat{\alpha}} = -\gamma_1 e \frac{\partial e}{\partial \hat{\alpha}} \quad (3.13)$$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial e}{\partial \hat{\alpha}} = -\frac{\partial \hat{\theta}_{en}}{\partial \hat{\alpha}} \quad (3.14)$$

โดยที่ γ_1 คือ อัตราการปรับตัวและกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$v = \frac{\partial \hat{\theta}_{en}}{\partial \hat{\alpha}} = \dot{\theta}_{en} \quad (3.15)$$

เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{\alpha}$) ที่มีความสัมพันธ์กับ Sensitivity Function จะนำสมการที่ (3.15) แทนในสมการที่ (3.14) จะได้

$$\frac{\partial e}{\partial \hat{\alpha}} = -v \quad (3.16)$$

แทนค่าสมการที่ (3.16) ในสมการที่ (3.13) จะได้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{\alpha}$) ที่มีความสัมพันธ์กับ Sensitivity Function

$$\frac{\partial \hat{\alpha}}{\partial t} = +\gamma_1 e v \quad (3.17)$$

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{\delta}$) ในทิศทาง Negative Gradient of Loss Function (J) คือ

$$\frac{\partial \hat{\delta}}{\partial t} = -\gamma_2 \frac{\partial J}{\partial \hat{\delta}} = -\gamma_2 e \frac{\partial e}{\partial \hat{\delta}} \quad (3.18)$$

จาก MIT Rule จะได้ตัวแปรปรับค่า คือ

$$\frac{\partial e}{\partial \hat{\delta}} = -\frac{\partial \hat{\theta}_{en}}{\partial \hat{\delta}} \quad (3.19)$$

โดยที่ γ_2 คือ อัตราการปรับตัวและกำหนดให้ Sensitivity Function เท่ากับ

$$w = \frac{\partial \hat{\theta}_{en}}{\partial \hat{\delta}} = 1 \quad (3.20)$$

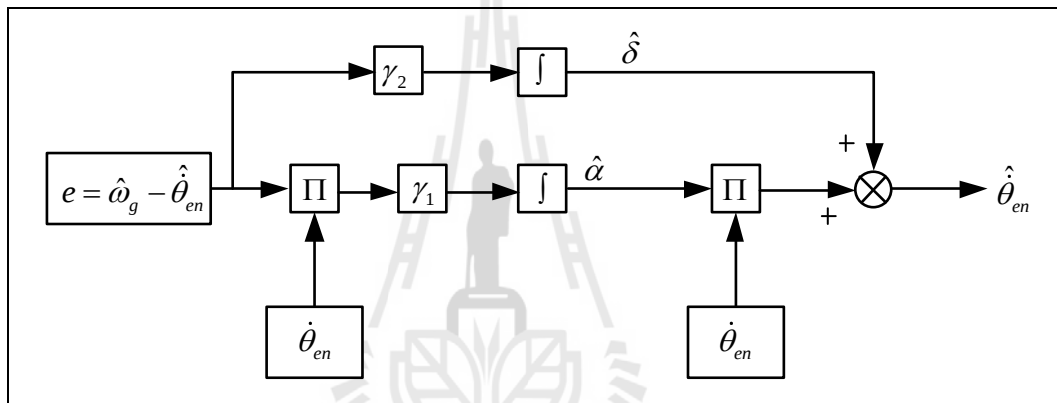
เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{\delta}$) ที่มีความสัมพันธ์กับ Sensitivity Function จะนำสมการที่ (3.20) แทนในสมการที่ (3.19) จะได้

$$\frac{\partial e}{\partial \hat{\delta}} = -w \quad (3.21)$$

แทนค่าสมการที่ (3.21) ในสมการที่ (3.18) จะได้การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร ($\hat{\delta}$) ที่มีความสัมพันธ์กับ Sensitivity Function

$$\frac{\partial \hat{\delta}}{\partial t} = +\gamma_2 ew \quad (3.22)$$

จากสมการ (3.11) (3.17) และสมการ (3.22) สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพบล็อกการทำงานการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ ได้ดังรูปที่ 3.2



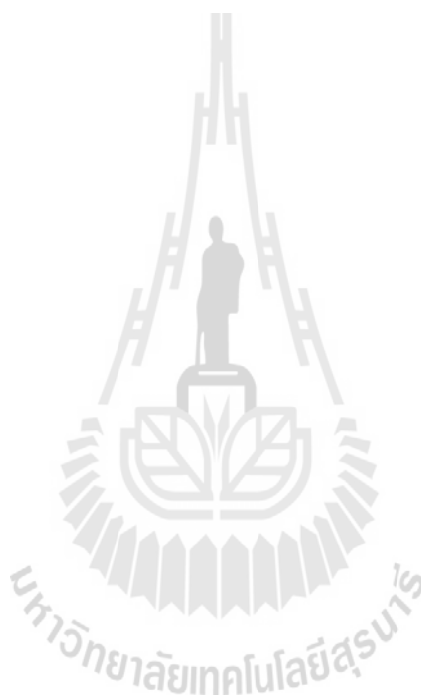
รูปที่ 3.2 แผนภาพบล็อกของการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยวิธี Gradient Method

ผลจากการประมาณค่าพารามิเตอร์คือ ค่าเบี่ยงเบน ($\hat{\delta}$) และค่าสเกลลิงเฟลเตอร์ ($\hat{\alpha}$) ซึ่งจะชดเชยให้กับสัญญาณที่ผ่านจากตัวกรองคาลมานเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความถูกต้องเมื่อเทียบกับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ กำหนดให้ $\hat{\omega}_{g,comp}$ ก็คือสัญญาณที่ได้จากการชดเชยสมการในการชดเชยคือ

$$\hat{\omega}_{g,comp} = \frac{1}{\hat{\alpha}}(\hat{\omega}_g - \hat{\delta}) \quad (3.23)$$

3.4 สรุป

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณใจโรสโคปประกอบไปด้วยสัญญาณการเคลื่อนที่จริง ค่าเบี่ยงเบน สเกลลิงแฟกเตอร์และสัญญาณรบกวน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวกรองคาลมาน ซึ่งเป็นตัวสังเกตแบบเหมาะสมที่สุดที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการได้ในการลดสัญญาณรบกวนจากสัญญาณใจโรสโคป เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้โดยใช้วิธี Gradient Method โดยพารามิเตอร์ที่ประมาณค่าได้จะนำไปชดเชยให้กับสัญญาณใจโรสโคปและใช้ในกระบวนการสอบเทียบใจโรสโคปแบบอัตโนมัติต่อไป



บทที่ 4

เครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปและผลการจำลองสถานการณ์

ในการสอบเทียบ เครื่องมือสอบเทียบนับเป็นส่วนสำคัญของการสอบเทียบ โดยเครื่องมือสอบเทียบที่ใช้จะต้องได้มาตรฐาน สำหรับเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปเป็นเครื่องมือที่สามารถหมุนได้ในแต่ละแนวแกน สามารถแสดงค่าความเร่งเชิงมุม ความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมในแต่ละแนวแกนเพื่อเปรียบเทียบกับตัวเซ็นเซอร์ที่นำมาสอบเทียบ รวมทั้งมีตำแหน่งการติดตั้งเซ็นเซอร์ที่ถูกต้องและเหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปซึ่งสามารถสอบเทียบได้ 2 แนวแกนคือ แกน x และแกน z โดยใช้มอเตอร์ที่มีเอ็นโค้ดเดอร์และมีการควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี (PD Controller) หมุนเซ็นเซอร์ในแต่ละแนวแกนและได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ที่ทำงานร่วมกับตัวกรองคาลมาน โดยเลือกใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในการจำลองสถานการณ์การทำงานเพื่อดูผลและประสิทธิภาพการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ และตัวกรองคาลมานก่อนนำไปใช้ในการใช้งานจริง การออกแบบและสร้างเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกนสำหรับใช้ในกระบวนการสอบเทียบไจโรสโคปราคาถูก มีหลักการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ หลักการทำงานและขั้นตอนการสอบเทียบดังนี้

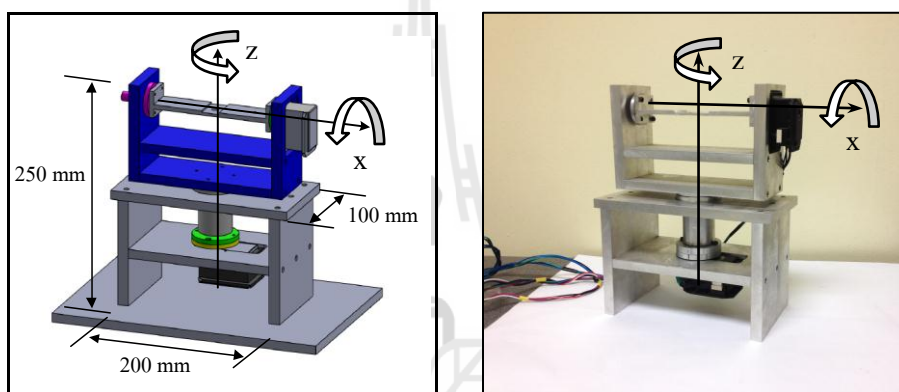
4.1 เครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกน

ไจโรสโคปเป็นเครื่องมือวัดความเร็วเชิงมุม โดยให้เอาต์พุตเป็นแรงดันไฟฟ้าที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมที่กระทำกับตัวไจโรสโคป ในการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป จึงออกแบบเป็นอุปกรณ์ที่มีแกนหมุนได้ 2 แกนและใช้มอเตอร์ที่มีเอ็นโค้ดเดอร์และมีการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีเป็นอุปกรณ์หมุนแต่ละแนวแกน โดยมีรายละเอียดของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกนดังนี้

4.1.1 โครงสร้างเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป

โครงสร้างของเครื่องทั้งฐานล่างและแกนหมุนด้านบนใช้วัสดุอะลูมิเนียมเกรด 4043 ในการขึ้นรูปทั้งหมดเพราะหาซื้อได้ทั่วไป สามารถขึ้นรูปได้ง่ายและมีน้ำหนักเบา แกนหมุนของเครื่องสอบเทียบมี 2 แกนคือแกน x และแกน z แสดงดังรูปที่ 4.1 ด้านหนึ่งของแกน x ประกอบกับเซอร์โวมอเตอร์ RX-28 อีกด้านหนึ่งเป็นลูกปืนรองรับ มอเตอร์ในแกน x รับน้ำหนักแค่เพียง

เล็กน้อยคือน้ำหนักแผ่นอะลูมิเนียมสำหรับติดตั้งเซนเซอร์ไจโรสโคปในการสอบเทียบสำหรับแกน z หากออกแบบให้มอเตอร์ต่อกับโครงสร้างโดยตรงจะทำให้มอเตอร์ต้องรับโหลดเป็นน้ำหนักของโครงสร้างด้านบนทั้งหมด ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการทำงานและการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ได้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เฟลาเชื่อมระหว่างมอเตอร์ไปยังโครงสร้างด้านบนโดยเฟลาร้อยผ่านบุชที่มีลูกปืนทั้งบนและล่าง น้ำหนักโครงสร้างวางอยู่บนลูกปืนตัวบนทำให้สามารถลดน้ำหนักที่กดทับมอเตอร์และสามารถออกแบบโครงสร้างด้านบนให้มีความแข็งแรงได้ระนาบและไม่โยกคลอนโดยที่ไม่ต้องกังวลกับน้ำหนักที่กระทำกับมอเตอร์มากนัก ในแกน z นี้ใช้เซอร์โวมอเตอร์ RX-64



รูปที่ 4.1 เครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป

ตารางที่ 4.1 ตารางพารามิเตอร์ของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกน

Parameter	Value
Platform Dimensions	100 x 200 x 250 mm ³
Degrees of Freedom	2
Resolution of Angular Position Feedback	0.29 degree
Maximum Rate of Motor (x)	480 degree/s
Maximum Rate of Motor (z)	320 degree/s
Range of Angular Position Feedback (x)	± 150 degree
Range of Angular Position Feedback (z)	± 150 degree
Test Section Area	300 x 300 mm ²

4.1.2 ส่วนประกอบของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปและการควบคุมการทำงาน

เครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกนประกอบด้วยอุปกรณ์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

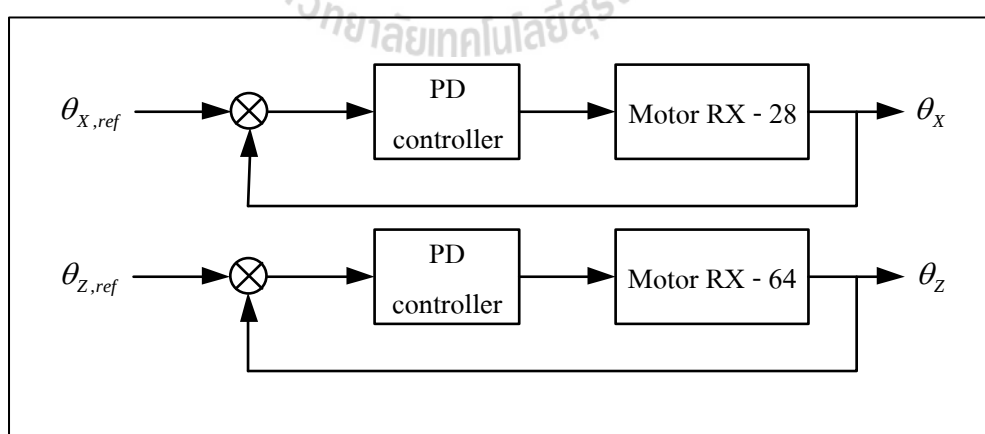
1. เซอร์โวมอเตอร์ RX-28 เป็นมอเตอร์ที่ใช้ในการหมุนแกน x ของเครื่องมือสอบเทียบ มีความเร็วเชิงมุมมากที่สุด 480 degree/s ตำแหน่งเชิงมุมที่สามารถเคลื่อนที่ได้อยู่ในช่วง ± 150 degree ควบคุมการทำงานผ่านทางพอร์ต RS-485

2. เซอร์โวมอเตอร์ RX-64 เป็นมอเตอร์ที่ใช้ในการหมุนแกน z ของเครื่องมือสอบเทียบ มีความเร็วเชิงมุมมากที่สุด 320 degree/s ตำแหน่งเชิงมุมที่สามารถเคลื่อนที่ได้อยู่ในช่วง ± 150 degree ควบคุมการทำงานผ่านทางพอร์ต RS-485

3. USB-RS-485 adapter เป็นอุปกรณ์สำหรับแปลงจากพอร์ต USB ของเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นพอร์ต RS-485 เพื่อใช้ควบคุมมอเตอร์ RX-28 และ RX-64

4. Data Acquisition (DAQ) NI USB-6008 เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อกับโปรแกรม LabVIEW สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงและรับสัญญาณจากไจโรสโคป

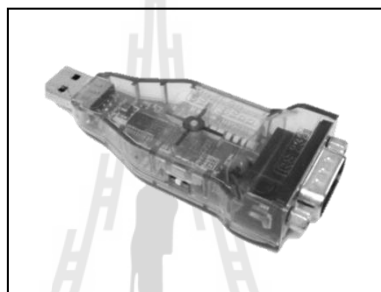
มอเตอร์ RX-28 และ RX-64 ที่เลือกใช้เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยชุดเกียร์ บอร์ดคอนโทรลเลอร์ ตัวไดฟ์เวอร์และการเชื่อมต่อแบบ Daisy Chain ซึ่งเป็นวิธีสำหรับใช้เชื่อมต่อมอเตอร์หลายตัวพร้อมกัน โดยส่วนประกอบเหล่านี้รวมอยู่ในแพ็คเกจเดียวกัน โครงสร้างภายนอกเป็นพลาสติกที่ทนต่อแรงกระแทกจากภายนอก การควบคุมการทำงานของมอเตอร์มีการควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี โดยมีค่าป้อนกลับเป็นค่าจากเอ็นโค้ดเดอร์ชนิด Potentiometer



รูปที่ 4.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี

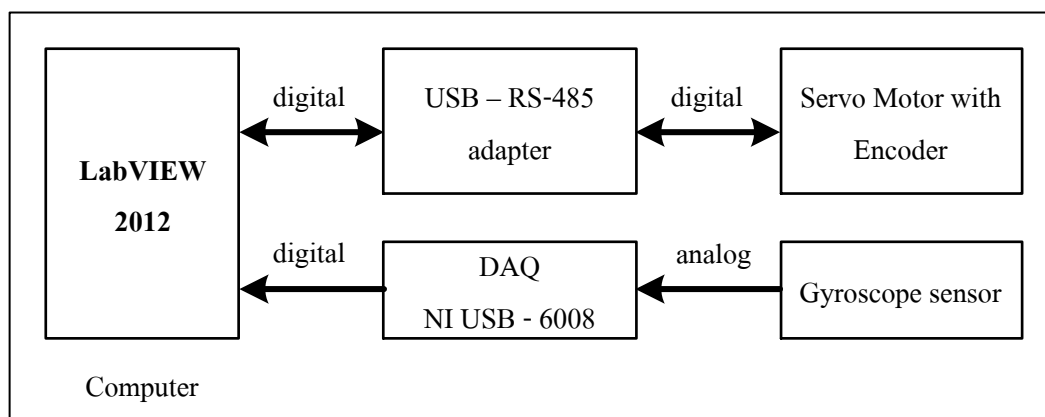


รูปที่ 4.3 มอเตอร์ RX-28 และ RX-64



รูปที่ 4.4 USB-RS-485 adapter

เครื่องมือสอบเทียบโรสโคป 2 แกนควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่ใช้ควบคุมคือ LabVIEW โดยมี Toolkits ที่จำเป็นต้องติดตั้งเพิ่มเติมสำหรับใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ทั้งสองตัวซึ่งมีขั้นตอนการติดตั้งแสดงในภาคผนวก ข.2 การทำงานของระบบจะถูกควบคุมโดยสัญญาณที่เป็น Digital Signal จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่านไปยังมอเตอร์ที่มีบอร์ดคอนโทรลเลอร์และตัวไคฟ์เวอร์อยู่ในตัว ซึ่งจะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่กำหนดและส่งค่าตำแหน่งเชิงมุมที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์เป็นสัญญาณ Digital Signal กลับมายังโปรแกรมควบคุม เมื่อมอเตอร์หมุนในแต่ละแนวแกน เซนเซอร์โรสโคปที่ติดตั้งจะส่งสัญญาณออกมาในรูปของค่าสัญญาณความต่างศักย์ (Voltage) ที่เป็น Analog Signal จะถูกส่งต่อไปยัง DAQ NI USB-6008 เพื่อทำการแปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital แล้วส่งกลับไปประมวลผลในโปรแกรมควบคุมการทำงานต่อไป

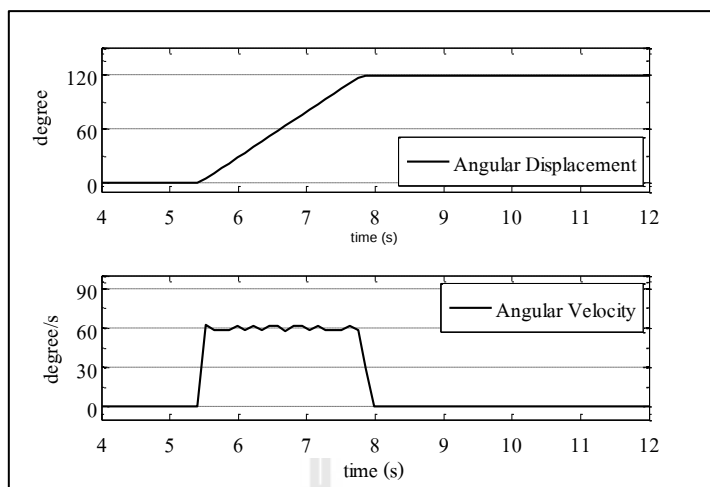


รูปที่ 4.5 การควบคุมการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป

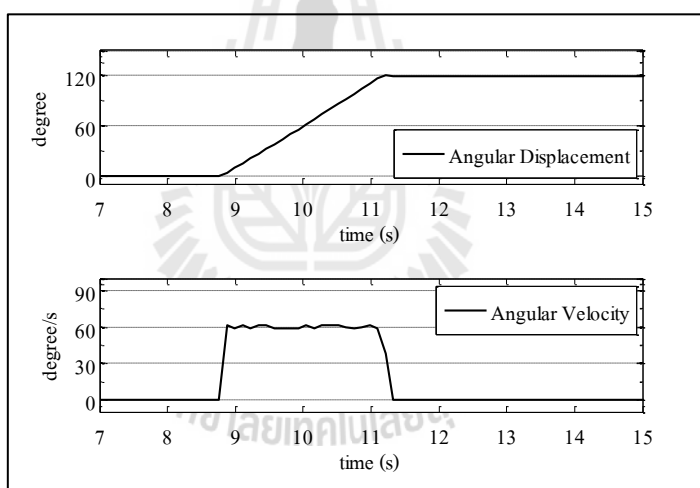
4.1.3 การทดสอบการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป

การควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละแกนนั้น ผู้ใช้สามารถกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่และความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ได้ จากค่าตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ทำให้สามารถทราบค่าความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของตำแหน่งเชิงมุมในการเคลื่อนที่เทียบกับเวลา เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคป ทำการทดสอบผลการตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันได (Step Response) ของแกน x และแกน z ซึ่งจะป็นอินพุตสำหรับการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุม โดยกำหนดความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ทั้งสองแกนไว้ที่ 60 degree/s และกำหนดให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 120 degree โดยมีผลการตอบสนองของการเคลื่อนที่ในแกน x และแกน z แสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

จากผลการตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันได เครื่องมือสอบเทียบสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดโดยรักษาความเร็วเชิงมุมให้อยู่ภายในค่าที่ตั้งไว้ได้ทั้งแกน x และแกน z ค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากความละเอียดในการรับ-ส่งข้อมูลของมอเตอร์แบบ 10 bit และนำมาใช้กับช่วงข้อมูลที่กว้างคือ ± 150 degree จึงทำให้การแปลงค่าสัญญาณระหว่าง Analog Signal และ Digital Signal เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น โดยความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนด 3.18 % และตำแหน่งเชิงมุมที่สภาวะคงตัวของมอเตอร์มีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าที่กำหนดคิดเป็น 0.29 %



รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดของแกน x



รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดของแกน z

4.1.4 ขั้นตอนการสอบเทียบไจโรสโคป

การประมาณค่าพารามิเตอร์ การสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมของไจโรสโคป ในการเก็บบันทึกข้อมูลและแสดงผลการสอบเทียบรวมทั้งการควบคุมการทำงานของเครื่องสอบเทียบไจโรสโคปเลือกใช้โปรแกรม LabVIEW โดยมีหน้าต่างของโปรแกรมควบคุมการทำงานได้แสดงในภาคผนวก ข.3 ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. คิดตั้งเซ็นเซอร์ไจโรสโคปบนตำแหน่งที่กำหนดซึ่งจะอยู่บนแกน x และอยู่แนวเดียวกับแกน z ของเครื่องมือสอบเทียบโดยหันเครื่องหมายแกน x ($x \rightarrow$) ที่ระบุบนไจโรสโคปให้หัวลูกศรชี้ไปทางฝั่งตรงข้ามกับมอเตอร์

2. กดปุ่ม “START” ในโปรแกรมสอบเทียบไจโรสโคปเพื่อเริ่มการทำงานของโปรแกรมโดยเริ่มจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ ในขั้นตอนนี้โปรแกรมสั่งให้มอเตอร์หมุนเป็น sine wave ที่กำหนด แล้วรับสัญญาณป้อนกลับจากเอ็นโค้ดเดอร์และสัญญาณจากไจโรสโคปเพื่อใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ซึ่งทำงานร่วมกับตัวกรองกาลมาน แล้วแสดงผลค่าเบี่ยงเบนและค่าสเกลลิงเฟคเตอร์ที่ประมาณค่าได้

3. ชดเชยค่าพารามิเตอร์จากขั้นตอนที่ 2 ให้กับสัญญาณไจโรสโคปเพื่อใช้ในการกระบวนการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมไจโรสโคปต่อไป

4. การสอบเทียบความเร็วเชิงมุม ในการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมได้เลือกใช้การทดสอบแบบสุ่ม (Random test) โดยแบ่งเป็นสองส่วนคือ

(4.1) การทดสอบแบบสุ่มโดยการเพิ่มค่าขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อดูความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยโปรแกรมจะสั่งให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่กำหนดได้แก่ -100, -80, -60, -40, -20, -10, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 degree/s และอ่านสัญญาณที่ได้จากไจโรสโคป หาความสัมพันธ์เชิงเส้นของอินพุตและเอาต์พุตแล้วแสดงผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุม (% FS) บนหน้าโปรแกรม

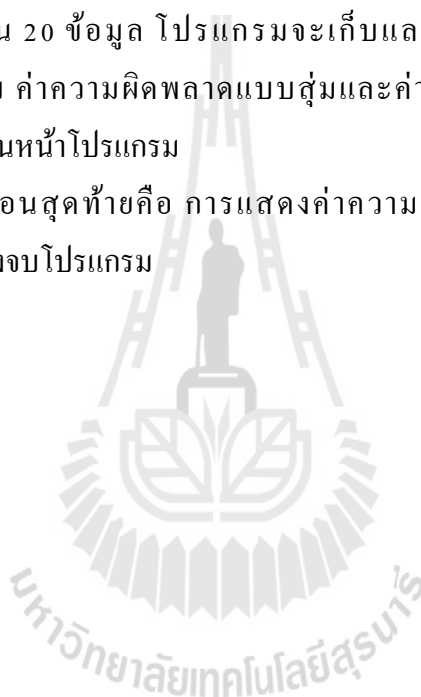
(4.2) การทดสอบแบบสุ่มโดยการสุ่มให้อินพุตเดิมซ้ำ ๆ เพื่อหาความสามารถในการวัดซ้ำ โปรแกรมสั่งให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่กำหนดได้แก่ 20, 60, 100, -20, -60 และ -100 degree/s และอ่านค่าที่ได้จากไจโรสโคป ทำซ้ำแต่ละความเร็วจำนวน 20 ข้อมูล โปรแกรมจะเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลแล้วแสดงผลค่าความผิดพลาดระบบ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่มและค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุม (% FS) บนหน้าโปรแกรม

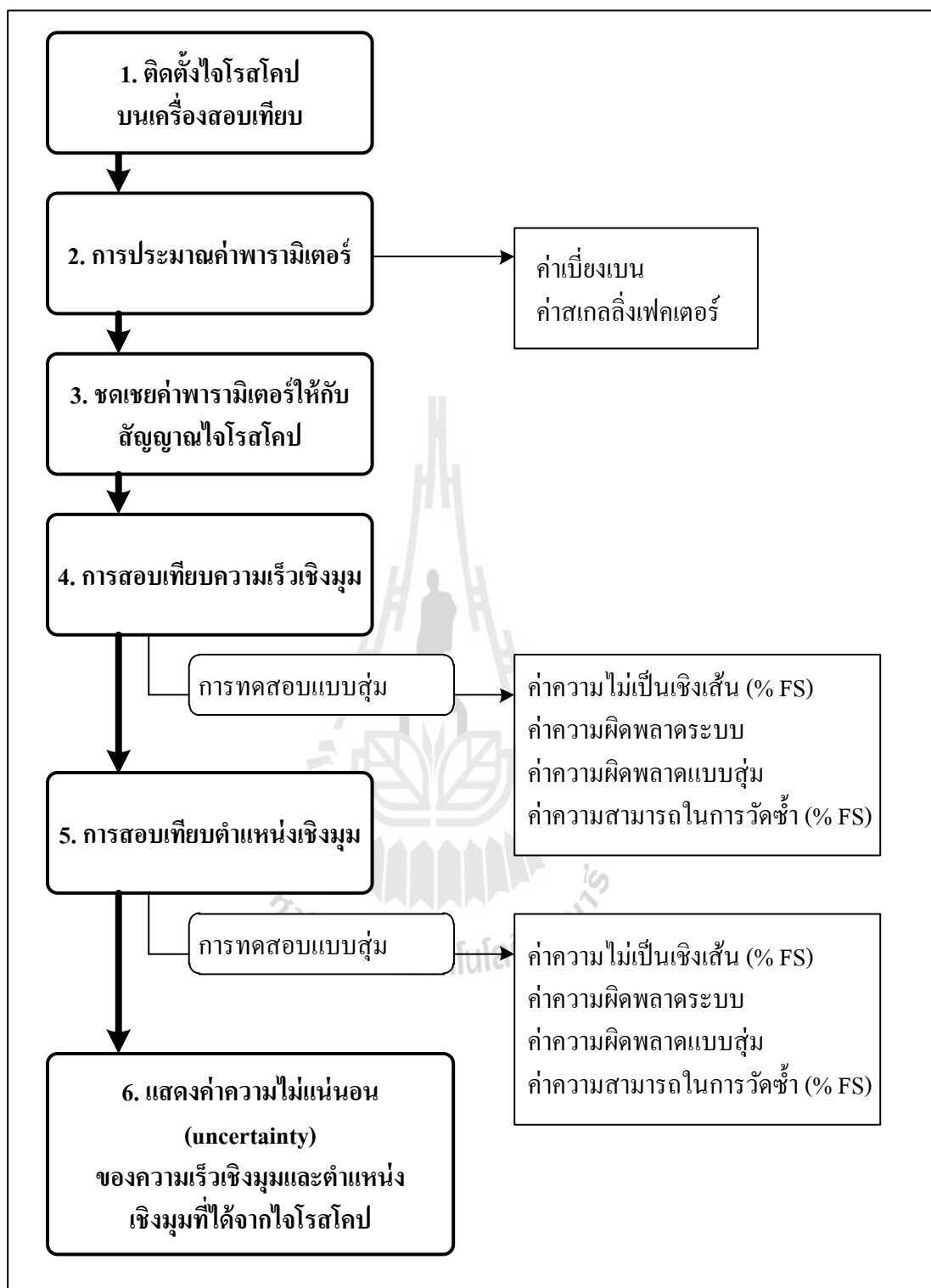
5. การสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุม ในการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมได้เลือกใช้การทดสอบแบบสุ่มเช่นเดียวกับการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมโดยแบ่งเป็นสองส่วนคือ

(5.1) การทดสอบแบบสุ่มโดยการเพิ่มค่าขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อดูความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยโปรแกรมจะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งเชิงมุมที่กำหนดในช่วง -120 degree ไปจนถึง 120 degree เพิ่มขึ้นห่างกันช่วงละ 10 degree และอ่านสัญญาณที่ได้จากไจโรสโคป หาความสัมพันธ์เชิงเส้นของอินพุตและเอาต์พุตแล้วแสดงผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุม (% FS) บนหน้าโปรแกรม

(5.2) การทดสอบแบบสุ่มโดยการสุ่มให้อินพุตเดิมซ้ำ ๆ เพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำ โดยโปรแกรมจะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งเชิงมุมที่กำหนดได้แก่ $30, 60, 90, 120, -30, -60, -90$ และ -120 degree และอ่านค่าที่ได้จากไจโรสโคป ทำซ้ำแต่ละตำแหน่งเชิงมุมจำนวน 20 ข้อมูล โปรแกรมจะเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลแล้วแสดงผลค่าความผิดพลาดระบบ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่มและค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุม (% FS) บนหน้าโปรแกรม

6. ขั้นตอนสุดท้ายคือ การแสดงค่าความไม่แน่นอนของความเร็วเชิงมุม และตำแหน่งเชิงมุมแล้วจึงจบโปรแกรม

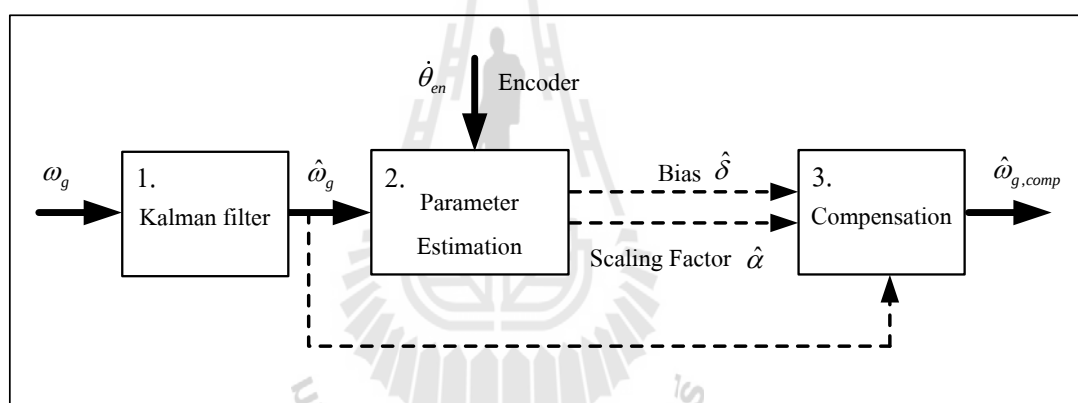




รูปที่ 4.8 ขั้นตอนการสอบเทียบไวรัสโคป

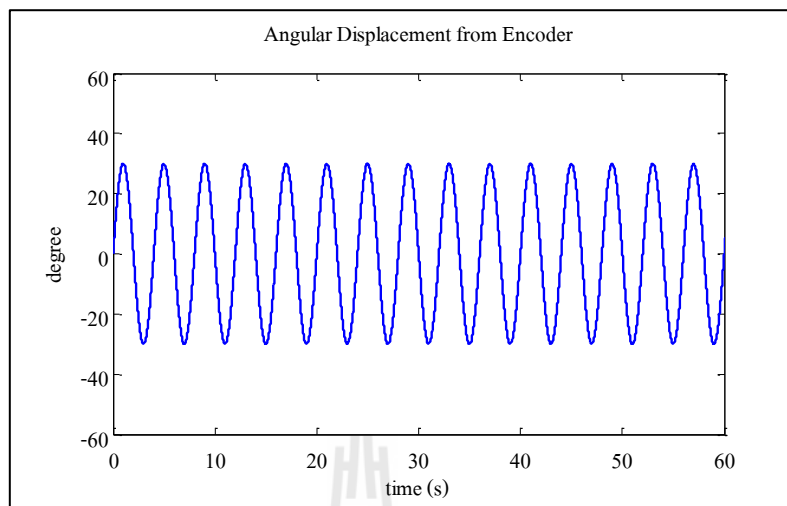
4.2 ผลการจำลองสถานการณ์

การประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Simulink การจำลองสถานการณ์ของระบบในโปรแกรมนี้ ทำให้สามารถลดขั้นตอนการปรับแก้ในการใช้งานจริง อีกทั้งยังสามารถควบคุมตัวแปรและดูประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ออกแบบก่อนนำไปใช้ในการใช้งานจริง สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณไจโรสโคปได้แบ่งการจำลองสถานการณ์เป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 การกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองคาลมาน ส่วนที่ 2 การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method และส่วนที่ 3 การชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้กับสัญญาณไจโรสโคป

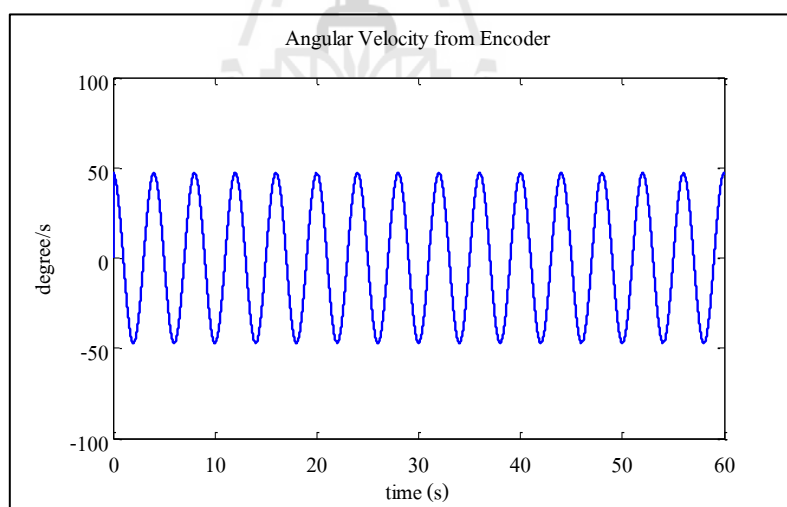


รูปที่ 4.9 การจำลองสถานการณ์

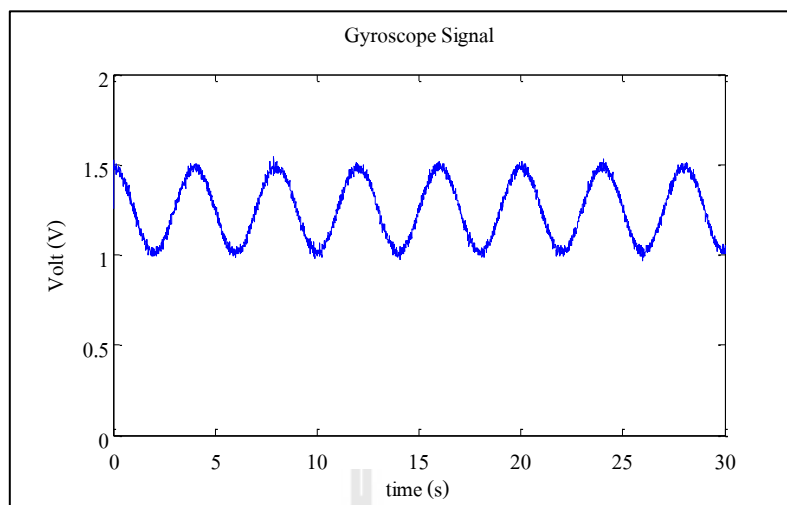
ในการทดลองได้กำหนดสัญญาณการเคลื่อนที่ที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์เป็นสัญญาณ Sine Wave ความถี่ 0.25 Hz มีแอมพลิจูดการเคลื่อนที่ 30 degree สำหรับใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง การเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 4.10 สำหรับความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่ที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ เป็นการหาอนุพันธ์ของสัญญาณตำแหน่งเชิงมุมเทียบกับเวลาแสดงดังรูปที่ 4.11 ในการจำลองสัญญาณไจโรสโคปนั้นพิจารณาจากสมการ 3.1 โดยค่า $\dot{\theta}$ เป็นสัญญาณความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่จากเอ็นโค้ดเดอร์และกำหนดค่าเบี่ยงเบน (δ) และค่าสเกลลิ่งแฟกเตอร์ (α) เท่ากับ 1.25 และ 200 ตามลำดับ สำหรับสัญญาณรบกวน (v_g) กำหนดเป็นสัญญาณรบกวนแบบ Zero-Mean Gaussian White Noise แสดงดังรูปที่ 4.12 เพื่อใช้เป็นอินพุตสำหรับทดสอบการทำงานของตัวกรองคาลมานและการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์



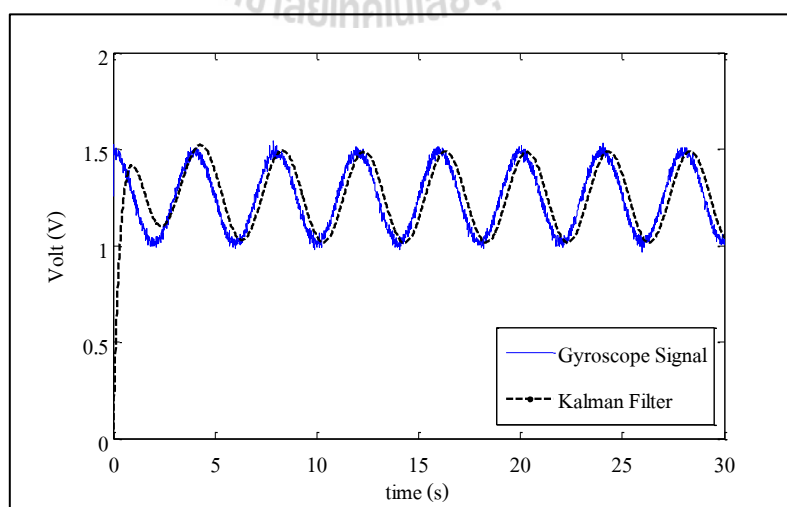
รูปที่ 4.11 ความเร็วเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์



รูปที่ 4.12 สัญญาณไจโรสโคปจำลอง

4.2.1 การกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองคาลมาน

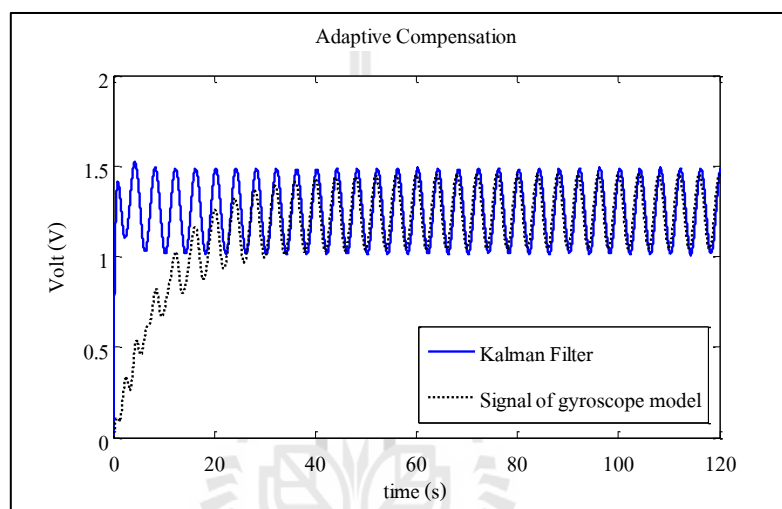
สัญญาณจากไจโรสโคปที่มีสัญญาณรบกวนเมื่อผ่านตัวกรองคาลมานแล้ว สัญญาณที่ได้มีสัญญาณรบกวนน้อยลงเมื่อเทียบกับสัญญาณจากไจโรสโคปเดิม โดยผลการกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองคาลมานแสดงดังรูปที่ 4.13 สัญญาณที่ผ่านตัวกรองคาลมานนี้จะเป็นอินพุตให้กับการจำลองสถานการณ์ในส่วนที่ 2 นั่นคือ การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้จากวิธี Gradient Method ต่อไป



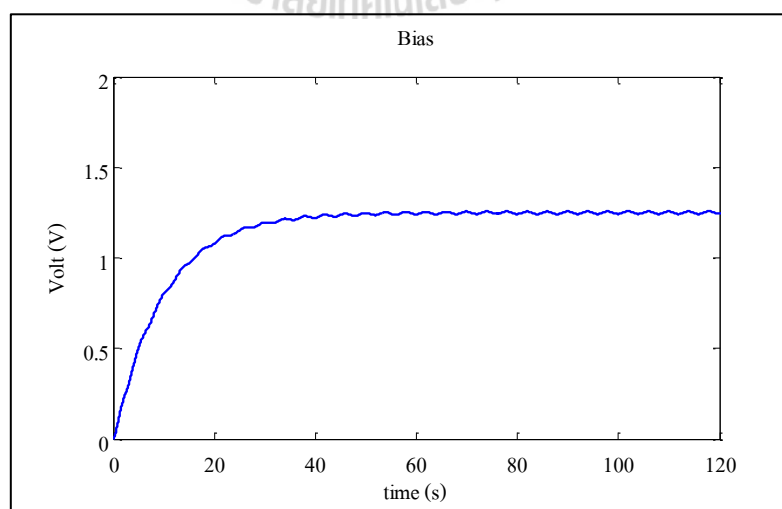
รูปที่ 4.13 สัญญาณจากตัวกรองคาลมาน

4.2.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

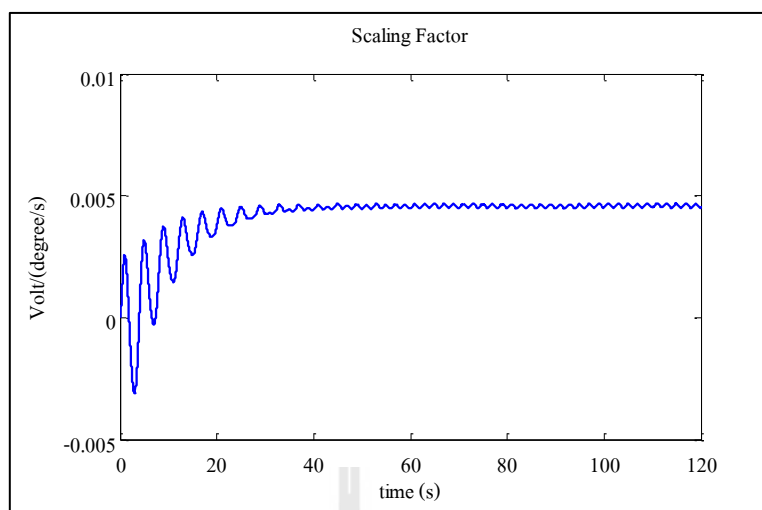
พิจารณาการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method โดยมีสัญญาณไจโรสโคปที่ผ่านตัวกรองคาลมานเป็นสัญญาณอ้างอิง ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จะปรับตัวและชดเชยให้สัญญาณความเร็วเชิงมุมของเอ็นโค้ดเดอร์มีความแตกต่างจากสัญญาณอ้างอิงน้อยที่สุดแสดงดังรูปที่ 4.14 ผลที่ได้นี้จะทำให้สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการได้โดยผลการประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟกเตอร์แสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16



รูปที่ 4.14 การชดเชยสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์เทียบกับสัญญาณอ้างอิง



รูปที่ 4.15 การประมาณค่าเบี่ยงเบน ($\hat{\delta}$)



รูปที่ 4.16 การประมาณค่าสเกลลิงแฟคเตอร์ ($\hat{\alpha}$)

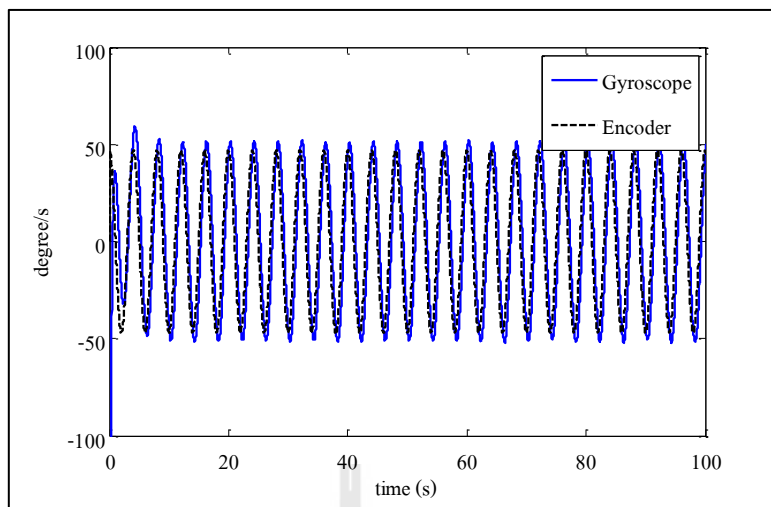
4.2.3 การหาค่าพารามิเตอร์ให้กับสัญญาณไจโรสโคป

ผลการประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟคเตอร์ที่ได้จากตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ด้วยวิธี Gradient Method นั้นในการนำไปชดเชยให้กับสัญญาณไจโรสโคปได้ กำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งสองตัวเป็นค่าคงที่ จึงใช้การหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลเพื่อใช้เป็นค่าของพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 4.2

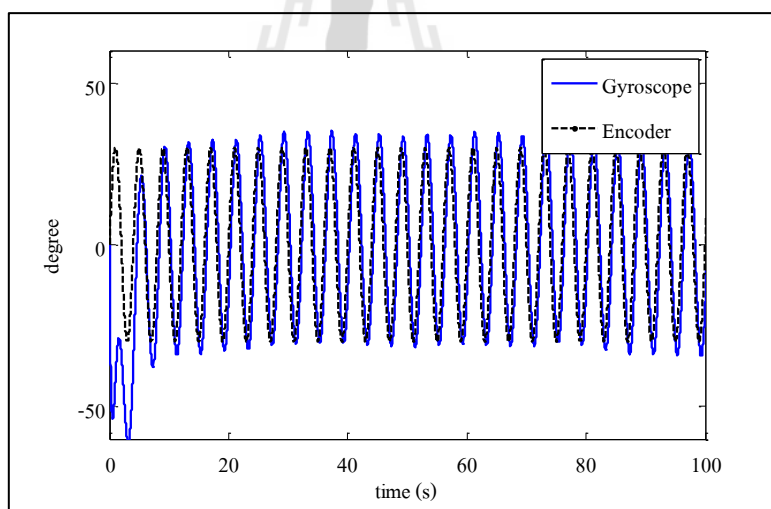
ตารางที่ 4.2 ผลการประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟคเตอร์

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด	ค่าเฉลี่ย
ค่าเบี่ยงเบน ($\hat{\delta}$)	1.25	1.2501
ค่าสเกลลิงแฟคเตอร์ ($\hat{\alpha}$)	0.005	0.00459

ในการชดเชยค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟคเตอร์ให้กับสัญญาณไจโรสโคปนั้นในการจำลองสถานการณ์นี้ได้ทำการชดเชยให้กับสัญญาณไจโรสโคปที่ผ่านจากตัวกรองคาถมาน ($\hat{\omega}_g$) โดยใช้สมการที่ 3.23 ผลการชดเชยทำให้ความผิดพลาดเมื่อเทียบกับสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์ลดลงแสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 สัญญาณความเร็วเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์



รูปที่ 4.18 สัญญาณตำแหน่งเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์

4.3 สรุป

การออกแบบเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปอัตโนมัติ 2 แกนคือแกน x และแกน z ได้เลือกใช้เซอร์โวมอเตอร์ที่มีการควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่ด้วยตัวควบคุมแบบพีดี ซึ่งสามารถกำหนดตำแหน่งเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมในการทำงานผ่านโปรแกรม LabVIEW จากผลการตอบสนองที่สถานะคงตัวเมื่อให้อินพุตแบบขั้นบันไดของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนจากที่กำหนด ซึ่งเกิดจากความละเอียดในการรับส่งข้อมูลตำแหน่งเชิงมุมขนาด 10 bit ทำให้การแปลงค่าสัญญาณระหว่าง Analog Signal และ Digital Signal เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น สำหรับการรับสัญญาณไจโรสโคปที่ทำการสอบเทียบนั้นใช้ DAQ NI USB-6008 ในการรับสัญญาณไจโรสโคปแล้วส่งไปประมวลผลในโปรแกรมควบคุมการทำงาน ในส่วนของกระบวนการสอบเทียบแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนหลักได้แก่ การกรองสัญญาณด้วยตัวกรองคาบมานและประมาณค่าพารามิเตอร์ การชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้แก่สัญญาณไจโรสโคป การสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุม โดยมีโปรแกรมควบคุมการทำงานตามขั้นตอนที่กำหนดไว้และแสดงผลค่าพารามิเตอร์ให้ผู้ใช้งานในการจำลองสถานการณ์การกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองคาบมาน การทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้เพื่อประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟคเตอร์จากวิธีการของ Gradient Method แสดงให้เห็นว่าตัวกรองคาบมาน สามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ และผลจากการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้คือสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการสอบเทียบสัญญาณไจโรสโคปต่อไป

บทที่ 5

ผลการทดสอบการประมาณค่าพารามิเตอร์ และการสอบเทียบไจโรสโคป

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการทำงานของกระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสอบเทียบไจโรสโคป ใช้โปรแกรม LabVIEW วิเคราะห์ข้อมูลและแสดงผลการสอบเทียบให้แก่ผู้ใช้งาน ทำการทดสอบโดยใช้เซนเซอร์ไจโรสโคป LPY503AL ซึ่งเป็นเซนเซอร์ชนิด MEMs สามารถวัดความเร็วเชิงมุมได้ใน 2 แกนคือ Pitch และ Yaw จำนวน 2 ตัว เพื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่ได้จากไจโรสโคปยี่ห้อเดียวกันและรุ่นเดียวกัน ซึ่งได้แบ่งการทดสอบการทำงานเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 การประมาณค่าพารามิเตอร์ ประกอบด้วย

- การกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองกาลมาน
- การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้
- การชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้กับสัญญาณจากไจโรสโคป

ส่วนที่ 2 การสอบเทียบความเร็วเชิงมุม ในการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมของไจโรสโคปในแต่ละแนวแกน ได้เลือกใช้การทดสอบแบบสุ่ม ซึ่งแบ่งได้เป็น การทดสอบแบบสุ่มโดยการเพิ่มค่าความเร็วเชิงมุมขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์ที่ทำการสอบเทียบและการทดสอบแบบสุ่มโดยการสุ่มให้อินพุตความเร็วเชิงมุมค่าเดิมซ้ำ ๆ เพื่อดูความสามารถในการวัดซ้ำของเซนเซอร์ โดยทำการทดสอบกับไจโรสโคปตัวที่ 1 และ 2

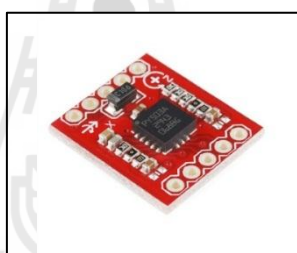
ส่วนที่ 3 การสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุม ในการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมของไจโรสโคปในแต่ละแนวแกน ได้เลือกใช้การทดสอบแบบสุ่ม ซึ่งแบ่งได้เป็น การทดสอบแบบสุ่มโดยการเพิ่มค่าตำแหน่งเชิงมุมขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์ที่ทำการสอบเทียบและการทดสอบแบบสุ่มโดยการสุ่มให้อินพุตตำแหน่งเชิงมุมค่าเดิมซ้ำ ๆ เพื่อดูความสามารถในการวัดซ้ำของเซนเซอร์ โดยทำการทดสอบกับไจโรสโคปตัวที่ 1 และ 2

พารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์ การสอบเทียบความเร็วเชิงมุม และการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมนั้นจะเป็นประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานไจโรสโคปราคาถูกในกระบวนการวัดและควบคุมให้มากยิ่งขึ้น

5.1 การประมาณค่าพารามิเตอร์

5.1.1 การกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองคาบมาน

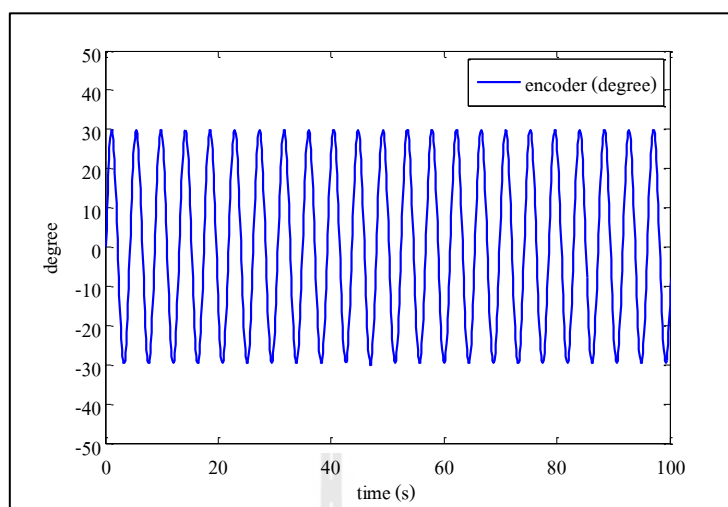
ในการทดสอบได้กำหนดสัญญาณการเคลื่อนที่ให้กับมอเตอร์ในแต่ละแนวแกนเป็นสัญญาณ Sine Wave ความถี่ 0.25 Hz มีแอมพลิจูด 30 degree สัญญาณการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่อ่านค่าจากเอนโค้ดเดอร์แสดงดังรูปที่ 5.2 และ 5.3 ไจโรสโคปที่เลือกใช้ในการทดสอบคือ LPY503AL ซึ่งส่งสัญญาณออกมาในรูปของสัญญาณความต่างศักย์ที่เป็นสัญญาณ Analog Signal ซึ่งมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ในคู่มือการใช้งานแสดงดังตารางที่ 5.1 สัญญาณของไจโรสโคปที่รับเข้ามาในโปรแกรม LabVIEW จะผ่านตัวกรองคาบมานเพื่อกรองสัญญาณรบกวน สัญญาณของไจโรสโคปที่ไม่ผ่านตัวกรองคาบมานและสัญญาณไจโรสโคปที่ผ่านตัวกรองคาบมานแสดงดังรูปที่ 5.4 สัญญาณที่ผ่านตัวกรองคาบมานนี้จะเป็นอินพุตให้กับการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้จากวิธี Gradient Method ต่อไป



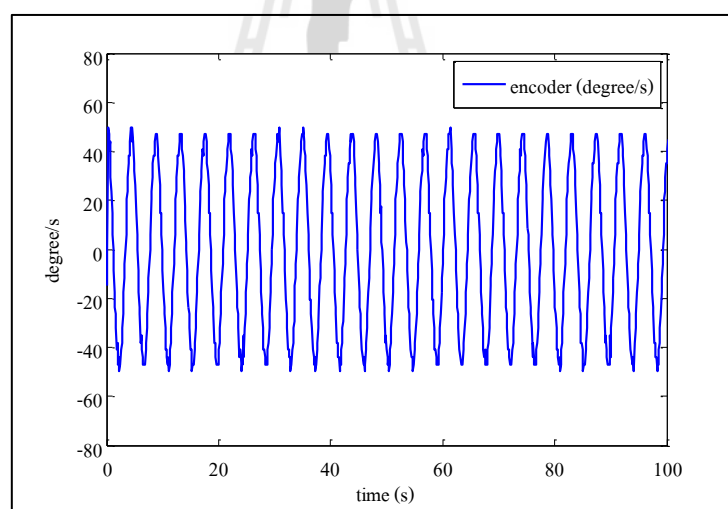
รูปที่ 5.1 LPY503AL Gyroscope

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของไจโรสโคป LPY503AL จากคู่มือการใช้งาน

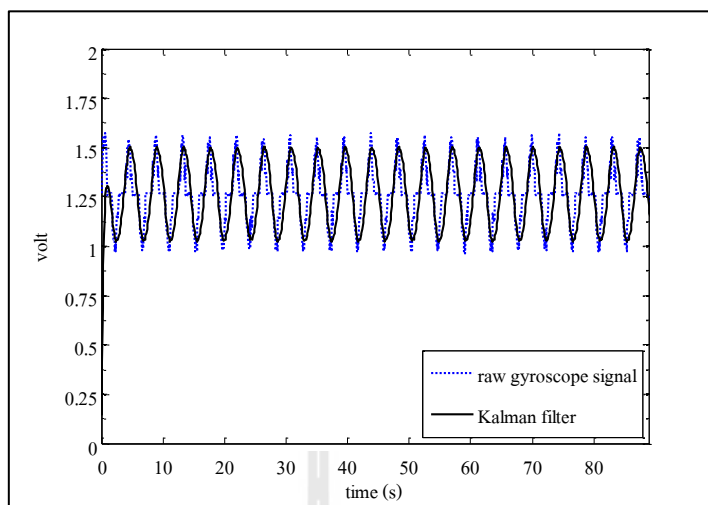
Symbol	Parameter	Test Condition	Min	Typical Specification	Max	Unit
FSA	Measurement Range	4X - OUT		± 30		$^{\circ}/S$
FS		OUT		± 120		$^{\circ}/S$
SoA	Sensitivity	4X - OUT		33.3		$mV/^{\circ} / S$
So		OUT		8.3		$mV/^{\circ} / S$
Voff	Zero-rate Level	-		1.23		V
Vref	Reference Voltage	-		1.23		V
Vdd	Supply Voltage	-	2.7	3	3.6	V



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์



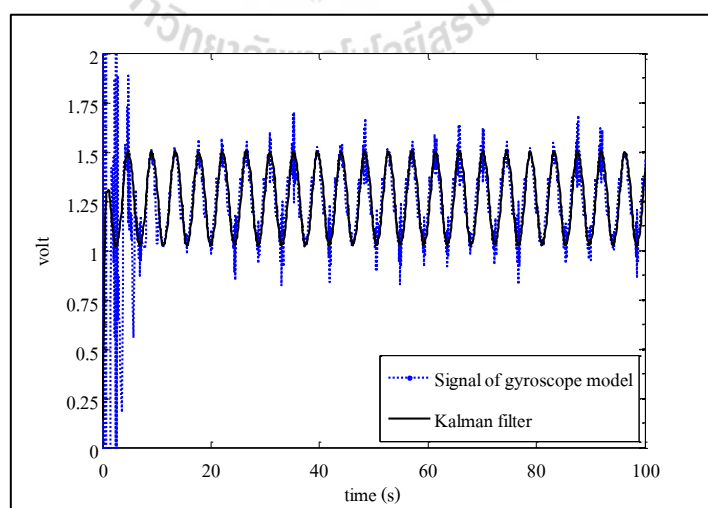
รูปที่ 5.3 ความเร็วเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์



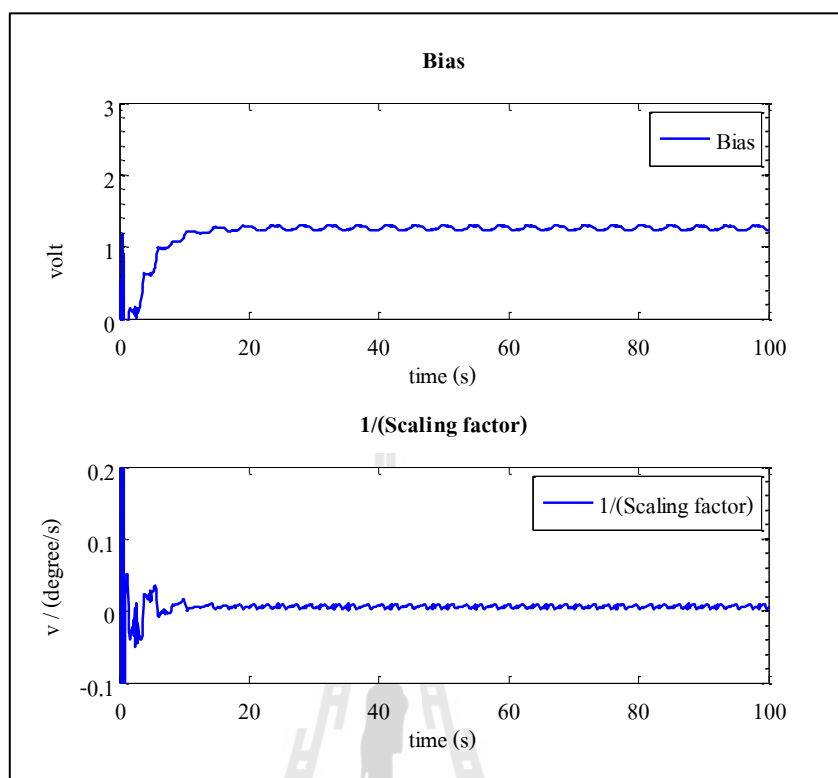
รูปที่ 5.4 สัญญาณจากตัวกรองคาลมาน

5.1.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

ในส่วนของการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จากวิธี Gradient Method นั้นตัวชดเชยแบบปรับตัวได้จะทำการชดเชยพารามิเตอร์ให้กับสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์โดยมีสัญญาณไจโรสโคปที่ผ่านตัวกรองคาลมานเป็นสัญญาณอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 5.5 และผลการประมาณค่าพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.5 การชดเชยสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์เทียบกับสัญญาณอ้างอิง



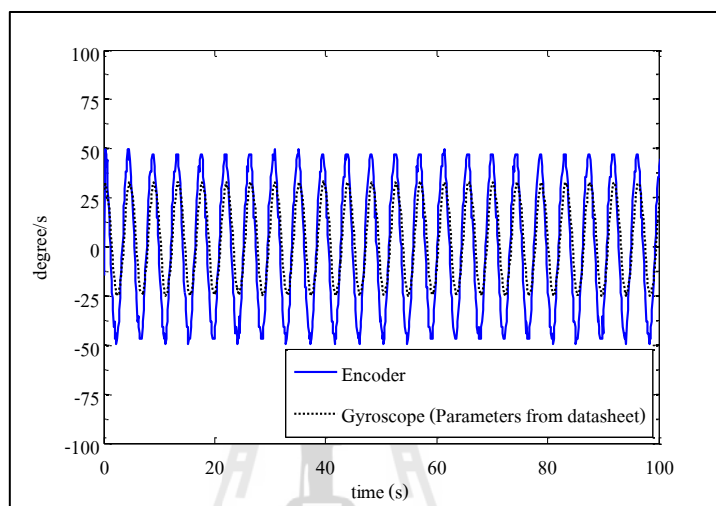
รูปที่ 5.6 การประมาณค่าพารามิเตอร์

5.1.3 การชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้กับสัญญาณไจโรสโคป

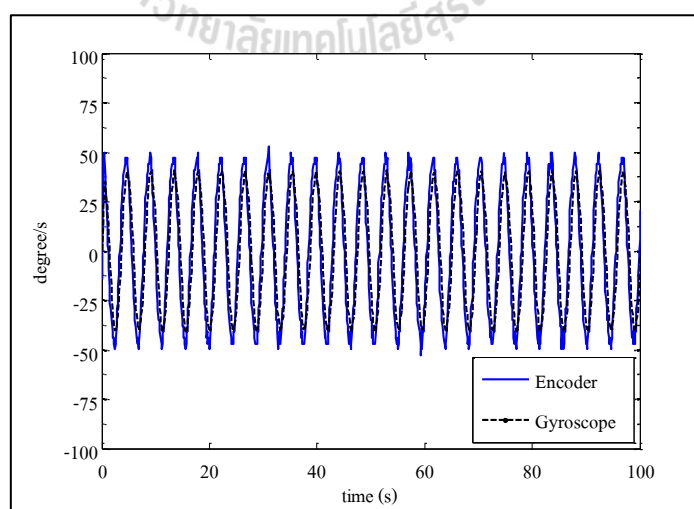
ผลการประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟกเตอร์ที่ได้จากตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ด้วยวิธี Gradient Method นั้นในการนำไปชดเชยให้กับสัญญาณไจโรสโคปได้กำหนดให้พารามิเตอร์ทั้งสองตัวเป็นค่าคงที่ จึงใช้การหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลเพื่อใช้เป็นค่าของพารามิเตอร์ ในการชดเชยค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟกเตอร์ให้กับสัญญาณไจโรสโคปนั้นใช้สมการที่ 3.23 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 5.2 ผลการชดเชยสัญญาณไจโรสโคปด้วยพารามิเตอร์จากคู่มือของผู้ผลิตแสดงดังรูปที่ 5.7 จากรูปจะเห็นได้ว่าสัญญาณไจโรสโคปที่ได้มีความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณอื่น โค้ดเดอร์และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการชดเชยสัญญาณไจโรสโคปด้วยพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าแสดงดังรูปที่ 5.8 และ 5.9 จากผลการชดเชยนั้น สัญญาณจากไจโรสโคปมีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อเทียบกับสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้นั้นสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการได้

ตารางที่ 5.2 ผลการประมาณค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟกเตอร์

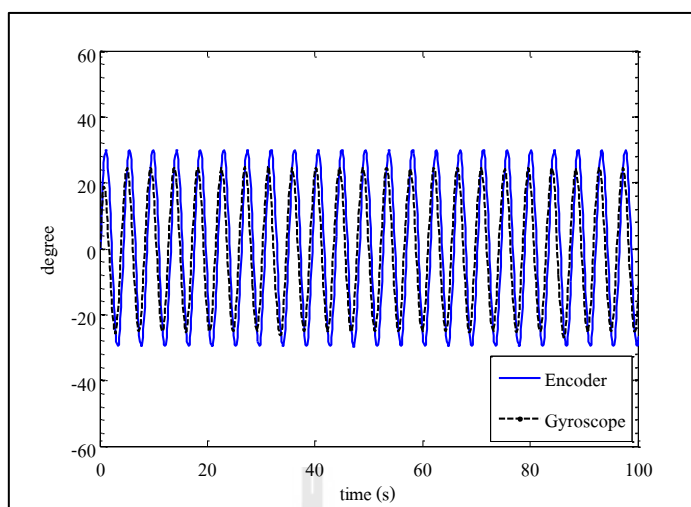
พารามิเตอร์	ค่าจากคู่มือของผู้ผลิต	ค่าจากการประมาณค่า
ค่าเบี่ยงเบน	1.23 V	1.2628 V
1/(ค่าสเกลลิงแฟกเตอร์)	0.0083 V/(degree/s)	0.005905 V/(degree/s)



รูปที่ 5.7 สัญญาณความเร็วเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์
ที่หัดเซด้วยพารามิเตอร์จากคู่มือของผู้ผลิต



รูปที่ 5.8 สัญญาณความเร็วเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอ็นโค้ดเดอร์



รูปที่ 5.9 สัญญาณตำแหน่งเชิงมุมระหว่างไจโรสโคปและเอนโค้ดเดอร์

5.2 การสอบเทียบความเร็วเชิงมุม

ในการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมได้ใช้ไจโรสโคป LPY503AL จำนวน 2 ตัวในการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของไจโรสโคปราคาถูกรุ่นเดียวกัน ยี่ห้อเดียวกัน ผู้ผลิตเดียวกันและเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้กับข้อมูลจากคู่มือการใช้งานที่ผู้ผลิตได้ระบุไว้ การสอบเทียบความเร็วเชิงมุมเป็นการให้ความเร็วเชิงมุมที่ทราบค่าเป็นอินพุตในการสอบเทียบ และอ่านค่าเอาต์พุตจากไจโรสโคปโดยใช้การทดสอบแบบสุ่มซึ่งแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ

ส่วนที่ 1 การทดสอบแบบสุ่ม โดยการเพิ่มค่าความเร็วเชิงมุมขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์ที่ทำการสอบเทียบ เนื่องจากไจโรสโคป LPY503AL เป็นเซนเซอร์ที่สามารถวัดค่าได้ 2 แนวแกนคือ แกน x และแกน z โดยมีค่าเต็มสเกลอยู่ที่ ± 120 degree/s ทั้งสองแกน จึงทำการสอบเทียบในแต่ละแนวแกนในช่วง -100 degree/s ถึง 100 degree/s เพื่อไม่ให้เกินค่าเต็มสเกลที่ไจโรสโคปรับได้ เก็บข้อมูลในแต่ละค่าความเร็วเชิงมุมจำนวน 3 ข้อมูลทั้งแกน x และแกน z และหาค่าเฉลี่ย ผลการสอบเทียบของไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 ในแกน x และแกน z แสดงดังตารางที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ ผลการสอบเทียบของไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 ในแกน x และแกน z แสดงดังตารางที่ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของเอนโค้ดเดอร์และเอาต์พุตจากไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 ในแกน x และแกน z แสดงดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมของเอนโค้ดเดอร์และเอาต์พุตจากไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 ในแกน x และแกน z แสดงดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 ตามลำดับ เมื่อทำการสร้าง

เส้นแนวโน้มแบบเชิงเส้นจะให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นในรูปสมการเส้นตรง $y_L(x)$ เพื่อใช้ในการหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูล โดยค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจากการวัดและค่าที่ได้จากความสัมพันธ์เชิงเส้นคือ

$$e_L(x) = y(x) - y_L(x) \quad (5.1)$$

เมื่อ $e_L(x)$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากความสัมพันธ์เชิงเส้น
 $y(x)$ คือ ค่าจากการวัด

ความไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลหรือเครื่องมือวัดอธิบายถึงจุดข้อมูลที่เบี่ยงเบนออกไปจากแนวความสัมพันธ์เชิงเส้นมากที่สุด โดยค่าความไม่เป็นเชิงเส้นนี้แสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล

$$\%e_{L_{\max}} = \frac{e_{L_{\max}}}{r_0} \times 100 \quad (5.2)$$

เมื่อ $e_{L_{\max}}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนจากความสัมพันธ์เชิงเส้นที่มากที่สุด
 r_0 คือ ค่าเต็มสเกล

ส่วนที่ 2 การทดสอบแบบสุ่ม โดยการสุ่มให้อินพุตความเร็วเชิงมุมค่าเดิมซ้ำ ๆ เพื่อดูความสามารถในการวัดซ้ำของเซนเซอร์ ในการหาค่าความสามารถในการทำซ้ำมีคำถามถึงจำนวนข้อมูล (N sample) เท่าไรที่ต้องการเพื่อลดขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม เนื่องจากการแปรผันของชุดข้อมูลภายใต้ระดับความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้ พิจารณาสมการ

$$x' = \bar{x} \pm t_{v,P} S_{\bar{x}} \quad (P \%) \quad (5.3)$$

ภายใต้ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% กำหนดให้ CI คือ

$$CI = \pm t_{v,95} S_{\bar{x}} = \pm t_{v,95} \frac{S_x}{\sqrt{N}} \quad (95 \%) \quad (5.4)$$

การหาค่าของสมการที่ 5.4 นั้นค่าของ S_x ควรได้มาจากการทดลองก่อนหน้า ประสิทธิภาพการทำงานหรือข้อมูลจากการผลิต สำหรับระดับความเชื่อมั่นนั้นจะหมายถึงข้อมูลทั้งสองฝั่งของค่าเฉลี่ยคือ $-t_{v,95} \frac{S_x}{\sqrt{N}}$ ถึง $+t_{v,95} \frac{S_x}{\sqrt{N}}$ เมื่อพิจารณาฝั่งเดียวของข้อมูลค่า d คือ

$$d = \frac{CI}{2} = t_{v,95} \frac{S_x}{\sqrt{N}} \quad (5.5)$$

ดังนั้นจำนวนข้อมูลที่ต้องการในการวัดสามารถประมาณได้โดยสมการ

$$N_T \approx \left(\frac{t_{v,95} S_x}{d} \right)^2 (95 \%) \quad (5.6)$$

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้จำนวนข้อมูลในการหาความสามารถในการวัดซ้ำ 20 ข้อมูล เพื่อเป็นการทดสอบว่าจำนวนข้อมูลที่ใช้ก็นั้นเพียงพอหรือไม่ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบโดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 50 degree/s เก็บข้อมูลที่ได้จากไจโรสโคปจำนวน 20 ครั้ง หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล (S_x) ได้เท่ากับ 0.3959 กำหนดค่า CI เท่ากับ 0.25 แทนค่าลงในสมการที่ 5.6 จะได้ค่า N_T เท่ากับ 10.91 แสดงว่าจำนวนที่เลือกใช้ในการเก็บข้อมูล ($N = 20$) นั้นเพียงพอต่อการเก็บข้อมูล

ในส่วนที่ 2 นี้เป็นการให้ความเร็วเชิงมุมที่ทราบค่าแก่ไจโรสโคปซ้ำ ๆ โดยเลือกความเร็วเชิงมุมที่ทำการสอบเทียบ 6 ค่าแต่ละค่าทำซ้ำ 22 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัด ผลการสอบเทียบไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 ในแกน x และแกน z แสดงดังตารางที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ ผลการสอบเทียบไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 ในแกน x และแกน z แสดงดังตารางที่ 5.9 และ 5.10 ตามลำดับ จากผลการสอบเทียบนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่ม ความสามารถในการวัดซ้ำรวมทั้งค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลจากไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 และ 2 ซึ่งได้แสดงค่าโดยสรุปในตารางที่ 5.20 สำหรับค่าความผิดพลาดระบบ พิจารณาจากสมการ

$$\text{Bias error} = |x_{\text{true}} - \bar{x}| \quad (5.7)$$

เมื่อ X_{true} คือ ค่าอ้างอิง

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดข้อมูลที่ทำารวัดซ้ำ

สำหรับความผิดพลาดแบบสุ่มกำหนดให้มีขนาดเป็น 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ของแต่ละชุดข้อมูลที่ทำารวัด

$$\text{Random error} = 2 \cdot S_{\max} \quad (5.8)$$

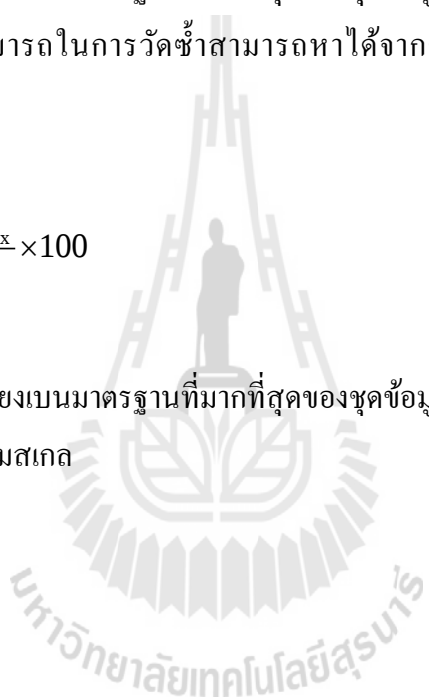
เมื่อ $S_{\max}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุดของชุดข้อมูลที่ทำารวัด

และสำหรับค่าความสามารถในการวัดซ้ำสามารถหาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุด
ของข้อมูลคือ

$$\%e_{R_{\max}} = \frac{2 \cdot S_{\max}}{r_0} \times 100 \quad (5.9)$$

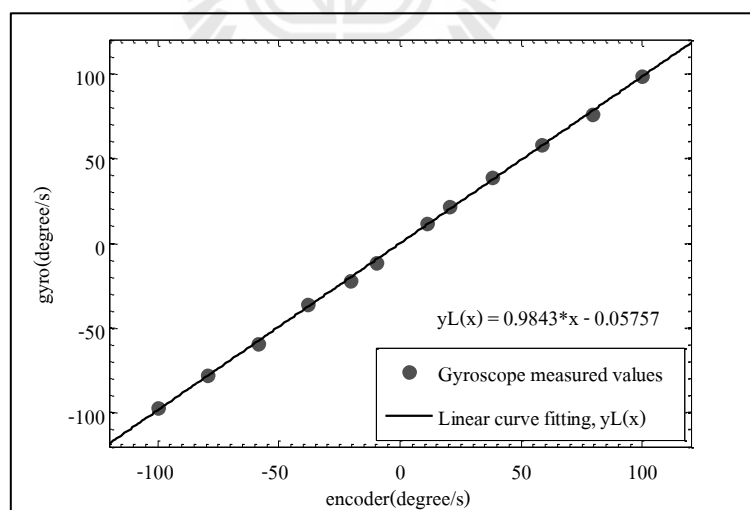
เมื่อ $S_{\max}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากที่สุดของชุดข้อมูลที่ทำารวัด

r_0 คือ ค่าเต็มสเกล



ตารางที่ 5.3 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมแกน x
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1

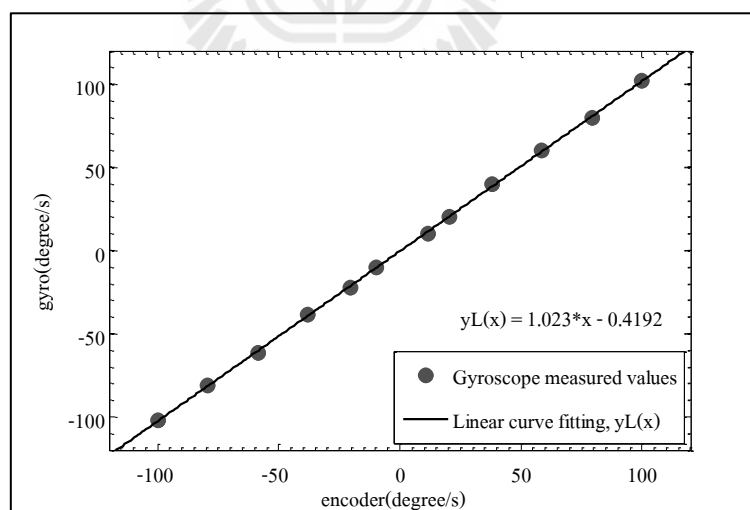
ความเร็ว (degree/s)	Encoder (degree/s)	Gyroscope Measured Values (degree/s)			ค่าเฉลี่ย	$y_L(x)$	$e_L(x)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	11.0730	11.9685	11.5877	11.3979	11.6514	10.8416	0.8098
20	20.5279	21.4883	21.8691	22.2499	21.8691	20.1480	1.7211
40	38.1232	38.0528	39.1951	39.3855	38.8778	37.4671	1.4107
60	58.6510	58.9963	58.2348	57.4732	58.2348	57.6726	0.5622
80	79.1789	75.9416	75.5608	75.3704	75.6243	77.8782	-2.2539
100	99.7067	98.9795	99.1699	97.8372	98.6622	98.0837	0.5785
-10	-9.7976	-11.8310	-10.6887	-11.6406	-11.3868	-9.7014	-1.6854
-20	-20.5279	-22.1124	-22.4932	-22.4932	-22.3663	-20.2632	-2.1031
-40	-38.1232	-35.0594	-37.3441	-35.6305	-36.0113	-37.5823	1.5709
-60	-58.6510	-59.0493	-60.1917	-59.0493	-59.4301	-57.7878	-1.6423
-80	-79.1789	-77.5177	-78.2793	-78.8505	-78.2158	-77.9934	-0.2224
-100	-99.7067	-96.3669	-96.5773	-97.8901	-96.9448	-98.1989	1.2541



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมแกน x ของเอ็นโค้ดเดอร์
และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1

ตารางที่ 5.4 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมแกน z
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1

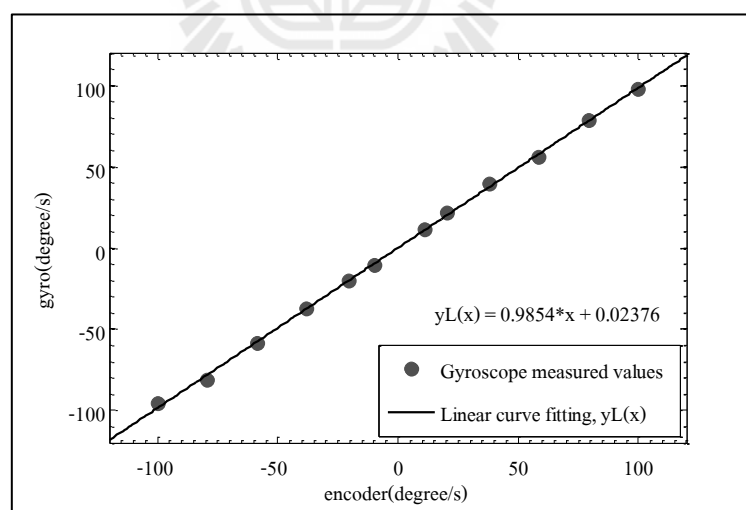
ความเร็ว (degree/s)	Encoder (degree/s)	Gyroscope Measured Values (degree/s)			ค่าเฉลี่ย	$y_L(x)$	$e_L(x)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	11.0730	10.0067	9.8148	10.7741	10.1985	11.5761	-1.3776
20	20.5279	19.9830	20.7504	20.7504	20.4946	20.5726	-0.0780
40	38.1232	40.5372	39.9693	39.0515	39.8527	38.5656	1.2871
60	58.6510	60.2772	59.8942	60.6501	60.2738	59.5573	0.7165
80	79.1789	78.2243	80.8699	79.3581	79.4841	80.5491	-1.0650
100	99.7067	102.7900	101.8460	101.2790	101.9717	101.5409	0.4308
-10	-9.7976	-9.8356	-10.4025	-10.2135	-10.1505	-10.4382	0.2877
-20	-20.5279	-23.6304	-20.9848	-21.7407	-22.1186	-21.4110	-0.7076
-40	-38.1232	-37.7197	-37.9087	-40.3653	-38.6646	-39.4040	0.7394
-60	-58.6510	-60.6572	-62.7359	-61.6020	-61.6650	-60.3957	-1.2693
-80	-79.1789	-80.0210	-81.4380	-81.0049	-80.8213	-81.3875	0.5662
-100	-99.7067	-101.2800	-102.4140	-102.0360	-101.9100	-102.3793	0.4693



รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมแกน z ของเอ็นโค้ดเดอร์
และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1

ตารางที่ 5.5 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมแกน x
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 2

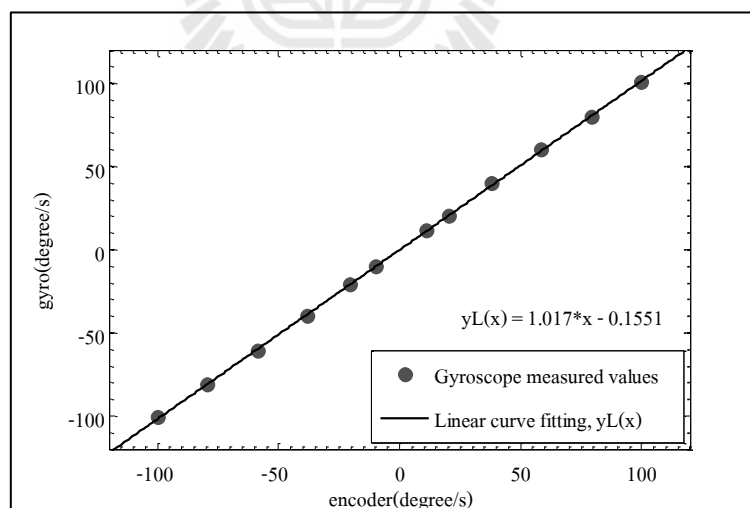
ความเร็ว (degree/s)	Encoder (degree/s)	Gyroscope Measured Values (degree/s)			ค่าเฉลี่ย	$y_L(x)$	$e_L(x)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	11.0730	11.4422	11.8226	11.0617	11.4422	10.9351	0.5070
20	20.5279	21.9050	22.0952	21.3343	21.7782	20.2520	1.5262
40	38.1232	39.2513	39.0608	39.6323	39.3148	37.5904	1.7244
60	58.6510	55.3860	56.7170	56.3372	56.1467	57.8185	-1.6718
80	79.1789	78.4966	78.1156	78.4966	78.3696	78.0467	0.3229
100	99.7067	97.9982	99.1396	96.4763	97.8714	98.2748	-0.4034
-10	-9.7976	-9.7102	-10.4722	-12.1868	-10.7897	-9.6308	-1.1590
-20	-20.5279	-20.1365	-20.1361	-20.7072	-20.3266	-20.2044	-0.1222
-40	-38.1232	-36.1913	-38.0964	-37.7153	-37.3343	-37.5428	0.2085
-60	-58.6510	-58.5636	-58.1831	-58.7538	-58.5002	-57.7709	-0.7293
-80	-79.1789	-80.1994	-81.1520	-81.5330	-80.9615	-77.9991	-2.9624
-100	-99.7067	-94.8981	-96.0395	-95.4688	-95.4688	-98.2272	2.7584



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมแกน x ของเอ็นโค้ดเดอร์
และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2

ตารางที่ 5.6 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของความเร็วเชิงมุมแกน z
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 2

ความเร็ว (degree/s)	Encoder (degree/s)	Gyroscope Measured Values (degree/s)			ค่าเฉลี่ย	$y_L(x)$	$e_L(x)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
10	11.0730	11.7209	11.4936	11.0141	11.4095	11.1073	0.3023
20	20.5279	19.6754	19.5165	20.6412	19.9444	20.7238	-0.7795
40	38.1232	39.3522	40.9697	40.3324	40.2181	38.6200	1.5981
60	58.6510	59.7963	60.8518	59.9871	60.2117	59.4988	0.7129
80	79.1789	79.7941	79.2214	80.1758	79.7304	80.3778	-0.6473
100	99.7067	101.3640	99.9820	101.3640	100.9033	101.2566	-0.3533
-10	-9.7976	-9.9199	-10.1107	-11.0652	-10.3653	-10.1202	-0.2450
-20	-20.5279	-21.3727	-20.5636	-20.3950	-20.7771	-21.0340	0.2569
-40	-38.1232	-39.1470	-40.4831	-39.7196	-39.7832	-38.9302	-0.8530
-60	-58.6510	-60.0294	-60.2203	-61.4567	-60.5688	-59.8090	-0.7598
-80	-79.1789	-80.1912	-81.4299	-80.8582	-80.8264	-80.6880	-0.1385
-100	-99.7067	-99.1519	-101.391	-101.439	-100.6606	-101.5668	0.9062



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมแกน z ของเอ็นโค้ดเดอร์
และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2

ตารางที่ 5.7 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุมแกน x
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1

ความเร็ว (degree/s)	20	60	100	-20	-60	-100
Encoder (degree/s)	20.5279	58.651	99.7067	-20.5279	-58.651	-99.7067
ครั้งที่	Gyroscope Measured Values (degree/s)					
1	21.8691	58.9963	98.9795	-22.1124	-59.0493	-96.3669
2	21.8691	58.2348	99.1699	-22.4932	-60.1917	-96.5573
3	21.4883	57.4732	97.8372	-23.2548	-59.0493	-95.0342
4	21.8691	58.8059	98.0276	-22.4932	-60.1917	-95.7957
5	22.2499	57.4732	97.6468	-22.6836	-56.0029	-95.9861
6	22.4403	57.6636	98.0276	-22.1124	-59.4301	-95.9861
7	21.6787	57.8540	98.0276	-22.4932	-60.1917	-95.6053
8	21.4883	57.2828	97.8372	-21.7316	-59.8109	-95.9861
9	21.6787	59.1867	99.1699	-21.9220	-57.1453	-95.4149
10	21.6787	57.4732	97.6468	-21.7316	-60.1917	-95.6053
11	21.6787	57.8540	98.4083	-22.4932	-59.2397	-95.0342
12	22.8211	56.9020	98.5987	-22.3028	-59.6205	-98.8421
13	21.6787	57.4732	99.3603	-19.0661	-58.6685	-95.9861
14	21.4883	58.6155	97.6468	-22.3028	-59.0493	-95.7957
15	22.6307	57.8540	98.2180	-20.9700	-57.1453	-97.8901
16	21.6787	57.6636	97.8372	-22.1124	-59.8109	-95.0342
17	21.6787	58.2348	98.0276	-22.3028	-60.1917	-96.3669
18	22.0595	57.4732	97.2660	-20.7796	-60.5724	-96.1765
19	22.4403	58.8059	98.2180	-18.8757	-59.4301	-98.0805
20	21.8691	58.4252	98.0276	-19.6373	-56.7645	-96.3669
21	21.1075	58.2348	97.8372	-21.3508	-60.5724	-96.7477
22	22.2499	59.1867	98.5987	-22.6836	-59.2397	-97.8901
ค่าเฉลี่ย	21.8881	58.0539	98.1894	-21.7887	-59.2492	-96.2336
Std. dev.	0.3434	0.5875	0.4835	0.9905	1.0885	0.8672
Bias err.	1.3602	0.5971	1.5173	1.2608	0.5982	3.4731
Random err.	0.6868	1.1751	0.9670	1.9810	2.1769	1.7345

ตารางที่ 5.8 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุมแกน z
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1

ความเร็ว (degree/s)	20	60	100	-20	-60	-100
Encoder (degree/s)	20.5279	58.651	99.7067	-20.5279	-58.651	-99.7067
ครั้งที่	Gyroscope Measured Values (degree/s)					
1	19.9830	60.2722	102.7900	-23.6304	-60.6572	-101.2800
2	20.7504	59.8942	101.8460	-20.9848	-62.7359	-102.4140
3	20.7504	60.6501	101.2790	-21.7407	-61.6020	-102.0360
4	20.7504	61.4060	101.0900	-20.9848	-62.1690	-101.0910
5	20.7504	60.4611	102.2230	-21.7407	-59.6623	-102.7920
6	21.7096	61.0280	102.9790	-20.7958	-60.4182	-102.7920
7	20.7504	60.6501	101.8460	-21.3628	-62.1690	-101.6580
8	22.8607	61.5950	101.0900	-21.3628	-62.9248	-101.6580
9	21.3259	60.2722	102.0340	-21.1738	-62.7359	-103.3590
10	18.6400	60.2722	100.9010	-20.9848	-62.5469	-101.8470
11	21.5178	61.0280	102.0340	-24.1973	-62.3079	-99.9571
12	20.3667	60.2722	101.2790	-20.4179	-62.1690	-99.3902
13	20.1748	62.3508	101.6570	-22.1186	-62.1690	-103.9250
14	22.2852	59.8942	102.0340	-22.4966	-59.9013	-104.3030
15	19.7911	60.2722	101.6570	-22.6021	-60.6572	-102.3590
16	21.1341	63.1067	102.7900	-21.9297	-60.2793	-99.5791
17	21.9015	60.4611	102.0340	-20.9014	-60.2793	-99.9571
18	20.5585	61.5950	101.2790	-19.7676	-62.9248	-101.6580
19	20.3667	61.9729	102.2230	-20.7124	-58.9565	-100.3350
20	22.0933	60.2722	103.3570	-19.9565	-62.1690	-99.5791
21	21.3259	61.4060	102.6010	-21.8462	-58.9565	-100.1460
22	21.7096	60.2722	102.4120	-21.6573	-62.3579	-102.0360
ค่าเฉลี่ย	20.9998	60.8202	101.9589	-21.4700	-61.4434	-101.5229
Std. dev.	0.7127	0.6852	0.5761	0.8437	1.2080	1.2681
Bias err.	0.4719	0.7634	2.2522	0.9421	2.7924	1.8162
Random err.	1.4254	1.3704	1.1522	1.6874	2.4161	2.5363

ตารางที่ 5.9 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุมแกน x
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกรุ่นที่ 2

ความเร็ว (degree/s)	20	60	100	-20	-60	-100
Encoder (degree/s)	20.5279	58.651	99.7067	-20.5279	-58.651	-99.7067
ครั้งที่	Gyroscope Measured Values (degree/s)					
1	20.5812	57.7309	98.8814	-20.5693	-58.2906	-95.2498
2	19.8191	56.9688	96.5952	-21.1409	-57.338	-95.8213
3	20.2001	58.874	97.5478	-20.5693	-58.6716	-95.2498
4	20.2001	56.0163	98.6909	-20.1883	-57.9096	-94.2973
5	19.6286	58.3024	98.8814	-21.3314	-59.2431	-95.6308
6	20.2001	57.9214	98.6909	-21.1409	-57.5285	-95.8213
7	19.8191	55.4448	96.7857	-20.3788	-58.8621	-95.8213
8	19.2476	57.1594	98.1193	-20.1883	-59.4337	-95.0593
9	20.7717	57.7309	97.5478	-22.8555	-58.6716	-95.8213
10	20.2001	57.9214	98.1193	-20.5693	-59.2431	-95.4403
11	20.0096	58.6835	96.9763	-19.9978	-58.8621	-94.8688
12	20.0096	57.7309	98.3098	-21.7124	-58.6716	-93.9162
13	20.2001	58.3024	96.7857	-21.3314	-59.0526	-94.8688
14	22.1052	59.4455	97.3573	-20.5693	-58.4811	-95.0593
15	20.5812	57.1594	98.6909	-21.3314	-57.9096	-95.0593
16	20.0096	57.9214	98.3098	-20.9503	-59.2431	-95.8213
17	20.7717	58.1119	97.5478	-20.5693	-59.2431	-95.0593
18	20.2001	56.9688	98.1193	-20.7598	-58.8621	-95.8213
19	20.9622	57.3499	98.5003	-19.6168	-59.0526	-96.2024
20	19.4381	58.874	98.1193	-19.9978	-58.4811	-95.2498
21	20.0096	57.9214	98.1193	-21.1409	-59.4337	-95.2498
22	19.4381	57.7309	97.1668	-20.7598	-58.4811	-95.2498
ค่าเฉลี่ย	20.1525	57.7690	97.9193	-20.7598	-58.7097	-95.3260
Std. dev.	0.4232	0.7009	0.6613	0.4867	0.5119	0.4210
Bias error	0.3754	0.882	1.7874	0.2319	0.0587	4.3807
Random error	0.8464	1.4019	1.3227	0.9734	1.0239	0.8420

ตารางที่ 5.10 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของความเร็วเชิงมุมแกน z
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกรุ่นที่ 2

ความเร็ว (degree/s)	20	60	100	-20	-60	-100
Encoder (degree/s)	20.5279	58.651	99.7067	-20.5279	-58.651	-99.7067
ครั้งที่	Gyroscope Measured Values (degree/s)					
1	19.6754	59.7963	101.3640	-21.3727	-60.0294	-99.1519
2	19.5165	60.8513	100.9820	-21.5636	-60.2203	-101.3910
3	20.6412	60.6827	101.3640	-21.3950	-60.4567	-101.4390
4	21.9933	59.9871	101.6540	-22.5403	-60.4567	-102.2010
5	18.3233	59.4145	101.8450	-20.6315	-60.0294	-100.1050
6	20.6412	59.4145	101.2720	-20.4406	-60.4791	-98.5803
7	18.7096	59.0560	102.5090	-22.6856	-60.8608	-102.3910
8	19.4823	60.6371	99.4771	-21.0133	-59.0517	-101.7730
9	19.1644	59.0560	99.3318	-22.3494	-60.7155	-99.3425
10	21.6070	59.9648	102.5310	-22.1586	-60.2426	-101.6290
11	18.1302	60.6371	100.7910	-22.7312	-60.2426	-100.1050
12	19.0960	60.6827	99.4548	-21.5859	-59.8152	-99.1519
13	20.6412	59.2013	99.0730	-21.2042	-60.8608	-99.1519
14	19.9370	62.2554	100.2180	-21.2583	-60.2882	-102.2010
15	21.2207	59.5831	101.3640	-21.5859	-59.0517	-100.1050
16	18.1302	60.6371	101.2720	-19.4862	-60.4791	-99.7236
17	19.7096	60.6371	102.9900	-20.8224	-60.2426	-99.7236
18	18.3575	60.1557	99.0730	-21.7768	-60.0973	-101.1540
19	18.3233	60.4919	99.8366	-20.2498	-60.2426	-99.7236
20	21.0276	60.9192	101.3640	-21.0133	-63.0517	-99.1519
21	18.3233	62.6371	100.6000	-20.6315	-60.7155	-100.2950
22	19.9370	60.8280	99.6457	-20.4406	-60.0517	-99.7236
ค่าเฉลี่ย	19.6232	60.2916	100.7975	-21.3360	-60.2300	-100.3621
Std. dev.	1.0768	0.7572	1.0470	0.7117	0.4886	1.0745
Bias error	0.9047	1.6406	1.0908	0.8081	1.5790	0.6554
Random error	2.1536	1.5144	2.0939	1.4233	0.9773	2.1490

5.3 การสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุม

ในการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมได้ใช้ไอโรสโคป LPY503AL จำนวน 2 ตัวในการทดลอง เช่นเดียวกับการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมในหัวข้อ 5.2 เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของไอโรสโคปราคาถูกรุ่นเดียวกัน ยี่ห้อเดียวกัน ผู้ผลิตเดียวกัน การสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมเป็นการให้ตำแหน่งเชิงมุมที่ทราบค่าเป็นอินพุตในการสอบเทียบและอ่านค่าเอาต์พุตจากไอโรสโคป โดยใช้การทดสอบแบบสุ่มซึ่งแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ

ส่วนที่ 1 การทดสอบแบบสุ่มโดยการเพิ่มค่าตำแหน่งเชิงมุมขึ้นเรื่อยๆเพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของเซนเซอร์ที่ทำการสอบเทียบ เนื่องจากไอโรสโคป LPY503AL มีค่าเต็มสเกลของความเร็วเชิงมุมที่วัดได้อยู่ที่ ± 120 degree/s จึงเลือกตั้งค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เป็น 50 degree/s สำหรับการเคลื่อนที่ไปทางมุมด้านบวกและ -50 degree/s สำหรับการเคลื่อนที่ไปทางมุมด้านลบและทำการสอบเทียบในช่วง -120 degree ถึง 120 degree ทั้งแกน x และแกน z เก็บข้อมูลในแต่ละค่าตำแหน่งเชิงมุมจำนวน 3 ข้อมูลและหาค่าเฉลี่ย ผลการสอบเทียบของไอโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 ในแกน x และแกน z แสดงดังตารางที่ 5.11 และ 5.12 ตามลำดับ ผลการสอบเทียบของไอโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 ในแกน x และแกน z แสดงดังตารางที่ 5.13 และ 5.14 ตามลำดับและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมของเอนโค้ดเดอร์และเอาต์พุตจากไอโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 ในแกน x และแกน z แสดงดังรูปที่ 5.14 และ 5.15 ตามลำดับ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมของเอนโค้ดเดอร์และเอาต์พุตจากไอโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 ในแกน x และแกน z แสดงดังรูปที่ 5.16 และ 5.17 ตามลำดับและใช้หลักการหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของข้อมูลเช่นเดียวกับการสอบเทียบความเร็วเชิงมุม

ส่วนที่ 2 การทดสอบแบบสุ่มโดยการสุ่มให้อินพุตตำแหน่งเชิงมุมค่าเดิมซ้ำ ๆ เพื่อดูความสามารถในการวัดซ้ำของเซนเซอร์ โดยเลือกตำแหน่งเชิงมุมที่ทำการสอบเทียบ 8 ค่าแต่ละค่าทำซ้ำ 22 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัด ผลการสอบเทียบไอโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 ในแกน x และแกน z แสดงดังตารางที่ 5.15 และ 5.16 ตามลำดับ ผลการสอบเทียบไอโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2 ในแกน x และแกน z แสดงดังตารางที่ 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ จากผลการสอบเทียบนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดระบบความผิดพลาดแบบสุ่ม ความสามารถในการวัดซ้ำรวมทั้งค่าความไม่แน่นอนของข้อมูลจากไอโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1 และ 2 ซึ่งได้แสดงค่าโดยสรุปในตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.11 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุมแกน x
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1

ความเร็ว (degree)	Encoder (degree)	Gyroscope Measured Values (degree)			ค่าเฉลี่ย	$y_L(x)$	$e_L(x)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
-120	-119.9410	-120.4850	-118.7660	-119.9690	-119.7400	-119.9397	0.1997
-110	-109.9710	-109.2870	-108.2550	-108.2420	-108.5947	-109.8769	1.2823
-100	-99.7067	-98.0880	-98.4318	-98.4318	-98.3172	-99.5172	1.2000
-90	-89.7361	-88.4365	-87.3232	-88.7802	-88.1800	-89.4538	1.2739
-80	-79.7654	-79.4725	-78.6130	-79.9568	-79.3474	-79.3904	0.0430
-70	-69.7947	-70.5085	-69.3053	-69.4772	-69.7637	-69.3270	-0.4367
-60	-59.5308	-59.4668	-58.4505	-60.6851	-59.5341	-58.9676	-0.5665
-50	-49.8534	-48.9709	-50.5179	-49.3147	-49.6012	-49.2002	-0.4009
-40	-39.8827	-40.3507	-40.5226	-40.9645	-40.6126	-39.1368	-1.4758
-30	-29.9120	-30.0116	-30.1210	-30.6991	-30.2772	-29.0734	-1.2039
-20	-19.9413	-20.3729	-20.3771	-20.2010	-20.3170	-19.0100	-1.3070
-10	-9.9707	-10.2057	-10.0338	-10.2057	-10.1484	-8.9466	-1.2018
10	9.6774	10.5932	10.9370	10.7651	10.7651	10.8842	-0.1191
20	19.6481	21.9124	21.5687	21.7405	21.7405	20.9476	0.7929
30	29.6188	30.2002	31.6845	31.5126	31.1324	31.0111	0.1214
40	39.5894	41.8005	40.7819	41.2976	41.2933	41.0744	0.2190
50	49.5601	52.6168	51.5855	52.7887	52.3303	51.1378	1.1925
60	59.5308	61.7014	61.0138	60.4982	61.0711	61.2012	-0.1301
70	69.2082	70.9579	69.7547	71.2761	70.6629	70.9686	-0.3057
80	79.4721	78.4955	81.7614	80.9020	80.3863	81.3280	-0.9417
90	89.7361	90.3303	92.7368	91.8774	91.6482	91.6874	-0.0393
100	99.4153	100.2740	101.3060	102.8530	101.4777	101.4567	0.0210
110	109.6770	112.1090	111.9370	112.4530	112.1663	111.8138	0.3525
120	119.6480	123.9440	123.9240	122.0530	123.3070	121.8775	1.4295

ตารางที่ 5.12 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุมแกน z
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1

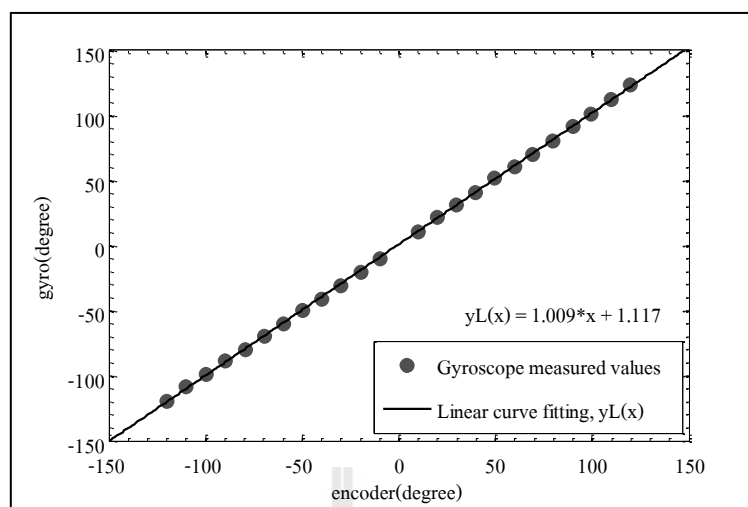
ความเร็ว (degree)	Encoder (degree)	Gyroscope Measured Values (degree)			ค่าเฉลี่ย	$y_L(x)$	$e_L(x)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
-120	-119.9410	-124.3520	-123.9800	-122.9590	-123.7637	-122.3594	-1.4042
-110	-109.9710	-109.9080	-112.8560	-112.6450	-111.8030	-112.1920	0.3890
-100	-99.7067	-101.0330	-100.8630	-103.3930	-101.7630	-101.7245	-0.0385
-90	-89.7361	-89.7697	-90.1099	-91.1303	-90.3366	-91.5565	1.2198
-80	-79.7654	-81.2566	-83.4676	-81.0865	-81.9369	-81.3884	-0.5485
-70	-69.7947	-69.9841	-70.4943	-71.5148	-70.6644	-71.2202	0.5558
-60	-59.5308	-61.3247	-62.0050	-62.9853	-62.1050	-60.7531	-1.3519
-50	-49.8534	-50.8724	-51.3826	-51.8928	-51.3826	-50.8841	-0.4985
-40	-39.8827	-41.5025	-42.0127	-41.6726	-41.7293	-40.7160	-1.0133
-30	-29.9120	-29.2255	-29.7357	-30.4478	-29.8030	-30.5479	0.7449
-20	-19.9413	-20.5200	-19.1594	-20.3499	-20.0098	-20.3797	0.3700
-10	-9.9707	-9.6035	-10.1614	-9.9437	-9.9029	-10.2117	0.3088
10	9.6774	11.0386	11.5497	11.2090	11.2658	9.8254	1.4403
20	19.6481	20.4966	20.8373	20.4966	20.6102	19.9935	0.6166
30	29.6188	29.9396	31.3024	30.7914	30.6778	30.1617	0.5161
40	39.5894	41.1528	40.9828	41.3229	41.1528	40.3297	0.8232
50	49.5601	49.1145	50.3050	50.8152	50.0782	50.4978	-0.4196
60	59.5308	60.9842	61.5385	62.6032	61.7086	60.6659	1.0427
70	69.2082	69.6297	68.9494	69.5855	69.3882	70.5349	-1.1467
80	79.4721	82.5293	80.8227	81.6890	81.6803	81.0020	0.6783
90	89.7361	89.4234	91.9745	92.6548	91.3509	91.4693	-0.1184
100	99.4153	99.9774	101.0140	99.1429	100.0448	101.3401	-1.2954
110	109.6770	109.4890	110.4450	112.5470	110.8270	111.8050	-0.9780
120	119.6480	120.4510	122.7880	123.0020	122.0803	121.9734	0.1069

ตารางที่ 5.13 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุมแกน x
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 2

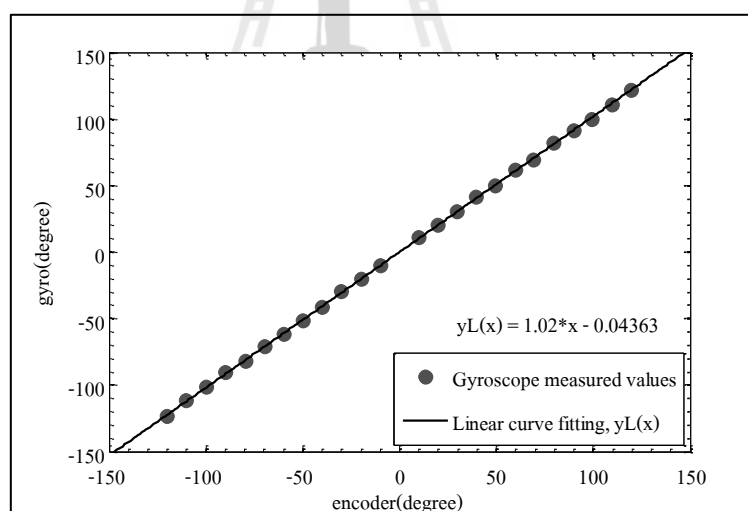
ความเร็ว (degree)	Encoder (degree)	Gyroscope Measured Values (degree)			ค่าเฉลี่ย	$y_L(x)$	$e_L(x)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
-120	-119.9410	-117.6360	-119.2590	-119.0870	-118.6607	-120.2170	1.5563
-110	-109.9710	-109.1140	-108.9100	-108.6270	-108.8837	-110.0945	1.2108
-100	-99.7067	-99.7185	-100.5800	-99.2013	-99.8333	-99.6731	-0.1602
-90	-89.7361	-88.5690	-89.7756	-89.0861	-89.1436	-89.5500	0.4064
-80	-79.7654	-78.6261	-80.0051	-79.1432	-79.2581	-79.4267	0.1686
-70	-69.7947	-69.8889	-68.3385	-68.1661	-68.7978	-69.3035	0.5056
-60	-59.5308	-59.1931	-58.1588	-58.1880	-58.5133	-58.8825	0.3692
-50	-49.8534	-49.3146	-49.4870	-49.4870	-49.4295	-49.0571	-0.3725
-40	-39.8827	-39.3717	-40.4060	-40.4060	-40.0612	-38.9338	-1.1274
-30	-29.9120	-29.7736	-30.4356	-30.4356	-30.2149	-28.8106	-1.4044
-20	-19.9413	-20.8375	-20.6652	-20.8325	-20.7784	-18.6873	-2.0911
-10	-9.9707	-10.2052	-10.5499	-10.3775	-10.3775	-8.5641	-1.8134
10	9.6774	11.7712	11.4265	11.2541	11.4839	11.3846	0.0993
20	19.6481	22.3750	22.2026	22.3750	22.3175	21.5078	0.8097
30	29.6188	31.5998	32.8064	32.2895	32.2319	31.6311	0.6008
40	39.5894	42.7207	42.3623	41.8451	42.3094	41.7542	0.5551
50	49.5601	50.6638	51.1810	51.3533	51.0660	51.8775	-0.8114
60	59.5308	59.5100	61.0614	61.5785	60.7166	62.0007	-1.2841
70	69.2082	71.6314	71.9761	72.1485	71.9187	71.8262	0.0925
80	79.4721	82.7184	82.0289	82.1219	82.2897	82.2471	0.0426
90	89.7361	92.7713	92.7713	93.1331	92.8919	92.6682	0.2237
100	99.4153	103.6860	102.8240	102.6520	103.0540	102.4955	0.5585
110	109.6770	113.3920	112.3600	112.0150	112.5890	112.9142	-0.3252
120	119.6480	125.5150	125.6880	124.4810	125.2280	123.0377	2.1903

ตารางที่ 5.14 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของตำแหน่งเชิงมุมแกน z
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 2

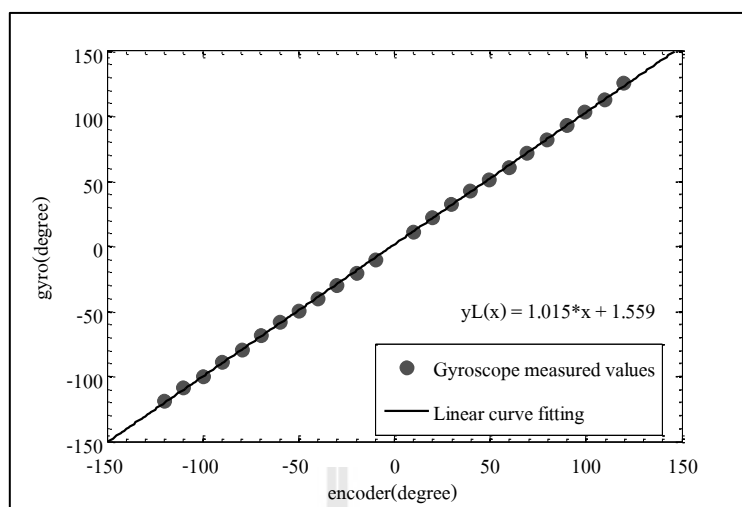
ความเร็ว (degree)	Encoder (degree)	Gyroscope Measured Values (degree)			ค่าเฉลี่ย	$y_L(x)$	$e_L(x)$
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
-120	-119.9410	-117.3240	-119.7210	-120.0640	-119.0363	-120.9793	1.9430
-110	-109.9710	-109.9060	-110.3030	-111.6180	-110.6090	-110.9316	0.3226
-100	-99.7067	-100.2050	-99.9198	-101.6870	-100.6039	-100.5872	-0.0167
-90	-89.7361	-90.9607	-88.3924	-90.7895	-90.0475	-90.5388	0.4913
-80	-79.7654	-80.8031	-80.2318	-81.6592	-80.8980	-80.4904	-0.4077
-70	-69.7947	-72.8136	-71.0711	-71.8695	-71.9181	-70.4419	-1.4762
-60	-59.5308	-60.9582	-61.4719	-60.7629	-61.0643	-60.0979	-0.9664
-50	-49.8534	-51.7639	-52.4215	-51.5927	-51.9260	-50.3451	-1.5810
-40	-39.8827	-41.3406	-41.1453	-39.7997	-40.7619	-40.2966	-0.4653
-30	-29.9120	-30.6022	-30.5781	-31.6054	-30.9286	-30.2481	-0.6805
-20	-19.9413	-19.6925	-19.8637	-19.6925	-19.7496	-20.1996	0.4501
-10	-9.9707	-9.4677	-10.1526	-9.8102	-9.8102	-10.1512	0.3411
10	9.6774	11.2493	11.0781	11.6158	11.3144	9.6501	1.6643
20	19.6481	20.3719	20.2007	20.5431	20.3719	19.6986	0.6733
30	29.6188	28.1247	29.6897	29.3232	29.0459	29.7470	-0.7012
40	39.5894	39.1547	38.7882	39.9867	39.3099	39.7954	-0.4855
50	49.5601	48.9381	50.1366	49.4517	49.5088	49.8439	-0.3351
60	59.5308	61.1666	60.4817	61.3378	60.9954	59.8923	1.1030
70	69.2082	69.9467	69.0666	70.0938	69.7024	69.6452	0.0571
80	79.4721	79.7301	81.9559	79.0452	80.2437	79.9892	0.2546
90	89.7361	91.1025	90.2464	91.7633	91.0374	90.3332	0.7042
100	99.4153	100.3720	100.1770	101.0570	100.5353	100.0879	0.4474
110	109.6770	110.4980	108.4670	110.5220	109.8290	110.4297	-0.6007
120	119.6480	119.9870	118.4220	120.8190	119.7427	120.4785	-0.7358



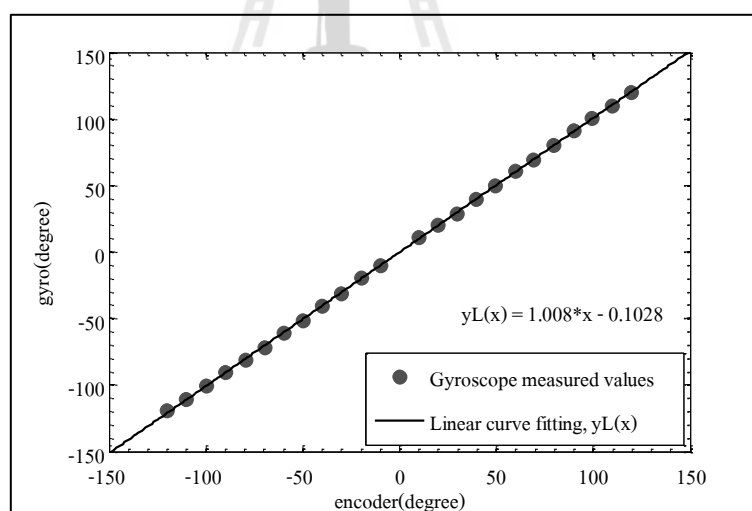
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมแกน x ของเอ็นโค้ดเดอร์
และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมแกน z ของเอ็นโค้ดเดอร์
และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 1



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมแกน x ของเอ็นโค้ดเดอร์
และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2



รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเชิงมุมแกน z ของเอ็นโค้ดเดอร์
และไจโรสโคป LPY503AL ตัวที่ 2

ตารางที่ 5.15 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุมแกน x
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกตัวที่ 1

ความเร็ว (degree)	30	60	90	120	-120	-90	-60	-30
Encoder (degree)	29.6188	59.5308	89.4428	119.6480	-119.9410	-89.7361	-59.5308	-29.9120
ครั้งที่	Gyroscope Measured Values (degree)							
1	31.8785	61.2017	93.0241	122.9120	-119.2200	-89.7882	-59.0369	-30.7879
2	32.5646	61.3733	93.8817	122.8170	-119.3910	-87.9015	-59.5823	-30.6155
3	31.7070	60.8587	93.3672	122.8170	-120.4110	-90.9888	-58.8648	-30.0984
4	32.5646	61.8878	92.1730	122.9890	-119.9010	-88.9302	-59.9276	-30.2708
5	31.8785	61.0302	93.7167	122.7820	-119.5400	-89.6166	-59.2369	-29.7536
6	32.3931	60.3441	93.7167	122.6110	-121.2620	-89.4451	-58.8382	-30.4432
7	31.8785	60.6872	93.0371	121.1120	-119.5610	-89.4030	-59.5243	-30.7879
8	31.7070	61.2017	92.8656	121.1120	-118.8800	-89.2736	-59.6959	-29.5812
9	32.0500	59.3150	93.7232	122.4730	-118.5400	-89.9193	-59.9984	-30.0987
10	32.3921	60.3441	92.5290	122.3030	-119.3910	-89.7882	-59.3811	-29.1871
11	31.8584	60.1726	91.8429	122.3030	-119.3910	-89.1021	-59.3811	-29.7034
12	32.7160	61.2017	92.5290	122.6430	-118.8800	-88.9306	-59.2090	-29.8883
13	32.5445	60.5157	92.0145	122.8130	-120.0710	-88.4160	-59.8967	-30.9080
14	31.3439	61.3733	91.8429	121.9630	-120.3950	-90.1312	-59.8764	-29.0150
15	31.7160	61.5448	92.1860	122.8130	-121.2530	-91.1603	-58.9694	-29.1871
16	32.8775	60.3441	90.6423	122.3030	-120.5670	-89.6166	-59.8974	-30.0476
17	31.1724	60.8587	92.5290	122.8130	-120.0520	-89.4451	-58.9648	-30.7359
18	32.0300	60.2801	92.0145	121.9630	-120.0520	-89.6166	-58.9627	-29.0150
19	32.7160	60.1086	91.3284	121.9630	-119.8810	-90.6076	-58.9627	-29.7034
20	32.4450	61.6522	93.0436	122.3030	-119.5250	-89.9193	-58.8648	-30.0569
21	31.8584	59.5944	93.0436	122.1330	-120.9100	-90.2635	-58.9772	-29.7034
22	32.2015	60.7946	91.1569	122.1330	-120.0520	-89.7472	-58.9764	-29.8823
ค่าเฉลี่ย	32.1222	60.7741	92.5842	122.3987	-119.8662	-89.6474	-59.3094	-29.9774
Std. dev.	0.3959	0.5516	0.7635	0.4465	0.6318	0.5920	0.3877	0.5264
Bias err.	2.5034	1.2433	3.1414	2.7507	0.0748	0.0887	0.2214	0.0654
Random err.	0.7918	1.1032	1.5269	0.8931	1.2635	1.1840	0.7754	1.0528

ตารางที่ 5.16 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุมแกน z
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกรุ่นที่ 1

ความเร็ว (degree)	30	60	90	120	-120	-90	-60	-30
Encoder (degree)	29.6188	59.5308	89.4428	119.6480	-119.9410	-89.7361	-59.5308	-29.9120
ครั้งที่	Gyroscope Measured Values (degree)							
1	29.9396	60.9842	89.4234	120.4510	-122.3520	-89.7697	-60.5765	-29.2255
2	31.3024	61.5385	91.9745	122.7880	-121.9800	-90.1099	-61.3247	-29.7357
3	30.7914	62.6032	91.6548	122.0020	-121.9590	-91.1303	-62.0050	-29.2255
4	29.7692	62.2188	91.6344	121.4720	-122.4900	-89.5996	-62.6853	-30.4478
5	31.4728	61.7085	90.8453	119.6010	-121.5990	-90.4500	-61.4948	-29.9058
6	31.4728	62.5589	89.8894	122.3220	-122.6190	-92.1507	-62.2920	-29.2255
7	30.7914	61.2426	90.7840	120.2370	-120.9800	-90.6201	-61.3247	-29.7675
8	31.3024	62.4331	89.9337	120.7470	-121.4700	-90.9602	-61.1546	-29.5656
9	30.1099	62.9433	90.1037	120.9610	-122.8300	-90.2799	-60.1750	-29.7357
10	31.4728	61.9229	91.1242	120.5330	-122.4900	-91.9807	-60.8553	-30.9262
11	30.9617	61.5827	90.2738	121.1320	-122.7890	-91.4704	-60.6029	-30.0917
12	30.4507	61.4127	90.2738	119.7300	-122.7890	-90.1099	-61.8349	-34.6837
13	31.1321	61.7528	90.7398	119.6010	-120.5100	-93.8515	-61.3247	-30.0758
14	30.7914	62.4331	91.5901	120.9610	-123.1290	-90.9602	-61.7818	-29.2255
15	30.9617	62.6032	91.6344	120.4920	-120.5780	-90.7901	-62.3451	-31.0963
16	30.6210	62.0930	90.7840	120.9170	-120.6800	-90.6201	-61.3539	-29.5656
17	30.2803	60.5180	90.9541	119.9410	-122.1090	-91.1629	-61.4948	-31.0963
18	30.7914	61.0283	90.1037	121.0870	-121.1910	-89.5996	-61.4036	-29.3956
19	30.1099	61.4127	90.9098	118.9210	-122.5100	-92.3208	-61.1750	-29.2255
20	30.6210	60.8582	90.5697	118.9580	-123.8420	-92.4909	-62.1219	-30.0758
21	30.4507	62.0930	90.1037	118.9210	-120.5510	-90.6814	-60.6736	-29.5656
22	30.2803	61.2426	89.7636	119.2610	-120.6600	-91.3329	-60.0254	-29.5656
ค่าเฉลี่ย	30.7317	61.7862	90.6835	120.4664	-121.7878	-90.9495	-61.3657	-29.8757
Std. dev.	0.4600	0.5722	0.6215	0.9432	0.8981	0.8238	0.5927	0.6024
Bias err.	1.1129	2.2554	1.2407	0.8183	1.8467	1.2134	1.8349	0.0363
Random err.	0.9201	1.1445	1.2429	1.8864	1.7962	1.6477	1.1853	1.2048

ตารางที่ 5.17 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุมแกน x
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกรุ่นที่ 2

ความเร็ว (degree)	30	60	90	120	-120	-90	-60	-30
Encoder (degree)	29.6188	59.5308	89.4428	119.6480	-119.9410	-89.7361	-59.5308	-29.9120
ครั้งที่	Gyroscope Measured Values (degree)							
1	31.6099	61.4062	93.2884	124.8260	-119.9490	-88.5610	-57.8785	-30.8079
2	31.9647	61.4062	93.8055	125.1710	-117.8800	-88.9663	-58.5680	-30.1184
3	31.6199	61.5785	93.1160	124.6530	-119.9490	-88.2242	-59.7746	-30.2633
4	31.6199	61.7509	94.3226	124.9980	-120.2940	-88.7413	-58.2232	-30.4931
5	31.9647	61.0614	93.4608	122.9300	-120.4660	-89.7756	-59.2575	-29.9460
6	32.4818	63.3023	93.9779	124.4810	-119.2590	-88.3966	-58.2232	-29.6013
7	31.7923	61.4062	94.4950	124.3090	-117.7080	-89.2585	-58.2232	-29.9460
8	31.7923	60.5443	93.1435	125.5150	-118.3980	-88.7413	-58.7404	-30.8079
9	31.9647	62.0957	93.1160	124.8260	-119.4300	-88.0518	-58.3956	-30.6355
10	31.9647	61.7509	92.9436	124.4810	-119.4320	-88.5690	-58.9127	-30.1184
11	32.1371	61.7705	93.2884	124.9980	-118.5700	-87.6728	-58.2232	-29.0841
12	31.7923	60.8890	93.1160	124.3090	-119.9490	-88.7413	-59.0851	-29.6013
13	31.2752	61.5785	94.3226	124.4810	-119.4320	-88.0518	-58.2232	-30.2908
14	32.1371	62.7852	93.9776	124.9980	-119.7770	-87.7071	-58.3956	-30.6080
15	31.6199	61.0614	93.1160	123.9640	-120.9830	-88.1518	-59.4299	-30.1184
16	32.3094	62.4404	93.4608	123.7920	-119.6040	-88.2422	-58.2232	-29.7461
17	31.4476	61.6004	93.2884	124.6530	-119.0870	-88.5960	-57.5337	-30.2908
18	32.3094	62.4404	93.4608	125.3430	-119.2590	-88.4441	-58.5680	-30.1184
19	32.1371	61.9233	92.5989	125.5150	-119.9490	-88.3996	-59.2575	-29.9185
20	31.6199	60.8890	94.4950	123.2740	-119.5950	-87.5347	-58.5690	-30.1184
21	32.4818	62.6128	93.1160	125.1710	-119.4320	-87.8794	-58.2232	-29.4600
22	32.8266	61.2338	92.7713	124.4810	-118.2250	-88.7413	-58.0508	-29.4289
ค่าเฉลี่ย	31.9383	61.6840	93.4794	124.6362	-119.3968	-88.4069	-58.5336	-30.0815
Std. dev.	0.3083	0.5603	0.4989	0.5448	0.6840	0.4141	0.4425	0.3878
Bias err.	2.3195	2.1532	4.0366	4.9882	0.5442	1.3292	0.9972	0.1695
Random err.	0.6166	1.1207	0.9977	1.0896	1.3679	0.8281	0.8850	0.7757

ตารางที่ 5.18 การทดสอบแบบสุ่มเพื่อหาค่าความสามารถในการวัดซ้ำของตำแหน่งเชิงมุมแกน z
สำหรับไจโรสโคปราคาถูกรุ่นที่ 2

ความเร็ว (degree)	30	60	90	120	-120	-90	-60	-30
Encoder (degree)	29.6188	59.5308	89.4428	119.6480	-119.9410	-89.7361	-59.5308	-29.9120
ครั้งที่	Gyroscope Measured Values (degree)							
1	29.1247	61.1666	91.1025	119.9870	-118.3240	-90.9607	-60.9582	-30.6022
2	29.6897	60.4817	90.2464	119.4220	-119.7210	-89.3924	-61.4719	-30.5781
3	29.3232	61.3378	91.7633	120.2160	-120.0640	-90.7895	-60.7629	-31.6054
4	28.8096	63.0499	92.1603	120.8190	-120.4060	-90.6182	-59.4173	-31.8997
5	30.7170	60.3105	90.7360	123.3870	-119.2080	-91.4743	-58.3659	-31.1158
6	29.8369	60.4817	91.1265	120.4770	-119.5230	-90.6182	-60.6158	-31.2630
7	30.4468	61.3378	90.9313	120.3600	-120.2350	-91.1561	-60.9582	-31.5573
8	29.5185	60.4817	91.1330	119.7640	-121.4330	-91.9576	-60.5917	-31.8007
9	31.2066	60.7075	91.9345	119.8160	-120.6320	-90.6182	-61.9887	-30.5781
10	31.8915	61.3378	89.7087	119.2230	-120.2350	-91.1015	-60.9582	-31.0918
11	31.7443	60.6802	90.9072	120.9900	-118.8650	-91.4743	-60.7870	-30.4069
12	29.6657	59.1120	90.2223	120.1340	-120.4060	-91.5302	-60.9341	-31.4583
13	30.0081	59.9681	90.5648	118.5930	-120.7490	-90.9607	-61.1294	-32.6327
14	28.4672	61.5090	90.2464	120.9430	-121.0910	-90.7895	-59.9309	-31.4342
15	29.6657	59.2832	91.4449	119.9870	-118.8650	-89.6468	-61.6431	-32.1191
16	29.4399	59.9681	92.2769	119.7920	-119.7210	-90.6728	-60.4446	-30.4310
17	29.6384	59.2832	90.5888	120.4770	-121.1180	-91.1592	-61.6463	-31.9478
18	29.5185	61.0435	90.3935	119.4220	-118.0090	-92.6407	-60.6158	-30.7493
19	30.8642	60.6256	90.7360	118.5930	-119.2080	-91.4167	-59.9309	-30.5781
20	30.0081	59.6256	91.5921	118.7640	-121.4060	-90.5016	-60.2493	-29.8933
21	30.6930	59.9681	90.3935	118.2750	-120.2350	-90.7318	-60.2252	-31.7766
22	30.5217	59.7696	91.5921	119.7100	-120.9200	-91.7591	-59.3932	-31.2630
ค่าเฉลี่ย	30.0220	60.4684	90.9908	119.8745	-120.0466	-90.9969	-60.6332	-31.2128
Std. dev.	0.7468	0.6913	0.5952	0.7200	0.8492	0.5254	0.6406	0.5603
Bias err.	0.4032	0.9376	1.5480	0.2265	0.1056	1.2608	1.1024	1.3008
Random err.	1.4937	1.3826	1.1904	1.4400	1.6985	1.0508	1.2813	1.1206

5.4 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสอบเทียบ

จากการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 5.19

ตารางที่ 5.19 ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับไจโรสโคปตัวที่ 1 และ 2

Parameter	Gyroscope LPY503AL ตัวที่ 1		Gyroscope LPY503AL ตัวที่ 2	
	แกน x	แกน z	แกน x	แกน z
Bias (V)	1.263	1.257	1.273	1.270
1/(Scaling Factor) (V/(degree/s))	0.0059482	0.0059831	0.0059446	0.0058663

จากการทดสอบการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปและโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติสำหรับการสอบเทียบความเร็วเชิงมุม ผลการทำงานสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบให้เป็นไปตามขั้นตอนการสอบเทียบ สามารถเก็บข้อมูลความเร็วเชิงมุมที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์และไจโรสโคปและแสดงผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล ค่าความสามารถในการวัดซ้ำ ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่มรวมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชุดข้อมูลได้ โดยสรุปผลการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมแสดงดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 ผลการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมสำหรับไจโรสโคปตัวที่ 1 และ 2

Parameter	Gyroscope LPY503AL ตัวที่ 1		Gyroscope LPY503AL ตัวที่ 2	
	แกน x	แกน z	แกน x	แกน z
Maximum Linearity Error	-2.2593	-1.3776	-2.9624	1.5981
Non-linearity Error (%FS)	1.13	0.69	1.48	0.79
Maximum Standard Deviation	1.0885	1.2681	0.7009	1.0768
Repeatability (%FS)	1.09	1.27	0.70	1.07
Maximum Bias Error	3.4731	2.7924	4.3807	1.6406
Maximum Random Error	2.1769	2.5363	1.4019	2.1536
Uncertainty (type A)	0.50	0.58	0.33	0.50

จากการทดสอบการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบไจโรสโคปและโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติสำหรับการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุม ผลการทำงานสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบให้เป็นไปตามขั้นตอนการสอบเทียบ สามารถเก็บข้อมูลตำแหน่งเชิงมุมที่ได้จากเอ็นโค้ดเดอร์และไจโรสโคปและแสดงผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล ค่าความสามารถในการวัดซ้ำ ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่มรวมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชุดข้อมูลได้ โดยสรุปผลการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมแสดงดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 ผลการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมสำหรับไจโรสโคปตัวที่ 1 และ 2

Parameter	Gyroscope LPY503AL ตัวที่ 1		Gyroscope LPY503AL ตัวที่ 2	
	แกน x	แกน z	แกน x	แกน z
Maximum Linearity Error	-1.4758	1.4403	2.1903	1.9430
Non-linearity Error (%FS)	0.61	0.60	0.91	0.81
Maximum Standard Deviation	0.7635	0.9432	0.6840	0.8492
Repeatability (%FS)	0.63	0.78	0.57	0.70
Maximum Bias Error	3.1414	2.2554	2.0874	0.6450
Maximum Random Error	1.5269	1.8864	2.7359	3.3970
Uncertainty (type A)	0.36	0.44	0.31	0.39

ผลการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมแสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและชัดเจนให้กับสัญญาณนั้นทำให้การอินทิเกรตสัญญาณความเร็วเชิงมุมเป็นตำแหน่งเชิงมุมมีความถูกต้อง ทำให้ไจโรสโคปราคาถูกละสามารถบอกตำแหน่งเชิงมุมได้ดีขึ้น

5.5 สรุป

จากผลการทดลองโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติมีขั้นตอนการทำงานเริ่มจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ การสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมตามลำดับ ในการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้จากวิธี Gradient Method ร่วมกับการกรองสัญญาณรบกวนโดยใช้ตัวกรองคาลมานนั้นสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพและเมื่อทำการชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้กับสัญญาณไจโรสโคป ทำให้สัญญาณ

มีความถูกต้องมากขึ้น สำหรับตัวกรองคาลมานที่ได้ทำการออกแบบนั้นสามารถกรองสัญญาณรบกวนได้ในระดับหนึ่ง หากสัญญาณรบกวนมีมากขึ้นค่า Kalman Gain ที่ได้ออกแบบไว้ อาจไม่เหมาะสม ซึ่งส่งผลถึงประสิทธิภาพในการประมาณค่าพารามิเตอร์ จึงควรปรับเปลี่ยนตัวกรองคาลมานให้เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้ตัวกรองคาลมานสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในส่วนของการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมซึ่งได้เลือกใช้การทดสอบแบบสุ่มนั้น โปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถรับข้อมูลความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมจากมอเตอร์ในแต่ละแนวแกนและสัญญาณจากไจโรสโคปเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณและแสดงผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล ค่าความสามารถในการวัดซ้ำ ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่มรวมทั้งค่าความไม่แน่นอนของชุดข้อมูลได้

จากการทดลองโดยใช้ไจโรสโคปราคาถูกรุ่นเดียวกันจากผู้ผลิตเดียวกัน ผลการประมาณค่าพารามิเตอร์แสดงให้เห็นความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากไจโรสโคปแต่ละตัว ซึ่งต่างจากค่าที่กำหนดในคู่มือการใช้งานของผู้ผลิตเซ็นเซอร์ ความแตกต่างกันของเซ็นเซอร์แต่ละตัวนี้เป็นปัญหาที่สำคัญของเซ็นเซอร์ไจโรสโคปราคาถูก กระบวนการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาเพื่อให้สามารถใช้งานไจโรสโคปราคาถูกแต่ละตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมแบบอัตโนมัติของไจโรสโคปราคาถูกใน 2 แกนคือแกน x และแกน z ซึ่งสามารถสรุปผลงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

1. การออกแบบและสร้างเครื่องสอบเทียบไจโรสโคป ได้ออกแบบให้ประกอบด้วย 2 แกนหมุน มีโครงสร้างของเครื่องเป็นอะลูมิเนียมและเลือกใช้เซอร์โวมอเตอร์ที่มีการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ด้วยตัวควบคุมแบบพีดีเป็นอุปกรณ์ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เพื่อเป็นอินพุตความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมให้กับการสอบเทียบ

2. ได้ออกแบบตัวกรองคาลมานสำหรับการกรองสัญญาณรบกวนและออกแบบตัวชดเชยแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธี Gradient Method ในการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink จากผลการจำลองสถานการณ์ตัวกรองคาลมานสามารถกรองสัญญาณรบกวนจากสัญญาณไจโรสโคปได้และตัวชดเชยแบบปรับค่าได้สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้

3. ได้ออกแบบโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม LabVIEW สามารถแบ่งการทำงานของโปรแกรมเป็น 3 ส่วนได้แก่

- การกรองสัญญาณรบกวนด้วยตัวกรองคาลมานและการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้ตัวชดเชยแบบปรับค่าได้ซึ่งสามารถประมาณค่าที่เหมาะสมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าจะแสดงบนหน้าต่างของโปรแกรมและชดเชยให้กับสัญญาณไจโรสโคปในการสอบเทียบต่อไป

- การสอบเทียบความเร็วเชิงมุม ด้วยการทดสอบแบบสุ่ม โปรแกรมจะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปด้วยความเร็วเชิงมุมที่ได้กำหนดไว้ ทำการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลแล้วแสดงผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้น ค่าความผิดพลาดระบบ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ค่าความสามารถในการทำซ้ำและค่าความไม่แน่นอนของความเร็วเชิงมุม

- การสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุม ด้วยการทดสอบแบบสุ่ม โปรแกรมจะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปที่ตำแหน่งเชิงมุมที่ได้กำหนดไว้ ทำการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลแล้วแสดงผล

ค่าความไม่เป็นเชิงเส้น ค่าความผิดพลาดระบบ ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ค่าความสามารถในการทำซ้ำและค่าความไม่แน่นอนของตำแหน่งเชิงมุม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติสามารถควบคุมการทำงานของเครื่องสอบเทียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถรับข้อมูลความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมจากมอเตอร์และสัญญาณจากไจโรสโคปเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณและแสดงผลค่าความไม่เป็นเชิงเส้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล ค่าความสามารถในการวัดซ้ำ ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่มรวมทั้งค่าความไม่แน่นอน เพื่อใช้ประกอบในกระบวนการวัดและการควบคุมซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของไจโรสโคปราคาถูก

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การออกแบบเครื่องสอบเทียบที่มีการหมุนได้ควรพิจารณาถึงความสมดุลของน้ำหนักและการรับโหลดของมอเตอร์ที่เลือกใช้ เพื่อให้มอเตอร์ไม่เกิดความเสียหายและทำให้เครื่องสอบเทียบหมุนได้อย่างสมดุล

2. ความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องสอบเทียบนั้นมีความละเอียดในการรับ-ส่งข้อมูลของมอเตอร์ขนาด 10 bit ซึ่งมีความละเอียดพอสมควรแต่ด้วยช่วงข้อมูลที่กว้าง (± 150 degree) ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

3. การออกแบบตัวกรองคาลมานและตัวชดเชยแบบปรับตัวได้ในโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้ง่ายจึงเป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในการออกแบบระบบก่อนทำการทดสอบจริง แต่ในการใช้งานจริงอาจมีตัวแปรอื่นเข้ามาส่งผลกระทบต่อข้อมูลที่ทำกรสอบเทียบ เมื่อทำการเขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องสอบเทียบในโปรแกรม LabVIEW จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ทำการออกแบบไปแล้วให้มีความเหมาะสมในการใช้งานจริง

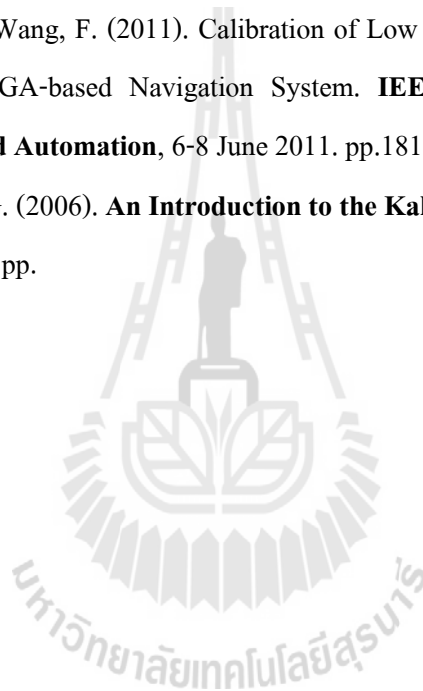
4. โปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติมีช่วงของการสอบเทียบของความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมกำหนดอยู่ในโปรแกรม หากไจโรสโคปที่นำมาสอบเทียบมีช่วงการใช้งานที่กว้างกว่านี้ค่าที่ได้จากการสอบเทียบอาจไม่ครอบคลุมทุกช่วงการใช้งาน แต่หากไจโรสโคปที่นำมาทดสอบมีช่วงการใช้งานแคบกว่าช่วงที่กำหนดไว้ อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเซนเซอร์เนื่องจากการใช้งานเกินช่วงที่กำหนด ดังนั้นในการทดสอบไจโรสโคปจึงต้องคำนึงถึงช่วงการใช้งานและปรับเปลี่ยนช่วงในการสอบเทียบให้เหมาะสม

5. ผลการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมของไจโรสโคปที่ได้นำเสนอขึ้นไม่ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การศึกษาผลของอุณหภูมิในการใช้งานกับค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานของไจโรสโคปราคาถูกให้มากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- เจษฎ์ รัศมียุทธอง และ จักรี ศรีนนท์ฉัตร (2555). การใช้ประโยชน์ตัวพารามิเตอร์ Q และ R ของตัวกรองคาลมานสำหรับลดสัญญาณรบกวน แบบไวท์เกาส์เซียนในการบีบอัดสัญญาณเสียง. **การประชุมเครือข่ายวิชาการบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1**, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต. 18 ธันวาคม 2555. 8 หน้า.
- กฤษฎา แสงเพชรส่อง (2547). แนวคิดพื้นฐานและหลักการทำงานของ Kalman Filter Algorithm. **วารสารโรงเรียนนายเรือ**. ปีที่ 4; ฉบับที่ 4; ตุลาคม – ธันวาคม 2547. หน้า 37-48
- พิพัฒน์ อมตนาथा (2556). **การวัดและเครื่องมือวัด**. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. 676 หน้า
- สราวุฒิ สุจิตจร (2546). **การควบคุมอัตโนมัติ**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า. ธันวาคม 2546. 456 หน้า.
- Fei, J., and Ding, H. (2010). System Dynamics and Adaptive Control for MEMS Gyroscope Sensor. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, Vol.7; No.4, December 2010. pp.77-82.
- Figliola, R.S., and Beasley, D.E. (2006). **Theory and design for mechanical measurements**. (4th edition); Copyright 2006, John Wiley & Sons (Asia). 514 pp.
- Lai, Y.C., Jan, S.S., and Hsiao, F.B. (2010). Development of a Low-Cost Attitude and Heading Reference System Using a Three-Axis Rotating Platform. **Sensors**, Vol.10; No.4, 24 March 2010. pp.2472-2491.
- Leavitt, J., Sideris, A., and Bobrow, J.E. (2006). High bandwidth tilt measurement using low-cost sensors. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, Vol.11; No.3, June 2006. pp.320-327.
- Lim, K.Y., Goh, F.Y.K., Dong, W., Nguyen, K.D., Chen, I.M., Yeo, S.H., Duh, H.B.L., and Kim, C.G. (2008). A Wearable Self-Calibrating, Wireless Sensor Network for Body Motion Processing. **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 19-23 May 2008. pp.1017-1022.

- Nebot, E., and Durrant-Whyte, H. (1999). Initial calibration and alignment of low-cost inertial navigation units for land vehicle applications. **Journal of Robotics Systems**, Vol.16; No.2, February 1999. pp.81–92.
- Ogata, K. (2002). **Modern Control Engineering**. (4th Edition); Prentice Hall PTR. 970 pp.
- Park, S., and Horowitz, R. (2005). Discrete time adaptive control for a MEMS gyroscope. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, Vol.19; No.6, April 2005. pp.485-503.
- Wang, L., Hao, Y., and Wang, F. (2011). Calibration of Low Cost MEMS Inertial Measurement Unit for an FPGA-based Navigation System. **IEEE International Conference on Information and Automation**, 6-8 June 2011. pp.181-186.
- Welch, G., and Bishop, G. (2006). **An Introduction to the Kalman Filter**. UNC-Chapel Hill. 24 July 2006. 16 pp.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลทางเทคนิคของ ROBOTIS

Dynamixel Servo Motor

ก.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ ROBOTIS Dynamixel RX-28 servo motor

1-3. Specifications of RX-28

	RX-28	
Weight(g)	72	
Dimension (mm)	35.6 × 50.6 × 35.5	
Gear Reduction Ratio	1/193	
Applied Voltage (V)	at 12V	at 16V
Final Reduction Stopping Torque (kgf.cm)	28.3	37.7
Speed (Sec/60 degrees)	0.167	0.126

Resolution	0.29°
Running Degree	300°, Endless Turn
Voltage	12V~16V (Recommended voltage: 14.4V)
Max Current	1200mA
Running Temperature	-5℃ ~ +85℃
Command Signal	Digital Packet
Protocol	RS485 Asynchronous Serial Communication (8bit, 1stop, No Parity)
Link (Physical)	RS485 Multi Drop Bus
ID	254 ID (0~253)
Communication Speed	7343bps ~ 1 Mbps
Sensing & Measuring	Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc.
Material Quality	Full Metal Gear, Engineering Plastic Body
Motor	Maxon RE-MAX
Standby Current	50 mA

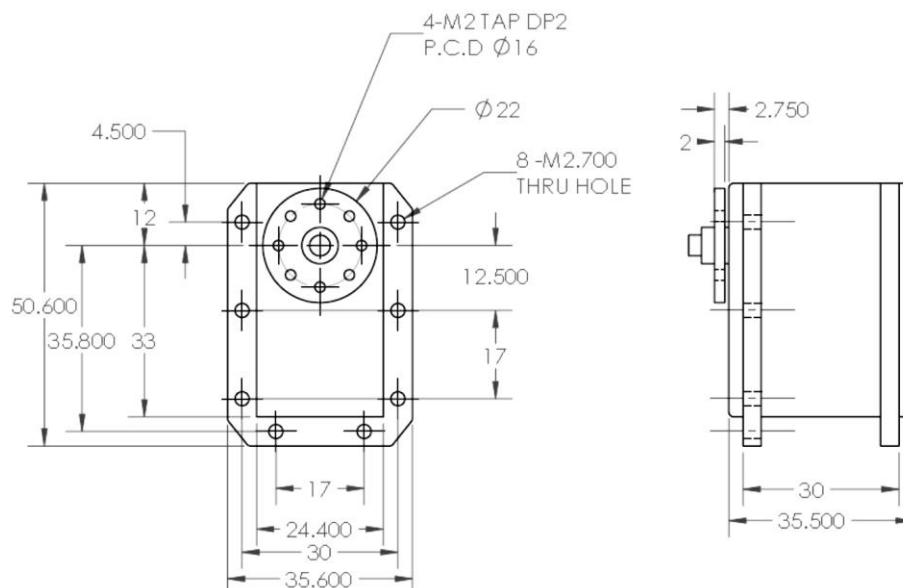
ก.2 ข้อมูลทางเทคนิคของ ROBOTIS Dynamixel RX-64 servo motor

1-3. Specifications of RX-64

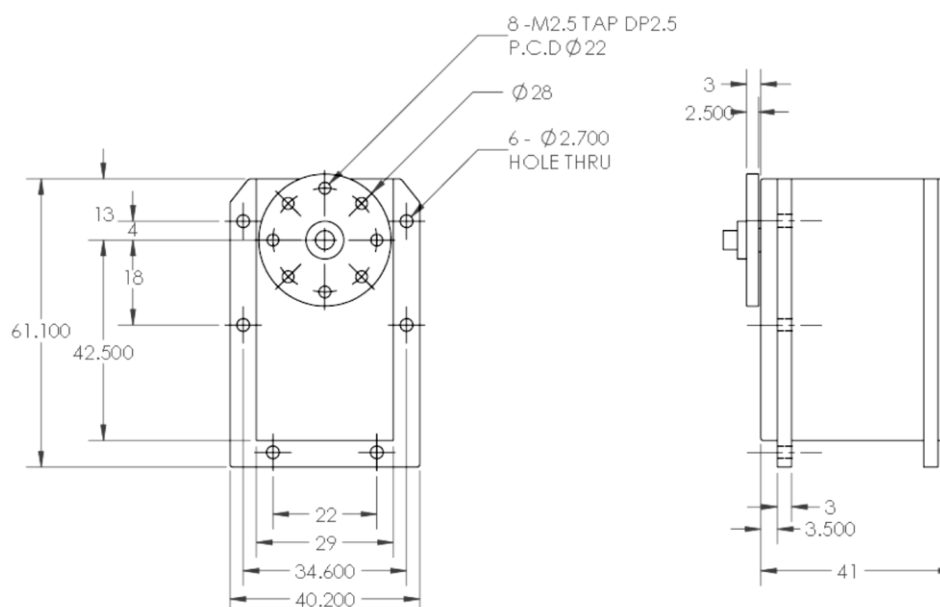
	RX-64	
Weight (g)	125	
Dimension (mm)	40.2 x 61.1 x 41.0	
Gear Reduction Ratio	1/200	
Applied Voltage (V)	at 15V	at 18V
Final Reduction Stopping Torque (kgf.cm)	64.4	77.2
Speed (Sec/60 degrees)	0.188	0.157

Resolution	0.29°
Running Degree	300°, Endless Turn
Voltage	12V~21V (Recommended voltage: 18V)
Max Current	1200mA
Running Temperature	-5°C ~ +85°C
Command Signal	Digital Packet
Protocol	RS485 Asynchronous Serial Communication (8bit, 1stop, No Parity)
Link (Physical)	RS485 Multi Drop Bus
ID	254 ID (0~253)
Communication Speed	7343bps ~ 1 Mbps
Sensing & Measuring	Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc.
Material Quality	Full Metal Gear, Engineering Plastic Body
Motor	Maxon RE-MAX
Standby Current	50 mA

**ก.3 ขนาดของ ROBOTIS Dynamixel RX-28 servo motor และ ROBOTIS
Dynamixel RX-64 servo motor**



ROBOTIS Dynamixel RX-28 servo motor



ROBOTIS Dynamixel RX-64 servo motor





ภาคผนวก ข

คู่มือการใช้งาน

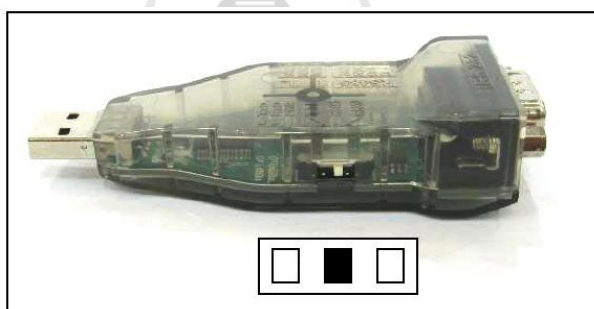
ข.1 อุปกรณ์ในการสอบเทียบไจโรสโคป

1. เครื่องสอบเทียบไจโรสโคป
2. เครื่องจ่ายไฟ
3. USB to Dynamixel adapter
4. DAQ NI USB – 6008
5. ไจโรสโคปที่ต้องการสอบเทียบ

ข.2 การติดตั้งอุปกรณ์

1. เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

เชื่อมต่อเครื่องสอบเทียบไจโรสโคป 2 แกนกับคอมพิวเตอร์โดยผ่าน USB to Dynamixel adapter โดยตั้งค่าฟังก์ชันสวิตช์ของ USB to Dynamixel adapter ให้อยู่ในโหมด RS-485 ดังแสดงในรูปที่ ข.1 หลังจากนั้นทำการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ (12V~16V) โดยการกดสวิตช์ POWER ที่แหล่งจ่ายไฟฟ้า



รูปที่ ข.1 การตั้งค่าฟังก์ชันสวิตช์ของ USB to Dynamixel adapter

2. ติดตั้ง driver ของ USB to Dynamixel adapter สำหรับเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

- 2.1 Download the Dynamixel Driver file from our website and uncompress it. (www.robotis.com/usb2dynamixel)
- 2.2 Connect USB to Dynamixel adapter to a PC, and the New Hardware Search window will appear on the PC. Click on [Install from the list or Specific Location].



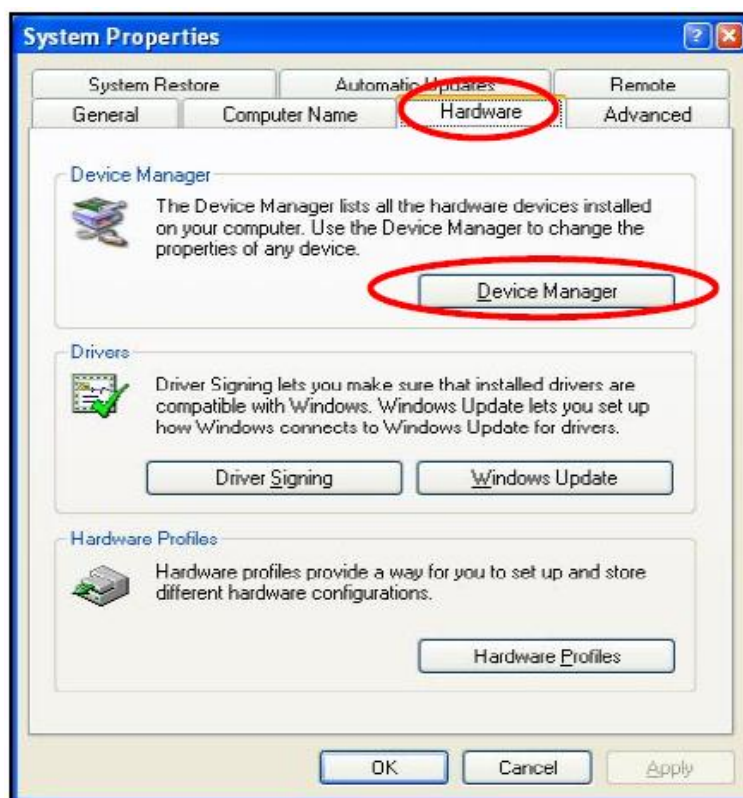
รูปที่ ข.2 หน้าต่าง New Hardware Search

- 2.3 Move to where USB to Dynamixel adapter driver folder which was uncompressed from step 2.1



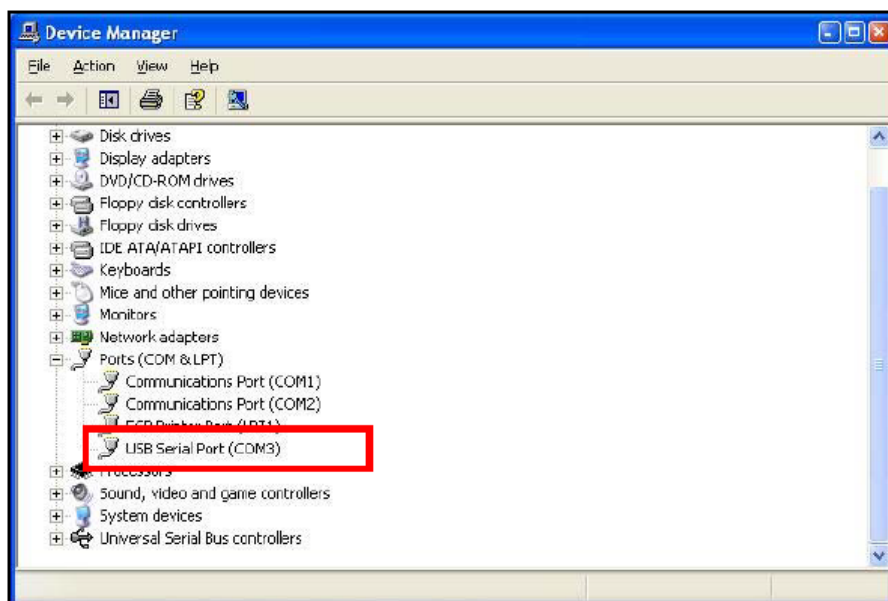
รูปที่ ข.3 หน้าต่าง Found New Hardware Wizard

- 2.4 If the New Hardware Search window appears again, repeat the Step 2.2 to 2.3 one more time
- 2.5 Select Control Panel>> System>> Hardware>> Management Console.



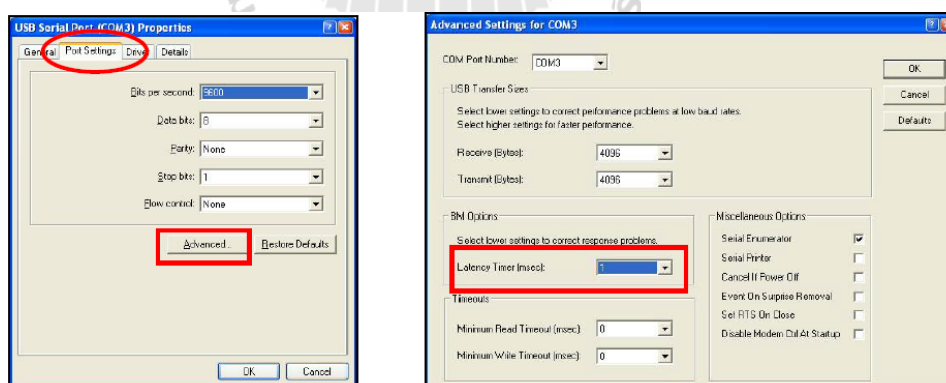
รูปที่ ข.4 หน้าต่าง System Properties

- 2.6 Check whether “USB Serial Port” is installed at “Port (COM and LPT)” of the Management Console. It would be convenient for the user to remember the number of port (COM #) for network connection



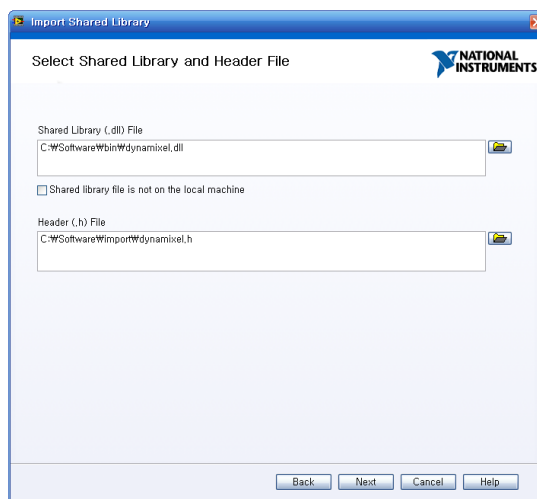
รูปที่ ข.5 หน้าต่าง Driver Manager

- 2.7 Double-click on “USB Serial Port (COM#)”, and select “Port Setting >> Advanced” to modify the Latency time to 1 ms. Doing such will increase the network speed.



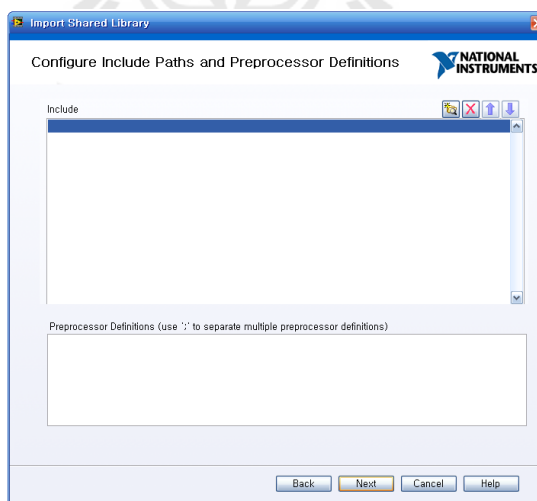
รูปที่ ข.6 หน้าต่างการตั้งค่า USB Serial Properties

3.3 Select dynamixel.dll and dynamixel.h in Dynamixel SDK folder.



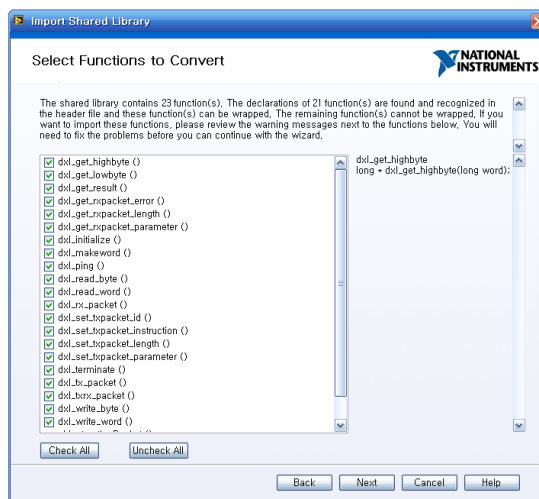
รูปที่ ข.9 หน้าต่าง Select Shared Library and Header File

3.4 Click "Next" button.



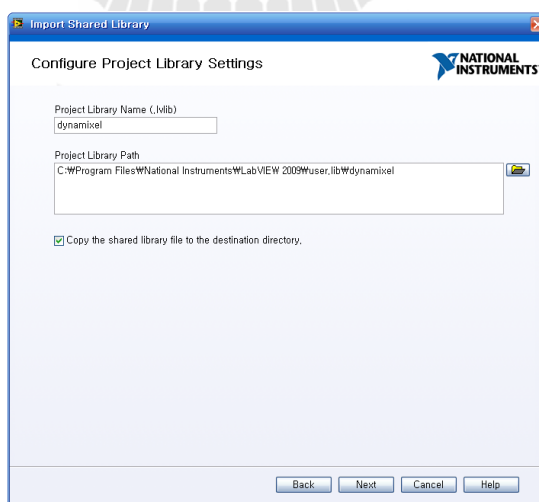
รูปที่ ข.10 หน้าต่าง Configure Include Paths and Preprocessor Definitions

3.5 Click "Next" button.



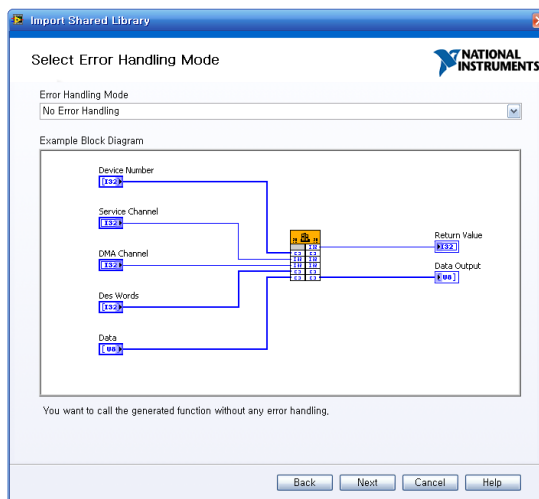
รูปที่ ข.11 หน้าต่าง Select Functions to Convert

3.6 If there is no specific reason, click "Next" button without changing the basic value as below.



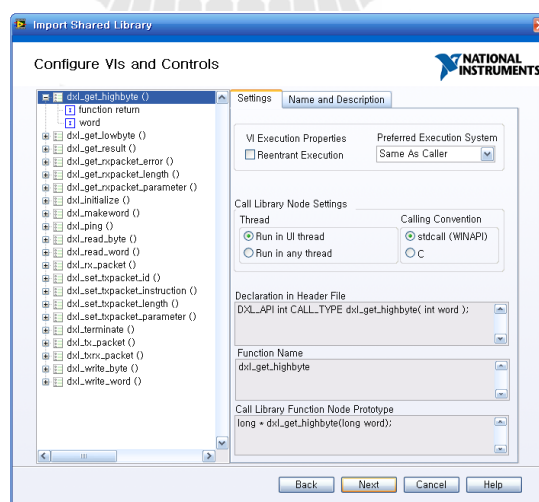
รูปที่ ข.12 หน้าต่าง Configure Project Library Setting

3.7 Click "Next" button.



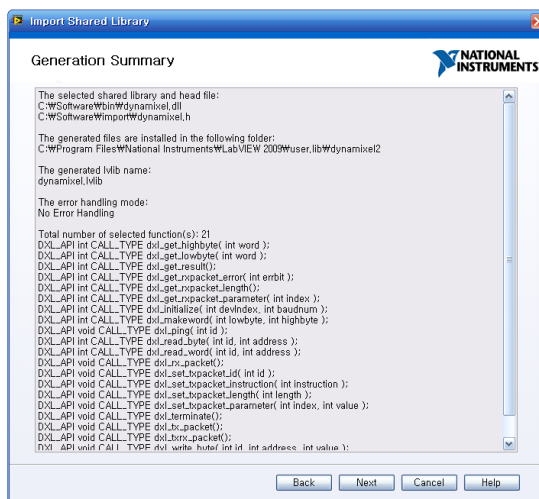
รูปที่ ข.13 หน้าต่าง Select Error Handling Mode

3.8 If there is no specific reason, click "Next" button without changing the basic value as below.



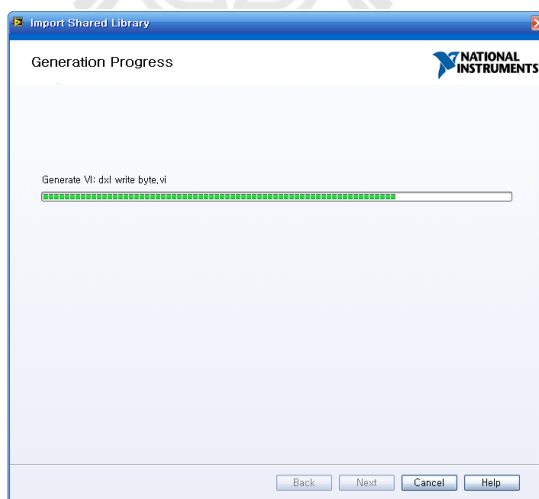
รูปที่ ข.14 หน้าต่าง Configure VIs and Controls

3.9 It shows the contents to be created. Click "Next" button.



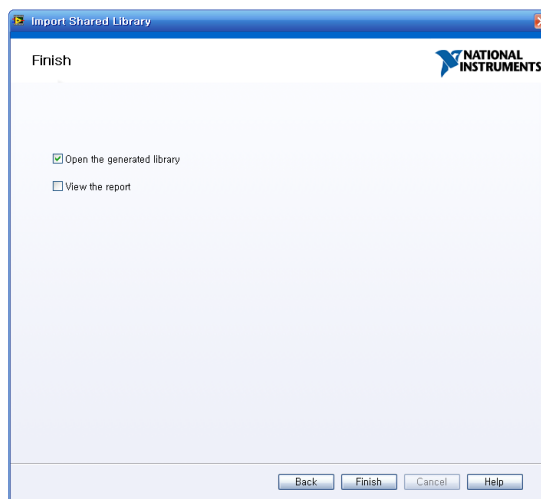
รูปที่ ข.15 หน้าต่าง Generation Summary

3.10 So far based on the set contents, create vi file.



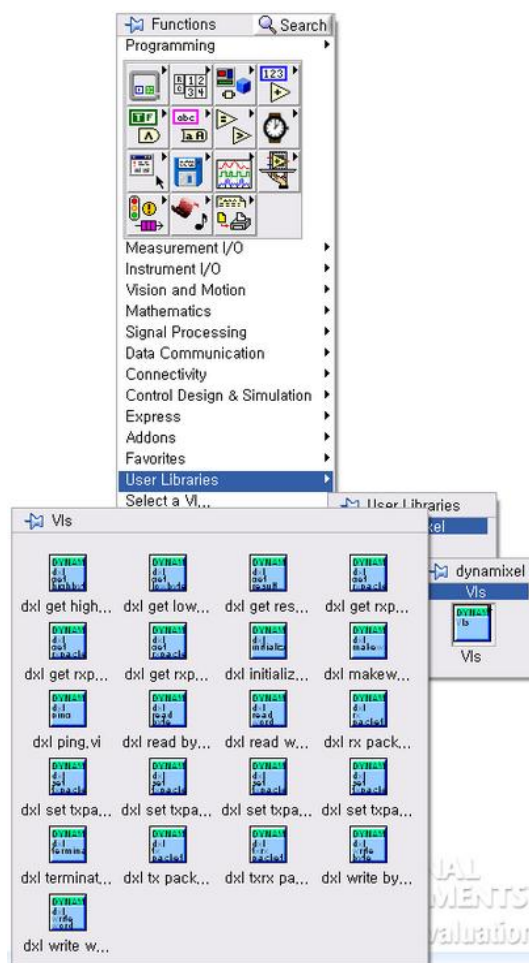
รูปที่ ข.16 หน้าต่าง Generation Progress

- 3.11 The vi file creation of Dynamixel SDK is completed.



รูปที่ ข.17 หน้าต่าง Finish

- 3.12 Dynamixel SDK functions can be called through LabView User Libraries as below.



รูปที่ ข.18 หน้าต่าง User Libraries สำหรับเรียกใช้ Dynamixel SDK Functions

ข.3 โปรแกรมสอบเทียบไจโรสโคปอัตโนมัติ

หน้าต่างของโปรแกรมสอบเทียบไจโรสโคปอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ ข.19 สามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนคือ

1. ส่วนเริ่มโปรแกรม

แสดงช่องกำหนด COM PORT สำหรับเชื่อมต่อกับมอเตอร์ แสดงสถานะการเชื่อมต่อกับมอเตอร์ และปุ่มสำหรับเริ่มและหยุดโปรแกรม

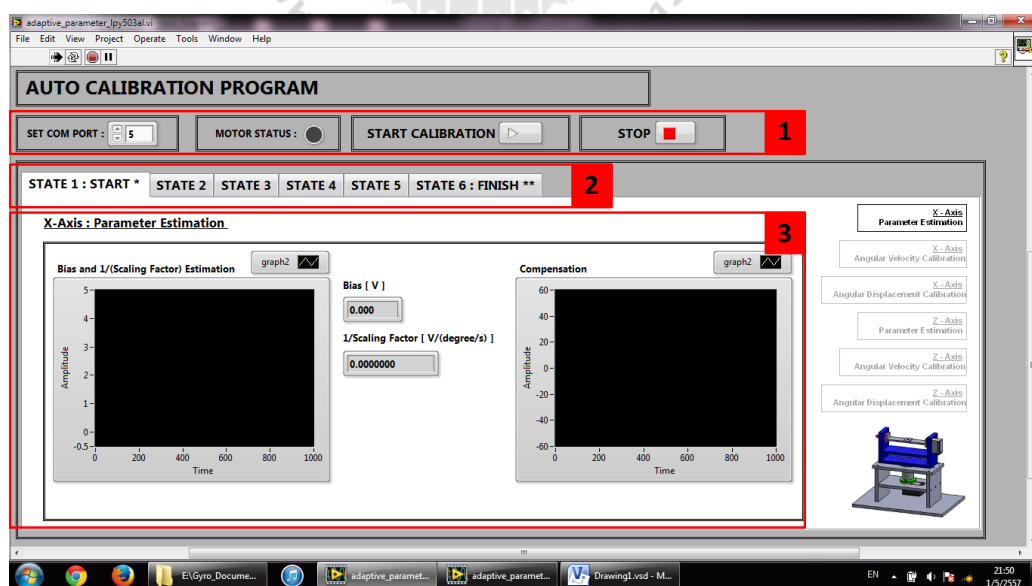
2. ส่วนแสดงลำดับการทำงานของโปรแกรมสอบเทียบ

โดยมีลำดับการทำงานดังนี้

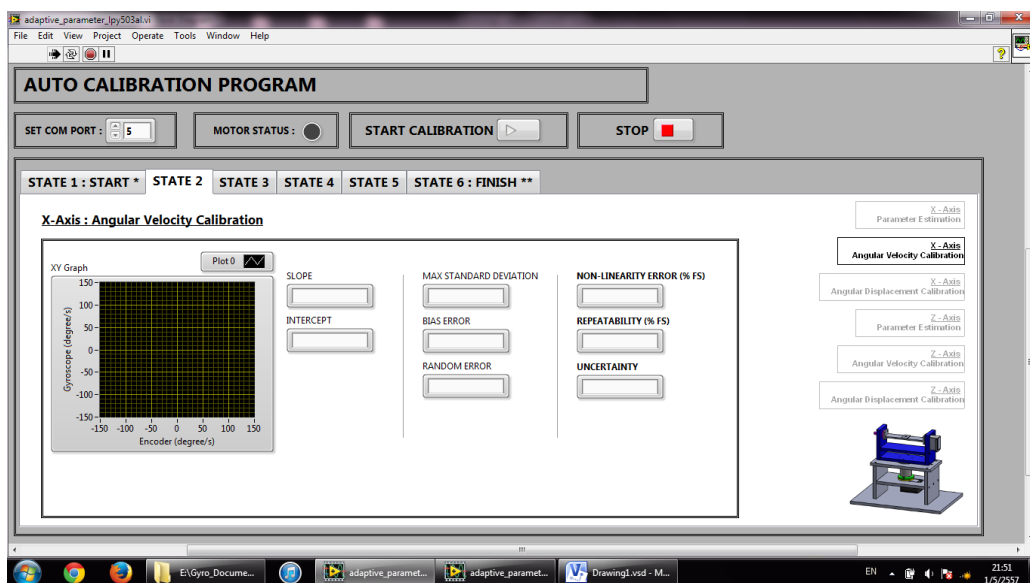
- STATE 1: START * เป็นขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ในแกน x
- STATE 2: เป็นขั้นตอนการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมในแกน x
- STATE 3: เป็นขั้นตอนการสอบเทียบตำแหน่งเชิงมุมในแกน x
- STATE 4: เป็นขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ในแกน z
- STATE 5: เป็นขั้นตอนการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมในแกน z
- STATE 6: FINISH ** เป็นขั้นตอนการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมในแกน z

3. ส่วนแสดงผล

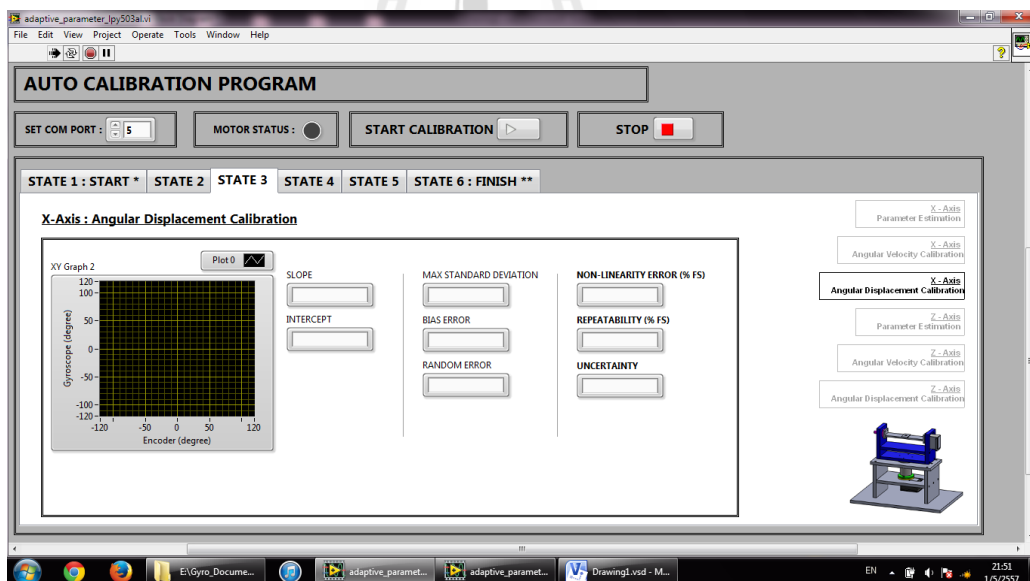
สำหรับแสดงค่าที่ได้จากการประมาณค่าพารามิเตอร์และการสอบเทียบความเร็วเชิงมุมและตำแหน่งเชิงมุมของไจโรสโคป



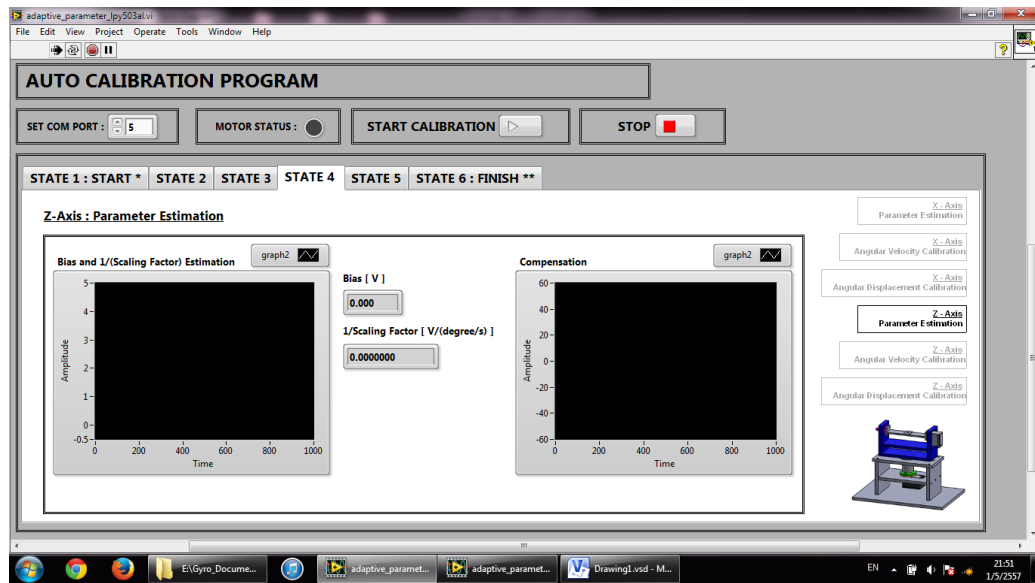
รูปที่ ข.19 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 1: START *



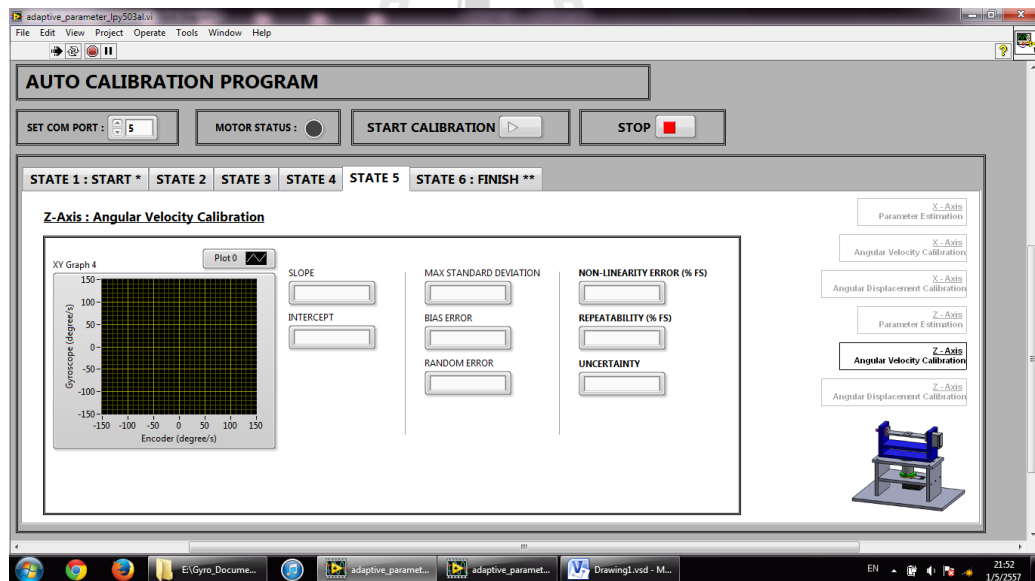
รูปที่ ข.20 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 2



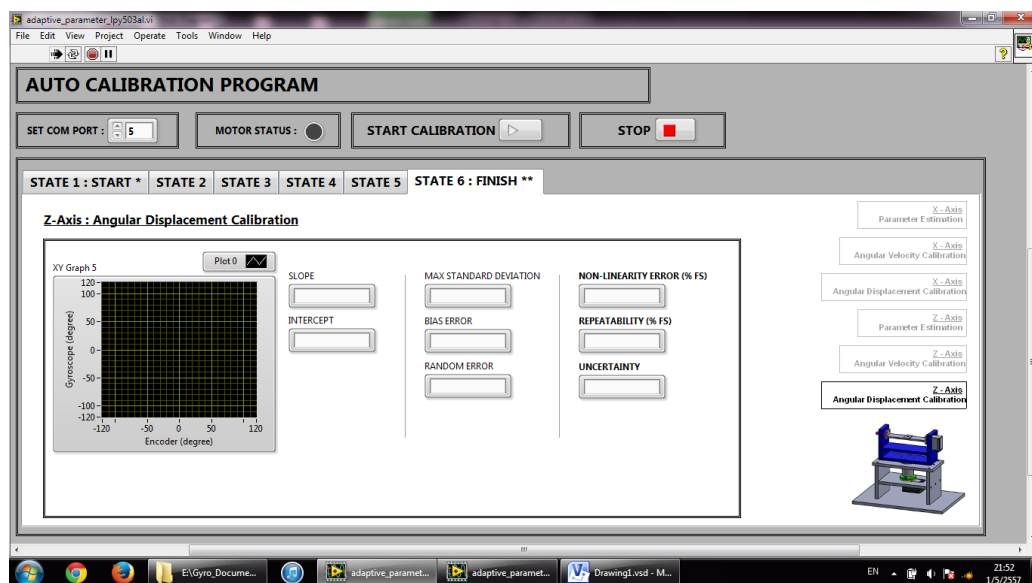
รูปที่ ข.21 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 3



รูปที่ ข.22 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 4



รูปที่ ข.23 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 5



รูปที่ ข.24 หน้าต่างโปรแกรมสอบเทียบอัตโนมัติ STATE 6: FINISH **





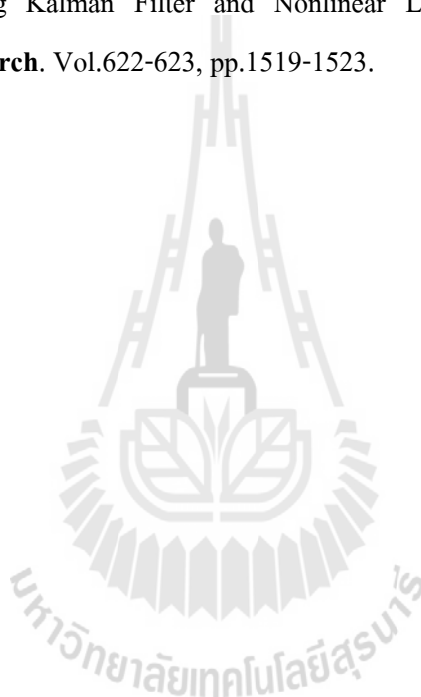
ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Saraporn, C., Srisertpol, J., and Teeka, K. (2012). Signal Conditioning of Low-cost Gyroscope Using Kalman Filter and Nonlinear Least Square Method, **The 26th Mechanical Engineering Conference**, CD ME-NEET26, DRC2041, 5pp. October 24-27, 2012. Chiangrai, Thailand.

Saraporn, C., Dolwichai, T., Srisertpol, J., and Teeka, K. (2013). Signal Conditioning of Low-cost Gyroscope using Kalman Filter and Nonlinear Least Square Method, **Advanced Materials Research**. Vol.622-623, pp.1519-1523.



Signal Conditioning of Low-cost Gyroscope Using Kalman Filter and Nonlinear Least Square Method

Saraporn C., Dolwichai T.^a, Srisertpol J., Teeka K.

Suranaree University of Technology, 111 University Avenue,
 Suranaree District, Muang, Nakhon Ratchasima, Thailand

^aEmail: prapun@sut.ac.th

Keywords: Low-cost gyroscope, Kalman filter, Nonlinear least square method

Abstract. Gyroscopes are important sensors in motion control in equipment such as airplanes, missiles and Segway. Low-cost gyroscopes have problems in signals such as bias, noise and scaling factor that decrease the efficiency of motion control. Therefore this paper is to present signal conditioning of low-cost gyroscopes using a Kalman filter to remove unwanted noise and nonlinear least square method to estimate parameters for compensation errors to the model by comparison with the encoder. The experimental results is shown that Kalman filter and nonlinear least square method can be used in signal conditioning of low-cost gyroscope for a more accurate signal.

Introduction

Gyroscopes are commonly used as sensors for measuring angular velocity in many areas of application such as navigation, homing, and control stabilization. Nowadays advances in micro-machining technology have made the design and fabrication of micro-electro-mechanical systems (MEMS) gyroscopes possible [5]. An operation of micro gyroscope is based on the motion of vibrating oscillation. The proof mass is driven along the driving axis (x-axis) at the resonant frequency of the driving mode. When an angular rate input along z-axis is applied to the sensor, the oscillation of the mass along the sensing axis (y-axis) is induced due to the Coriolis force, which is modulated by the oscillation along the driving axis. The angular rate can be estimated by measuring the amplitude of the orthogonal oscillation [6-7]. The high performance gyroscopes have low noise and low bias but high sensitivity thus the gyroscope is very expensive. Low-cost gyroscopes have high bias and noise when they are used in many applications. Therefore, low-cost gyroscopes must be calibrated before they are implemented. In 2008, Kwang Yong Lim, et al. presented self-calibrating sensing technology using linear encoders and Inertial/magnetic Measurement Unit (IMU). Ying-Chih Lai, et al. (2010) presented a low-cost attitude and heading reference system (AHRS) with a self-developed three-axis rotating platform. The calibrations for each sensor are accomplished by using the scalar calibration and the least squares methods. Eduardo Nebot, et al. (1999) presented an efficient initial calibration and alignment algorithm for a six-degree of freedom inertial measurement unit (IMU) to be used in land vehicle applications. Lei Wang, et al. (2011) presented the calibration of low cost MEMS inertial measurement unit. The significant error of IMU such as bias, scale factor, and misalignment are estimated in static tests, rate tests, and thermal tests. The calibration method combined with Kalman filter is proposed to estimate parameters and compensate errors. This paper presents signal conditioning of low-cost gyroscope using Kalman filter and nonlinear least square method.

Mathematical Description

The system used for improving the signal from low-cost gyroscopes has 4 parts, i.e. DC motor with encoder, Signal from the gyroscope, Kalman filter and adaptive compensator as shown in Fig. 1. We used a DC motor with encoder to measure position and velocity.

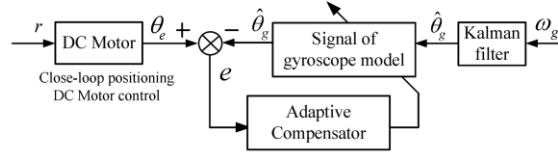


Fig 1. Block diagram of signal condition

where θ_e is angular displacement from encoder and r is reference input. Signals from the encoder are used to compare the gyroscope's signal. Next, the gyroscope is described by the equation [1], [11]

$$\omega_g = \frac{1}{\alpha}(\dot{\theta} - \delta) + v_g \quad (1)$$

where $\dot{\theta}$ and ω_g are actual and measured angular velocities, δ and α are the bias and scaling factors of the gyroscope sensor respectively, and v_g is gyroscope measurement noise. Finally, to model the gyroscope bias, we use the equation

$$\dot{\delta} = v_b \quad (2)$$

In [1], v_b is white noise. [9] Assuming that the bias described by $\dot{\delta} = 0$ then state space model

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix} &= \frac{1}{\alpha} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta} \right\} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b \\ v_g \end{bmatrix} \\ z &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_g \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

Algorithm

From Fig. 1, A Kalman Filter is used to remove unwanted noise. Nonlinear least square method is an adaptive compensator algorithm that proposed to estimate parameters and compensate errors to model. We compare the signal of gyroscope model with encoder. Kalman filter is an optimal observer that can reduce unwanted noise. State space model in (3) is of the standard form [10]

$$\dot{x} = Ex + Fu + G\omega \quad (4)$$

$$z = Hx + v \quad (5)$$

where $\hat{x}$ is state estimation of Kalman filter, which is given by [1]

$$\dot{\hat{x}} = E\hat{x} + M(z - H\hat{x}) \quad (6)$$

where Kalman gain

$$M = PH^T S^{-1} \quad (7)$$

We find P from Matrix Riccati differential equation

$$\dot{P} = EP + PE^T + GQG^T - MSM^T \quad (8)$$

The ω , M , G , Q , S , e and $\hat{\theta}_g$ denote process noise, Kalman gain, covariance matrix of observational (measurement) uncertainty, covariance matrix of process noise in the system state dynamics, covariance matrix of state estimation uncertainty, error and signal from Kalman filter

respectively. Where $Q = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ and $S = 1.1$, resulting in the Kalman gains $M = \begin{bmatrix} -2.132 & 0.2373 \end{bmatrix}^T$. Then state space for Kalman Filter is

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\delta}} \\ \dot{\hat{\theta}}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta} \\ \hat{\theta}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} [\theta_g - \hat{\theta}_g] \quad (9)$$

Next, the signal from Kalman filter is compensated by estimated parameter from nonlinear least square method. Estimated parameters from nonlinear least square method are α and δ . We consider the least square error (LSE) function

$$e = \theta_e - \hat{\theta}_g \quad (10)$$

$$LSE = \sum_{i=1}^n (\theta_e(t_i) - \hat{\theta}_g(t_i))^2 \quad (11)$$

From equation (11), we obtain

$$\text{Minimize } f(\alpha, \delta) = \sum_{i=1}^n (\theta_e(t_i) - \hat{\theta}_g(t_i))^2 \quad (12)$$

By defining $p = [\alpha \ \delta]^T$ to minimize $f(p)$

$$p_k = [\alpha_k \ \delta_k]^T \quad (13)$$

where k and n are number of calculation cycle and number data of signal from Kalman filter respectively. In this article, we applied nonlinear least square method in MATLAB

Design of the Platform

In order to calibrate the low-cost gyroscope, a platform with two axes of rotation and exact orientation feedback is developed. All components of the platform are fabricated with aluminum and steel, and its mechanism is designed as a gimbaled platform as shown in Fig. 2.

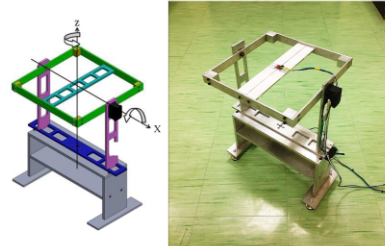


Fig 2. Design of the platform

The test section is located in the center of the gimbaled part which is on the top of the whole platform. Two axes of rotation are driven separately by high torque servo motor. Two servo motors, Dynamixel RX-28 and RX-64, were installed on x and z axis respectively. From the datasheet, in our case the maximum angular rate for RX-28 is 480°/s and for RX-64 is 320°/s. The range of the angular position feedback of the servo motor is ± 2.617 rad ($\pm 150^\circ$). These servo motors are controlled by receiving commands from a PC that is interfaced to the built-in controller.

Experimental Results

In experimental result, the motion of motor is sine wave frequency 0.25 Hz. There are many gyroscopes' signals. Fig. 3 is the low-cost gyroscope signal with noise, unknown bias and scaling factor. When signal filter by Kalman filter shown in Fig. 4-5, the noise is removed but angular displacement from gyroscope has a signal drift because of an unknown bias term. The nonlinear least square method is used to estimate parameters (bias and scaling factor) shown in Fig. 6-7. We found that the value of bias is -0.0116 and scaling factor is 0.9464. Subsequently, an adaptive compensator compensated the parameter values to the gyroscope. The compensated system has higher precision signal when compared with uncompensated system. The compensation results are shown in Fig. 8-9.

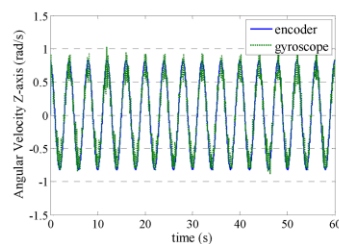


Fig 3. Angular velocity z-axis signal from encoder and gyroscope

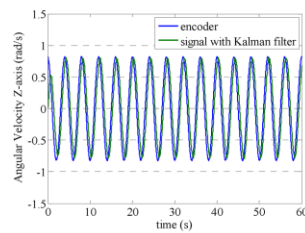


Fig 4. Angular velocity z-axis signal from encoder and Kalman filter

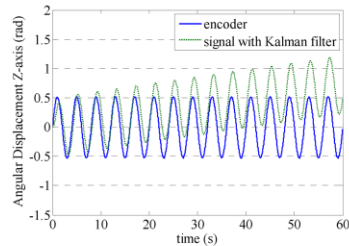


Fig 5. Angular displacement z-axis signal from encoder and Kalman filter

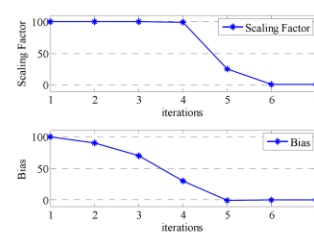


Fig 6. Parameter estimation

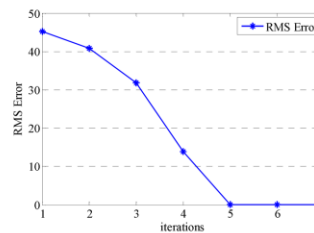


Fig 7. Root mean square error of estimation

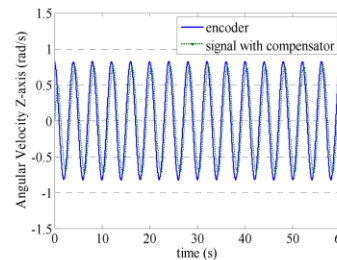


Fig 8. Angular velocity z-axis signal from encoder and gyroscope model

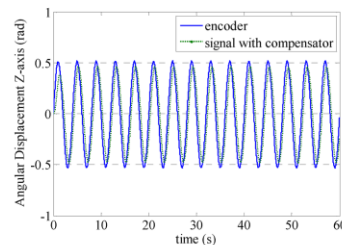


Fig 9. Angular displacement z-axis signal from encoder and gyroscope model

Conclusion

The efficiency of the Kalman filter showed that it has the capability to remove unwanted noise from the low-cost gyroscope's signal. The experimentation results of the adaptive compensator algorithm showed high performance in estimating parameters (bias and scaling factor) using nonlinear least square method. Therefore, Kalman filter and nonlinear least square method can be used in signal conditioning of low-cost gyroscope for a more accurate signal.

References

- [1] Leavitt, J., Sideris, A., and Bobrow, J.E., High bandwidth tilt measurement using low-cost sensors, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.11 (3), pp. 1017-1022, June 2006.
- [2] Kwang Yong Lim, Goh, F.Y.K., Wei Dong, Kim Doang Nguyen, I-Ming Chen, Song Huat Yeo, Duh, H.B.L., Chung Gon Kim, A Wearable Self-Calibrating, Wireless Sensor Network for Body Motion Processing, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1017-1022, May 19-23, 2008.
- [3] Lai, Y.-C., Jan S.-S., Hsiao F.-B., Development of a Low-Cost Attitude and Heading Reference System Using a Three-Axis Rotating Platform, *Sensors*, vol.10 (4), pp. 2472-2491, March 2010.
- [4] Nebot, E., Durrant-Whyte, H., Initial calibration and alignment of low-cost inertial navigation units for land vehicle applications, *Journal of Robotic Systems*, vol.16 (2), pp. 81-92, February 1999.
- [5] Park, S., Horowitz, R., Discrete time adaptive control for a MEMS gyroscope, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol.19, pp. 485-503, April 2005.
- [6] Chang, B.-S., Lee, J.-G., Kang, T., Design and performance test of digital rebalance loop for MEMS gyroscope, *Key Engineering Materials*, vol.326-328, pp. 249-252, December 2006.
- [7] Fei, J., Ding, H., System Dynamics and Adaptive Control for MEMS Gyroscope Sensor, *International Journal of Advanced Robotic System*, vol.7 (4), pp.81-86, 2010.
- [8] Wang, L., Hao, Y., Wang, F., Calibration of Low Cost MEMS Inertial Measurement Unit for an FPGA-based Navigation System, *IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 181-186, June 2011.
- [9] Vaganay, J., et al., Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data, *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 277-282, May 1993.
- [10] Qian, H., Xia, Q., et al., On modeling of random drift of MEMS gyroscope and design of Kalman filter, *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 4355-4360, August 2009.
- [11] Sahawneh, L., Development and calibration of low cost MEMS IMU for UAV applications, *International Symposium on Mechatronics and Its Applications (ISMA) 5th*, pp. 1-9, May 2008.

DRC 2041

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

การปรับแต่งคุณภาพสัญญาณไจโรสโคปราคาถูกโดยใช้คาลมานฟิลเตอร์ และวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เชิงเส้น Signal Conditioning of Low-cost Gyroscope Using Kalman Filter and Nonlinear Least Square Method

ขามา สารพร¹, จิระพล ศรีเสรีธผล¹ * และ เกียรติศักดิ์ จีระ¹

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*Email: jiraphon@sut.ac.th, 044-224412

บทคัดย่อ

การควบคุมวัตถุที่มีการเคลื่อนที่เช่น รถยนต์ เรือ เครื่องบิน จรวดและหุ่นยนต์ เป็นต้น จำเป็นต้องทราบตำแหน่งและทิศทางที่ถูกต้อง ไจโรสโคปเป็นเครื่องมือวัดที่นิยมใช้ในการวัดความเร็วเชิงมุมอย่างแพร่หลายในการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ ไจโรสโคปที่มีราคาถูกจะมีสัญญาณที่มีค่าเบี่ยงเบนและสัญญาณรบกวน เมื่อนำไปใช้งานจะทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุเกิดความคลาดเคลื่อนและขาดความแม่นยำได้ จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบ (Calibration) ไจโรสโคปก่อนจะนำมาใช้งานเสมอ ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการปรับแต่งคุณภาพสัญญาณ (Signal conditioning) ของไจโรสโคปราคาถูกโดยใช้คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman filter) ในการลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการและใช้วิธี Nonlinear least square ในการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้กับแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์

คำหลัก: ไจโรสโคป, คาลมานฟิลเตอร์, Nonlinear least square

Abstract

Gyroscope is an important sensor in the motion control such as airplane, missile and Segway. Low-cost gyroscopes have the problems in signal such bias, noise and scaling factor that decrease efficiency of motion control. This paper presents signal conditioning of low-cost gyroscope using Kalman filter to remove unwanted noise and nonlinear least square method to estimate parameters for compensation errors to model by compare with encoder.

Keywords: Low-cost gyroscope, Kalman filter, Nonlinear least square

1. บทนำ

การควบคุมวัตถุที่มีการเคลื่อนที่เช่น รถยนต์ เรือ เครื่องบิน จรวดและหุ่นยนต์ เป็นต้นจำเป็นต้องทราบตำแหน่งและทิศทางที่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องและแม่นยำสำหรับวัตถุที่มีการเคลื่อนที่เชิงมุมนั้นเครื่องมือวัดสถานะเชิงมุมมีหลายชนิดเช่น inclinometer ที่สามารถวัดมุมเอียงที่เปลี่ยนไปได้ และ encoder ซึ่งสามารถวัดความเร็วเชิงมุมได้ เป็นต้น เครื่องมือวัดแต่ละชนิดจะมีข้อจำกัดรวมถึงข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน

ไจโรสโคป (Gyroscope) เป็นเครื่องมือวัดสถานะเชิงมุมชนิดหนึ่งซึ่งสามารถวัดความเร็วเชิงมุมของวัตถุได้ด้วยเทคโนโลยี Micro-electro-mechanical system (MEMS) ทำให้ไจโรสโคปมีขนาดเล็กและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น [5]สามารถอธิบายหลักการทำงานของไจโรสโคปบนพื้นฐานการสั่นของระบบมวล (Mass) สปริง (Spring) และตัวหน่วง (Damper) [6-7]ซึ่งมวลภายในจะสั่นที่ความถี่สั่นพ้อง (Resonance Frequency) เมื่อมีความเร็วเชิงมุมภายนอกกระทำต่อไจโรสโคปทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Coriolis Force) เป็นผลให้เกิดการสั่นในทิศทางตั้งฉาก

DRC 2041

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



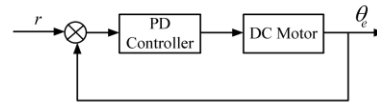
กับการสั่นเดิม ความเร็วเชิงมุมดังกล่าวสามารถหาได้จาก การวัดแอมพลิจูดการสั่นเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลางโรสโคปที่มีประสิทธิภาพสูงจะมีสัญญาณรบกวนน้อย และไวต่อการตอบสนอง อีกทั้งจะต้องมีค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณน้อยมาก ด้วยประสิทธิภาพรวมถึงคุณภาพของสัญญาณที่ดีทำให้มีราคาสูง แต่โรสโคปราคาถูก (Low-cost Gyroscope) พบว่าสัญญาณที่ได้มีค่าเบี่ยงเบนและมีสัญญาณรบกวนมาก เมื่อนำมาใช้งานทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อค่าความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้ จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบ (Calibration) โรสโคปก่อนจะนำมาใช้งานเสมอ [2]ได้นำเสนอ self-calibrating ของการบอกตำแหน่งของแขนกล 2 ข้อต่อ โดยใช้ linear encoder ร่วมกับ Inertia Measurement Unit (IMU) [3]ได้นำเสนออุปกรณ์สอบเทียบเครื่องมือวัดในการประมาณค่ามุมเอียงทั้ง 3 แนวแกน การสอบเทียบตัวตรวจรู้แต่ละตัวใช้นั้นหลักการ Least Square Method [4]นำเสนอการสอบเทียบ Inertia Measurement Unit (IMU) ราคาถูกสำหรับการประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่งของรถยนต์ใน 2 มิติ [8]นำเสนอการสอบเทียบ Inertial Measurement Units (IMU) ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สำคัญคือ ค่าเบี่ยงเบน (Bias) ค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale Factor) และค่า Misalignment Error ทำการสอบเทียบโดยใช้ คาลมานฟิลเตอร์ในการประมาณค่าพารามิเตอร์และ ขดเซยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังนั้นบทความนี้ได้ นำเสนอการปรับแต่งคุณภาพสัญญาณของโรสโคปราคาถูกโดยใช้คาลมานฟิลเตอร์ซึ่งเป็นตัวสังเกตแบบเหมาะสมที่สุด ที่มีความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการและใช้วิธี Nonlinear least square ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบปรับตัวได้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์แล้วขดเซยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้กับแบบจำลองโดยทำการเปรียบเทียบผลกับสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์

2. MATHEMATICAL DESCRIPTIONS

ระบบที่ใช้ในการปรับปรุงสัญญาณของโรสโคปราคาถูกประกอบด้วย 4 ส่วนคือ มอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง สัญญาณจากโรสโคปราคาถูก คาลมานฟิลเตอร์และตัวขดเซยแบบปรับตัวได้

เราใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ติดเอ็นโค้ดเดอร์เพื่อใช้ในการบอกตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์

โดยใช้ PD Controller เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อ θ_e คือตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์ และ r คือ Reference input สัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณจากโรสโคปราคาถูกซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ[1],[11]

$$\omega_g = \frac{1}{\alpha}(\dot{\theta} - \delta) + v_g \quad (1)$$

เมื่อ $\dot{\theta}$ คือ Actual angular velocities, ω_g คือ Measured angular velocities, δ และ α คือค่าเบี่ยงเบน (Bias) และค่า scaling factor ตามลำดับ เพื่อทำการสร้างแบบจำลองของค่าเบี่ยงเบนของโรสโคปราคาถูกเราใช้สมการ

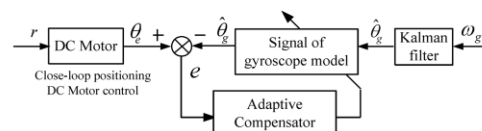
$$\dot{\delta} = v_b \quad (2)$$

เมื่อ v_b คือ white noise [9] โดยสมมติให้ค่าเบี่ยงเบนแทนด้วยสมการ $\dot{\delta} = 0$ จากสมการข้างต้นสามารถเขียนในรูปปริภูมิสแตต (state space model) ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \omega_g \end{bmatrix} = \frac{1}{\alpha} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta} \right\} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_b \\ v_g \end{bmatrix}$$

$$z = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_g \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. อัลกอริทึม



รูปที่ 2 Block diagram of signal condition

จากรูปที่ 1 คาลมานฟิลเตอร์ถูกใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise) วิธี Nonlinear least square ใช้เป็นอัลกอริทึมแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณ

DRC 2041

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



ค่าพารามิเตอร์และชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้กับแบบจำลองโดยค่าความคลาดเคลื่อนหาได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณของแบบจำลองไจโรสโคปกับเอ็นโค้ดเดอร์ คาลมานฟิลเตอร์นั้นเป็นตัวสังเกตแบบเหมาะสมที่สุด (optimal observer) ที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการได้ จากปฏิกิริยาในสมการ (3) สามารถเขียนในรูปแบบมาตรฐานได้เป็น[10]

$$\dot{x} = Ex + Fu + Gw \quad (4)$$

$$z = Hx + v \quad (5)$$

เมื่อ $\hat{x}$ คือ State estimation ของคาลมานฟิลเตอร์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ [1]

$$\dot{\hat{x}} = E\hat{x} + M(z - H\hat{x}) \quad (6)$$

$$M = PH^T S^{-1} \quad (7)$$

สามารถหาค่า P จากวิธี Matrix Riccati differential equation

$$\dot{P} = EP + PE^T + GQG^T - MSM^T \quad (8)$$

เมื่อ M คือ Kalman gain, G คือ Covariance matrix of observational uncertainty, Q คือ Covariance matrix of process noise in the system state dynamics และ S คือ Covariance matrix of state estimation uncertainty โดยที่ $\hat{\theta}_g$ คือ Signal from Kalman filter เมื่อกำหนดให้ $Q = [1 \ 0; 0 \ 1]$ และ $S = 0.1$ จะได้ $M = [-3.162 \ 4.04]^T$ ดังนั้นปฏิกิริยาสำหรับคาลมานฟิลเตอร์คือ

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\delta}} \\ \dot{\hat{\theta}}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\delta} \\ \hat{\theta}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} [\theta_g - \hat{\theta}_g] \quad (9)$$

สัญญาณที่ผ่านมาจากคาลมานฟิลเตอร์จะถูกชดเชยด้วยพารามิเตอร์ α and δ ที่ทำการประมาณโดยวิธี nonlinear least square เมื่อพิจารณาฟังก์ชัน least square error (LSE)

$$e = \theta_e - \hat{\theta}_g \quad (10)$$

$$LSE = \sum_{i=1}^n (\theta_e(t_i) - \hat{\theta}_g(t_i))^2 \quad (11)$$

โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูลจากการวัด จากสมการที่ (11) จะได้

$$\text{Minimize } f(\alpha, \delta) = \sum_{i=1}^n (\theta_e(t_i) - \hat{\theta}_g(t_i))^2 \quad (12)$$

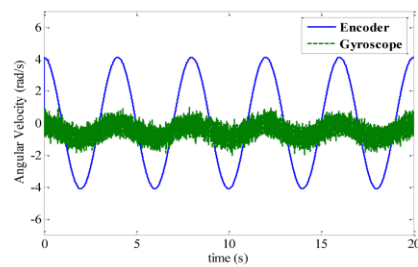
เมื่อ $p = [\alpha \ \delta]^T$ จะทำการ Minimize $f(p)$

$$p_k = [\alpha_k \ \delta_k]^T \quad (13)$$

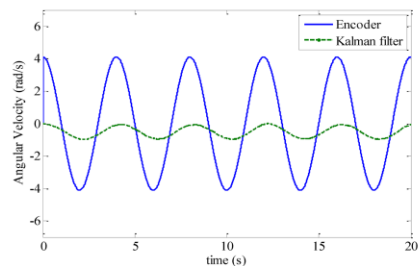
เมื่อ k คือ จำนวนรอบของการคำนวณ ในบทความนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Nonlinear least squares ของโปรแกรม MATLAB

4. ผลการทดลอง

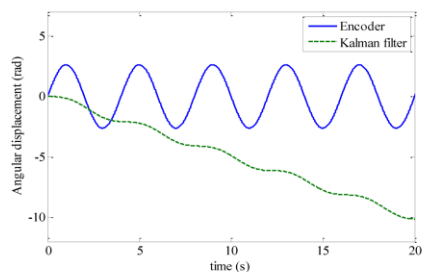
จากผลการจำลองสัญญาณของไจโรสโคปนั้นรูปที่ 3 คือสัญญาณของไจโรสโคปราคาถูกซึ่งมีสัญญาณรบกวน ค่าเบี่ยงเบน รวมทั้งค่า scaling factor ตามสมการที่ (1) ในการจำลองสัญญาณของไจโรสโคปกำหนดให้มีค่า bias=5, scaling factor=10 และ power noise = 0.0001 เมื่อสัญญาณผ่านส่วนของคาลมานฟิลเตอร์ สัญญาณรบกวนจะถูกกรองออกไปแสดงดังรูปที่ 4-5 แต่ในส่วนของตำแหน่งเชิงมุมนั้นยังคงมีความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากเทอม bias ที่ยังไม่ทราบค่า จากภาพที่ 6-7 วิธี nonlinear least square ซึ่งในบทความนี้ใช้เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ 2 ตัวได้แก่ bias และ scaling factor ได้ผลการประมาณค่าคือ bias=4.19 และ scaling factor=8.37 พารามิเตอร์ทั้งสองตัวจะถูกชดเชยให้กับสัญญาณไจโรสโคปซึ่งส่งผลให้สัญญาณมีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์แสดงดังรูปที่ 8-9



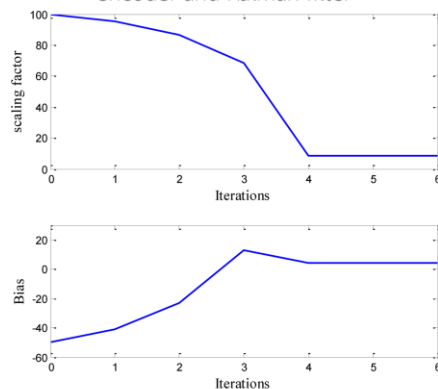
รูปที่ 3 Angular velocity signal from encoder and gyroscope



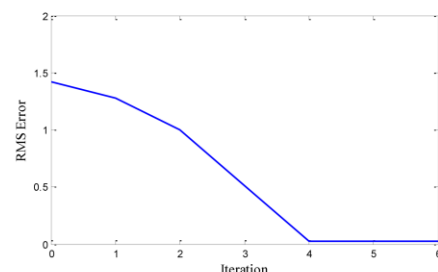
รูปที่ 4 Angular velocity signal from encoder and Kalman filter



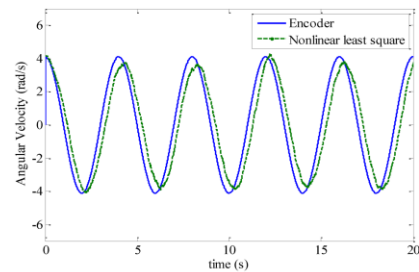
รูปที่ 5 Angular displacement signal from encoder and Kalman filter



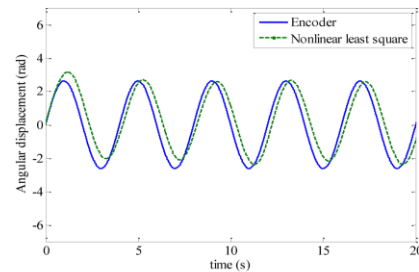
รูปที่ 6 Parameter estimation



รูปที่ 7 Root mean square error of estimation



รูปที่ 8 Angular velocity signal from encoder and gyroscope model



รูปที่ 9 Angular displacement signal from encoder and gyroscope model

5. สรุปผล

คาลมานฟิลเตอร์แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการของสัญญาณไจโรสโคปราคาถูก ผลการจำลองของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธี Nonlinear least square ดังนั้น คาลมานฟิลเตอร์และวิธี Nonlinear least square สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณไจโรสโคปราคาถูกให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Leavitt, J., Sideris, A., and Bobrow, J.E. (2006). High bandwidth tilt measurement using low-cost sensors, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.11 (3), June 2006, pp. 1017-1022.
- [2] Kwang Yong Lim, Goh, F.Y.K., Wei Dong, Kim Doang Nguyen, I-Ming Chen, Song Huat Yeo, Duh, H.B.L., Chung Gon Kim. (2008). A Wearable Self-Calibrating, Wireless Sensor Network for Body Motion Processing, *IEEE International*

DRC 2041

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26
ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย



Conference on Robotics and Automation, May 2008, pp. 1017-1022.

[3] Lai, Y.-C., Jan S.-S., Hsiao F.-B. (2010). Development of a Low-Cost Attitude and Heading Reference System Using a Three-Axis Rotating Platform, *Sensors*, vol.10 (4) , March 2010, pp. 2472-2491.

[4] Nebot, E., Durrant-Whyte, H. (1999). Initial calibration and alignment of low-cost inertial navigation units for land vehicle applications, *Journal of Robotic Systems*, vol.16 (2), February 1999, pp. 81–92.

[5] Park, S., Horowitz, R. (2005). Discrete time adaptive control for a MEMS gyroscope, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol.19, April 2005, pp. 485-503.

[6] Chang, B.-S., Lee, J.-G., Kang, T. (2006). Design and performance test of digital rebalance loop for MEMS gyroscope, *Key Engineering Materials*, vol.326-328, December 2006, pp. 249-252.

[7] Fei, J., Ding, H., System Dynamics and Adaptive Control for MEMS Gyroscope Sensor, *International Journal of Advanced Robotic System*, vol.7 (4), pp.81-86, 2010.

[8] Wang, L., Hao, Y., Wang, F., Calibration of Low Cost MEMS Inertial Measurement Unit for an FPGA-based Navigation System, *IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 181-186, June 2011.

[9] Vaganay, J., et al., Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data, *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 277–282, May 1993.

[10] Qian, H., Xia, Q., et al., On modeling of random drift of MEMS gyroscope and design of Kalman filter, *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 4355 - 4360, August 2009.

[11] Sahawneh, L., Development and calibration of low cost MEMS IMU for UAV applications, *International Symposium on Mechatronics and Its Applications (ISMA) 5th*, pp. 1-9, May 2008.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชามา สารพร เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2530 ที่อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนแหลมทองอุปถัมภ์ จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนเดชะปัตตนยานุกูล จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมยานยนต์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 และในปีพ.ศ.2553 ได้ศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิมในขณะที่ศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิต ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 5 รายวิชาดังนี้ (1) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3 (2) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 3 (3) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 3 (4) วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 4 และ (5) วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1 และยังมีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 2 บทความ ดังที่ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ค.