

ระเบียบวิธีสอบเทียบหน่วยวัดความเฉื่อย

CALIBRATION PROCEDURE OF INERTIAL MEASUREMENT UNIT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-030-074

ระเบียบวิธีสอบเทียบหน่วยวัดความเฉื่อย

CALIBRATION PROCEDURE OF INERTIAL MEASUREMENT UNIT



อนันต์ สูดสงวน  
ANAN SUDSANGUAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2019-EN-M-030-074 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CALIBRATION PROCEDURE OF INERTIAL MEASUREMENT UNIT

ANAN SUDSANGUAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
KMITL-2019-EN-M-030-074  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
COPYRIGHT 2019  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระเบียบวิธีสอบเทียบหน่วยวัดความเฉื่อย
ชื่อนักศึกษา	นายอานันท์ สุดสงวน
รหัสประจำตัว	59601105
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการนำเสนอระเบียบวิธีสอบเทียบหน่วยวัดความเฉื่อย ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) ชนิด 3 แกน และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ชนิด 3 แกน ซึ่งจะทำการสอบเทียบโดยการทดลองด้วยวิธีต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การเก็บค่าการเคลื่อนที่รอบแนวแกนของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น ด้วยวิธีการแบบหมุนหยุด และแบบหมุนต่อเนื่อง และการเก็บค่ารอบแนวแกนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ด้วยวิธีการหมุนรอบแนวแกนด้วยความเร็วรอบที่แตกต่างกัน หลังการเก็บค่าดังกล่าวจะถูกนำมาลดสัญญาณรบกวน (Noise) โดยใช้ตัวกรองแบบความถี่ต่ำ (Low pass filter) ก่อนเข้ากระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ซึ่งประกอบไปด้วย สเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) การเยื้องแนวแกน (Misalignment) คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonality) และค่าไบแอส (Bias) โดยจะทำการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel โดย IMU ที่ถูกนำมาใช้ในการเก็บค่าจะประกอบไปด้วย IMU รุ่น MPU6050 2 ตัว และรุ่น STIM300 1 ตัว เพื่อทำการทดสอบอัลกอริทึมที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยจะทำการเก็บค่าโดยใช้เครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเอง (Mark 2 : 3-Axis Rate Table) เพื่อใช้ในการทดสอบอัลกอริทึมในเบื้องต้น แล้วทำการทดสอบอย่างละเอียดอีกครั้งกับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง (Acutronic : 3-Axis Rate Table) หลังจากได้ค่าพารามิเตอร์ ค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการชดเชยค่าให้กับ IMU แล้วนำไปทดสอบกับการใช้งานจริง เพื่อทดสอบว่าการเก็บค่าด้วยวิธีการใดเหมาะสำหรับอัลกอริทึมมากที่สุด และสามารถลดค่าความผิดพลาดของ IMU ได้มากที่สุด หลังจากการสอบเทียบสามารถลดค่าความผิดพลาด (Error) ของ IMU ได้ประมาณ 50-90 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Calibration Procedure of Inertial Measurement Unit
<b>Student</b>	Mr. Anan Sudsanguan
<b>Student ID.</b>	59601105
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	2019
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Nattawoot Depaiwa

### ABSTRACT

This document instructs the proper methods in calibrating the Inertial Measurement Unit, which includes a 3-axis accelerometer and a 3-axis gyroscope. There are two parts of the calibration. The first, data collection of a movement around the accelerometer's axis by applying stepping method and consistent spin method. The second, data collection of a movement around the gyroscope's axis by circulating the axis with different acceleration rates. After the calibrations, the data would be taken to a noise reduction process by using low pass filter before undertaking the calculating for parameters of the both, accelerometer and gyroscope under scale factor, misalignment, orthogonality and bias. The calculation of the parameters was performed in Microsoft Excel program. The IMU models, which used in the calibrations were MPU6050 (2 models) and STIM300 (1 model) for testing algorithm of accelerometers and gyroscopes. The data was collected by a self-made calibrator (Mark 2 : 3-Axis Rate Table) for basic algorithm testing. The result would be tested again with a high standard calibrator (Acutronic : 3-Axis Rate Table). After receiving the final parameters, the data would have been used to compensate for the IMU measurement before testing in reality for the reason to find which methods would be the most suitable for the algorithm and could minimize the IMU's errors. The final result showed that the calibration could decrease the errors of IMU around 50 to 90 percent.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาต่อที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งนี้ และเป็นผู้ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าทำการศึกษา และให้ความอิสระในการค้นคว้า ลงมือทำสิ่งใหม่ๆอย่างมากมาย

ขอขอบพระคุณ นาวาตรี ปิจิราวุธ เวียงจันทา ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตา กรุณา พร้อมทั้งให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่งทางด้านวิชาการ พร้อมทั้งขอขอบพระคุณ โรงเรียนนายเรือ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ นาย ศุภเชษฐ์ ปัญญา ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตา กรุณา พร้อมทั้งให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย พร้อมทั้งเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยจนแล้วเสร็จ

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยจนแล้วเสร็จ พร้อมทั้งให้ความรู้ คำปรึกษาแนะนำ และมีส่วนช่วยเหลือในการดำเนินการทดสอบอย่างดียิ่ง

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ได้แก่ บิดา มารดา ป้า พี่สาว คุณตา และญาติ พี่น้อง ที่ให้กำลังใจข้าพเจ้ามาโดยตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณตา ผู้ให้โอกาสทางการศึกษาแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

อานันท์ สุตสงวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา .....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์ .....	4
2.1 ปรัชญาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 ระบบ IMU.....	7
2.2.1 ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	7
2.2.1.1 ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบมวลตรวจการสั่นไหว.....	8
2.2.1.2 ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบเพียโซอิเล็กทริก.....	9
2.2.2 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	10
2.2.2.1 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบดั้งเดิม.....	11
2.2.2.2 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดการสั่นสะเทือน .....	12
2.2.2.3 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดด้วยแสง.....	13
2.2.2.4 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวงแหวนเลเซอร์ .....	13
2.3 ระบบพิกัด.....	15
2.3.1 แกนอ้างอิงเฉื่อย .....	15
2.3.2 แกนอ้างอิงวัตถุ.....	16
2.3.3 แกนอ้างอิงโลก .....	17

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	แกนอ้างอิงการเคลื่อนที่.....	18
2.3.5	แกนอ้างอิงแพลตฟอร์ม .....	18
2.4	ตัวกรอง.....	19
2.4.1	ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ.....	19
2.4.2	ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง.....	21
2.4.3	ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่.....	21
2.4.3.1	ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงแคบ .....	23
2.4.3.2	ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงกว้าง.....	24
2.4.4	ตัวกรองลดทอนสัญญาณช่วงความถี่.....	25
2.5	การสอบเทียบ .....	26
2.5.1	การสอบเทียบแบบสถิติ.....	26
2.5.2	การสอบเทียบแบบพลวัต.....	27
2.5.3	ความไวของการวัด .....	28
2.5.4	ความเป็นเชิงเส้น และความเป็นไม่เชิงเส้น.....	28
2.5.5	ความเที่ยงตรง ความสามารถในการวัดซ้ำ และการทำซ้ำ.....	28
2.5.6	ย่านวัด .....	29
2.5.7	ความละเอียดของการวัด .....	29
2.5.8	ความผิดพลาด และความไม่แน่นอน.....	29
2.6	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	32
3.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	32
3.1.1	ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น .....	33
3.1.2	คุณสมบัติเชิงตั้งฉากของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	35
3.1.3	การเยื้องแนวแกนของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น .....	40
3.1.4	ไบแอสของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น .....	43
3.1.5	สเกลแฟกเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	44
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	46
3.2.1	ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม .....	47
3.2.2	ไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม .....	47

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3	คุณสมบัติเชิงตั้งฉากของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	49
3.2.4	การเยื้องแนวแกนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	50
3.2.5	สเกลเฟกเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	51
3.3	สรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	52
บทที่ 4	วิธีดำเนินการวิจัย.....	53
4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ.....	53
4.1.1	ตัวรับรู้ด้วยแรงเฉื่อย.....	53
4.1.2	ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	54
4.1.3	ตัวรับส่งข้อมูล.....	55
4.1.4	เครื่องสอบเทียบ.....	55
4.2	การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง.....	57
4.2.1	การออกแบบแผ่นติดตั้ง.....	58
4.2.2	การติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องสอบเทียบ.....	58
4.3	ขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ด้วยแรงเฉื่อย.....	59
4.3.1	ขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	60
4.3.1.1	การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบหมุนหยุด.....	60
4.3.1.2	การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบหมุนต่อเนื่อง.....	61
4.3.2	ขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	62
4.3.2.1	การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	63
4.4	สรุปวิธีดำเนินการวิจัย.....	64
บทที่ 5	ผลการทดลอง.....	66
5.1	ค่าพารามิเตอร์จากการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	66
5.1.1	พารามิเตอร์ตัวรับรู้ความเร่งจากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง.....	67
5.1.2	พารามิเตอร์ตัวรับรู้ความเร่งจากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเอง.....	70
5.2	ผลการปรับแก้สัญญาณตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นด้วยค่าพารามิเตอร์.....	71
5.2.1	ผลปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง.....	71
5.2.2	ผลปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเอง.....	81

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ค่าพารามิเตอร์จากการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	83
5.3.1 พารามิเตอร์ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง..	83
5.3.2 พารามิเตอร์ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเอง...	86
5.4 ผลการปรับแก้ค่าสัญญาณตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมด้วยค่าพารามิเตอร์.....	86
5.4.1 ผลปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง ....	87
5.4.2 ผลปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเอง.....	95
5.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวิทยานิพนธ์กับวิธีการทั่วไป.....	96
5.5.1 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	97
5.5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	98
5.5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	100
5.5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	102
5.6 สรุปผลการทดลอง.....	103
บทที่ 6 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	105
6.1 สรุปผล.....	105
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
เอกสารอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	110
ภาคผนวก ก. ข้อมูลทางเทคนิคของตัวรับรู้.....	111
ภาคผนวก ข. ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องสอบเทียบ.....	119
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	126
ประวัติผู้เขียน.....	140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
5.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (1) ด้วยวิธีการหมุนหยุด.....	67
5.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (1) ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง.....	67
5.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (2) ด้วยวิธีการหมุนหยุด.....	68
5.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (2) ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง.....	68
5.5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น STIM300 ด้วยวิธีการหมุนหยุด.....	69
5.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น STIM300 ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง.....	70
5.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (1) ; M2 ด้วยวิธีการหมุนหยุด.....	71
5.8 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (1) ด้วยวิธีการหมุนหยุด.....	72
5.9 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (1) ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง.....	72
5.10 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (2) ด้วยวิธีการหมุนหยุด.....	73
5.11 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (2) ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง.....	74
5.12 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น STIM300 ด้วยวิธีการหมุนหยุด.....	74
5.13 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น STIM300 ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง.....	75
5.14 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น GY-521 (1) ; M2 ด้วยวิธีการหมุนหยุด.....	81
5.15 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม GY-521 (1).....	83
5.16 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม GY-521 (2).....	84
5.17 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม STIM300.....	85
5.18 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม GY-521 (1) ; M2.....	86
5.19 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม GY-521 (1).....	87
5.20 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม GY-521 (2).....	88
5.21 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม STIM300.....	88
5.22 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม GY-521 (1) ; M2.....	95
5.23 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น.....	97
5.24 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น.....	98
5.25 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	101
5.26 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดงส่วนประกอบหลักของระบบ IMU ..... 1
2.1	หลักการทํางานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น..... 8
2.2	โครงสร้างพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบมวลตรวจการสั่นไหว..... 8
2.3	โครงสร้างพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบเพียโซอิเล็กทริก ..... 9
2.4	ตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุมแบบดั้งเดิม..... 12
2.5	แบบจำลองพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุมแบบ MEMS ชนิดแกนเดียว..... 13
2.6	แบบจำลองพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุมแบบวัดด้วยแสง ..... 13
2.7	ตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุมแบบวงแหวนเลเซอร์ ..... 14
2.8	แกนอ้างอิงเฉื่อย ..... 15
2.9	แกนอ้างอิงวัตถุ ..... 17
2.10	แกนอ้างอิงโลก ..... 17
2.11	แกนอ้างอิงการเคลื่อนที่..... 18
2.12	วงจรถ่วงสัญญาณความถี่ต่ำลำดับต่างๆ..... 20
2.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับการลดทอนความถี่ในตัวจรถ่วงสัญญาณความถี่ต่ำ ... 20
2.14	วงจรถ่วงสัญญาณความถี่สูงลำดับต่างๆ..... 21
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับการลดทอนความถี่ในตัวจรถ่วงสัญญาณความถี่สูง ... 21
2.16	วงจรถ่วงสัญญาณช่วงความถี่..... 22
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรถ่วงสัญญาณช่วงความถี่..... 22
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่วงจรถ่วงสัญญาณช่วงความถี่ช่วงแคบ .. 24
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่วงจรถ่วงสัญญาณช่วงความถี่ช่วงกว้าง.. 24
2.20	วงจรถ่วงลดทอนสัญญาณช่วงความถี่..... 25
2.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่วงจรถ่วงลดทอนสัญญาณช่วงความถี่.... 25
2.22	กระบวนการวัดพื้นฐาน ..... 26
2.23	กราฟแสดงการสอบเทียบแบบสถิต ..... 27
2.24	การเปรียบเทียบความเที่ยงตรง และความถูกต้องของผลลัพธ์ ..... 29
2.25	ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่ม และความผิดพลาดทั้งหมด..... 30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น.....	33
3.2 วงจร RC ของตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ.....	33
3.3 กราฟแสดงลักษณะค่าสัญญาณหลังผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ.....	35
3.4 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นในแต่ละแนวแกน.....	36
3.5 แสดงลักษณะของปัญหาความไม่เป็นมุมฉาก.....	36
3.6 แสดงลักษณะการหมุนรอบแกน x.....	37
3.7 แสดงลักษณะการหมุนรอบแกน y.....	37
3.8 แสดงลักษณะการหมุนรอบแกน z.....	37
3.9 แสดงลักษณะของปัญหาการเอียงแนวแกน.....	40
3.10 แสดงลักษณะการหามุมของการเอียงแนวแกน.....	41
3.11 แสดงลักษณะค่าไบแอส.....	43
3.12 แสดงลักษณะค่าสเกลเฟกเตอร์.....	44
3.13 แสดงลักษณะการยืดหดของสปริง.....	44
3.14 แสดงขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	47
3.15 โมเดลระบบของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม.....	48
3.16 ลักษณะค่าไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมก่อนเปลี่ยนเป็นองศา.....	48
3.17 ลักษณะค่าไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมหลังเปลี่ยนเป็นองศา.....	49
3.18 ตำแหน่งในการเก็บค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมในแต่ละแนวแกน.....	51
4.1 IMU รุ่น MPU6050.....	53
4.2 IMU รุ่น STIM300.....	54
4.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3.....	54
4.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560.....	55
4.5 โมดูลรับส่งสัญญาณไร้สาย (XBee).....	55
4.6 เครื่องสอบเทียบเซนเซอร์แบบสร้างขึ้นมาเอง (Mark 2 : 3-Axis Rate Table).....	56
4.7 เครื่องสอบเทียบเซนเซอร์แบบมาตรฐานสูง (Acutronic : 3-Axis Rate Table).....	56
4.8 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเอง.....	57
4.9 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง.....	57
4.10 การออกแบบแผ่นติดตั้ง.....	58
4.11 การติดตั้งแผ่นติดตั้งเข้ากับหน้าแปลนเครื่องสอบเทียบ.....	59
4.12 การหมุนทดสอบการทำงานของระบบหลังติดตั้งอุปกรณ์.....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ลักษณะการเก็บค่าตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นโดยการหมุนรอบแกนทั้ง 3 แนวแกน.....	60
4.14 ลักษณะการเก็บค่าตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุมโดยการหมุนรอบแกนทั้ง 3 แนวแกน.....	63
5.1 ค่าความผิดพลาดหลังการปรับแก้สัญญาณด้วยค่าชดเชยที่ได้จากวิธีการหมุนหยุด.....	76
5.2 ค่าความผิดพลาดหลังการปรับแก้สัญญาณด้วยค่าชดเชยที่ได้จากวิธีการหมุนต่อเนื่อง .....	77
5.3 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ก่อนการปรับแก้.....	77
5.4 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) หลังการปรับแก้.....	78
5.5 ค่าความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ก่อนและหลังการปรับแก้.....	78
5.6 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) ก่อนการปรับแก้ .....	79
5.7 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) หลังการปรับแก้.....	79
5.8 ค่าความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) ก่อนและหลังการปรับแก้ .....	80
5.9 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 ก่อนการปรับแก้.....	80
5.10 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 หลังการปรับแก้.....	81
5.11 ค่าความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 ก่อนและหลังการปรับแก้.....	81
5.12 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 M2 ก่อนการปรับแก้ .....	82
5.13 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 M2 หลังการปรับแก้.....	82
5.14 ค่าความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 M2 ก่อนและหลังการปรับแก้.....	83
5.15 ค่าความผิดพลาดหลังการปรับแก้สัญญาณด้วยค่าชดเชยที่ได้การหมุนด้วยความเร็วต่างๆ ..	90
5.16 ค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 (1) ก่อนการปรับแก้.....	90
5.17 ค่าตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 (1) หลังการปรับแก้.....	91
5.18 ความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 (1) จากการทดลอง.....	91
5.19 ค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 (2) ก่อนการปรับแก้.....	92
5.20 ค่าตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 (2) หลังการปรับแก้.....	92
5.21 ความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 (2) จากการทดลอง.....	93
5.22 ค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม STIM300 ก่อนการปรับแก้.....	93
5.23 ค่าตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม STIM300 หลังการปรับแก้.....	94
5.24 ความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม STIM300 การทดลอง.....	94
5.25 ค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 ; M2 ก่อนการปรับแก้.....	95
5.26 ค่าตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 ; M2 หลังการปรับแก้.....	96
5.27 ความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงมุม MPU6050 ; M2 การทดลอง.....	96
5.28 ผลการปรับแก้สัญญาณด้วยวิธีการของวิทยานิพนธ์กับวิธีการที่ใช้ทั่วไป.....	100

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.29 ผลการปรับแก้สัญญาณด้วยวิธีการของวิทยานิพนธ์กับวิธีการที่ใช้ทั่วไป..... 103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$a_r$	ค่าสัญญาณดิบของแกนต่างๆ ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$a_{ip}$	ค่าสัญญาณหลังผ่านการกรองสัญญาณความถี่ต่ำของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$a_{non}$	ค่าสัญญาณหลังผ่านการชดเชยคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$a_{mis}$	ค่าสัญญาณหลังผ่านการชดเชยการเอียงแนวแกนของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$a_{bi}$	ค่าสัญญาณหลังผ่านการชดเชยค่าไบแอสของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$a_{sc}$	ค่าสัญญาณหลังการสอบเทียบสเกลเฟกเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$k_a$	ค่าคงที่ความราบเรียบของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$\theta$	ค่ามุมการหมุนของมอเตอร์
$a_{zero}$	ค่าของแกนที่อยู่บนระนาบเดียวกับพื้นโลกของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$\alpha$	ค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่ได้จากการหมุนรอบแกน x
$\beta$	ค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่ได้จากการหมุนรอบแกน y
$\gamma$	ค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่ได้จากการหมุนรอบแกน z
$O_a$	ค่าชดเชยคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$a_{height}$	ค่าสัญญาณในแนวระนาบกับพื้นโลกของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$a_{max,global}$	ค่าสัญญาณสูงสุดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นที่ถูกเลือกใช้
$M_a$	ค่าชดเชยการเอียงแนวแกนของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$b_a$	ค่าชดเชยไบแอสของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$S$	ค่าชดเชยสเกลเฟกเตอร์
$G$	ค่าขนาดความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลก
$a_{max}$	ค่าสูงสุดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น
$g_r$	ค่าสัญญาณดิบของแกนต่างๆ ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม
$g_{ip}$	ค่าสัญญาณหลังผ่านการกรองสัญญาณความถี่ต่ำของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม
$g_{mis}$	ค่าสัญญาณหลังผ่านการชดเชยคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก และการเอียงแนวแกน
$g_{bi}$	ค่าสัญญาณหลังผ่านการชดเชยค่าไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม
$g_{sc}$	ค่าสัญญาณหลังการสอบเทียบสเกลของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม
$k_g$	ค่าคงที่ความราบเรียบของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม
$b_g$	ค่าชดเชยไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม
$M_g$	ค่าชดเชยคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก และการเอียงแนวแกนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม
$I$	ค่าความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ของเครื่องสอบเทียบ
$S$	ค่าความเร็วที่วัดได้จริงของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

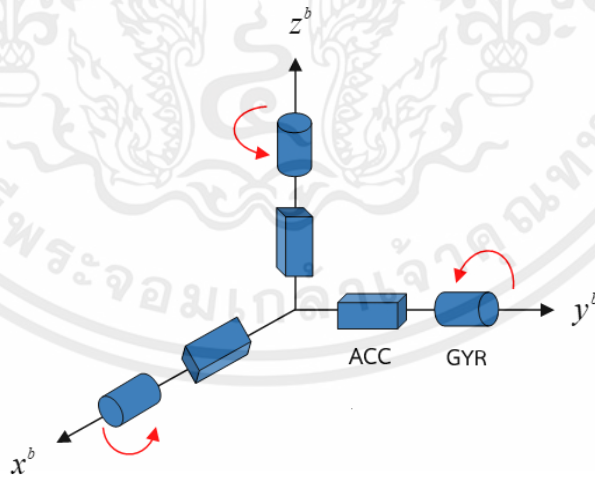
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติในออนไลน์เท่านั้น โปรดใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ระบบ IMU (Inertial Measurement Unit) เป็นระบบหนึ่ง ซึ่งบรรจุในระบบนำร่องด้วยแรงเฉื่อย (Inertial Navigation System) มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) โดยปกติจะมีตัวรับรู้ตรวจวัดอย่างน้อยหนึ่งตัวในแต่ละแนวแกน ลักษณะการออกแบบโดยทั่วไป IMU จะมีลักษณะเป็นกล่อง ภายในบรรจุตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น 3 ตัว และ ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมอีก 3 ตัว ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจะถูกติดตั้งเข้าไปในแต่ละแนวแกนที่ต้องการวัด โดยที่แต่ละแนวแกนตั้งฉากกัน ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมอีก 3 ตัวจะถูกติดตั้งในลักษณะตั้งฉากเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งระบบ IMU นั้นเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญของระบบตรวจจัดการเคลื่อนไหว (Motion sensing) และระบบควบคุม (Control) มีความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในสาขาต่างๆ ทั้งทางทหาร และพลเรือน เช่น หุ่นยนต์ (Robotics) ระบบควบคุมการยิง หรือแม้กระทั่งระบบควบคุมอัตโนมัติของยานต่างๆ (เรือ, อากาศยาน, ยานใต้น้ำ) เป็นต้น หลักการทำงานของ IMU ใช้ค่าที่วัดได้จากตัวรับรู้แรงเฉื่อย (Inertial sensors) ประกอบไปด้วยตัวรับรู้ 2 ประเภท คือ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม เพื่อมาทำการประมวลผลร่วมกันในการหามุมอ้างอิง (Attitude)



รูปที่ 1.1 แสดงส่วนประกอบหลักของระบบ IMU

เอกสารนี้เป็นเอกสารในปัจจุบัน IMU แบบ MEMS (Micro Electro Mechanical System) ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดก็ตาม และรวดเร็ว จนทำให้มีขีดความสามารถที่สูงขึ้น มีราคาถูกลง อีกทั้งยังใช้พลังงานต่ำ และมีน้ำหนักเบา แม้ว่า IMU แบบ MEMS จะมีข้อได้เปรียบดังที่กล่าวมาในข้างต้น แต่ก็ยังมีความผิดพลาด

เนื่องจากค่าไบแอส (Bias) ของตัววัดรับรู้ ค่าความผิดพลาดเนื่องจากการวางตัวของตัวรับรู้ที่ไม่เป็นไปตามแกนตั้งฉาก ค่าความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิ รวมทั้งความผิดพลาดจากกระบวนการผลิต ซึ่งจากความผิดพลาดต่างๆ ดังที่กล่าวมานั้น ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดด้วย IMU มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง

การสอบเทียบเป็นขั้นตอนสำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลกับข้อมูลอ้างอิงที่ถูกต้อง เกี่ยวกับปริมาณของการวัด ซึ่งจะช่วยแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้ ทั้งตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยทำการชดเชยค่าต่างๆ เพื่อแก้ความผิดพลาดของตัวรับรู้ อย่างเป็นทางการ ดังนั้นก่อนที่จะนำ IMU ไปใช้งานจึงควรสอบเทียบเสียก่อน เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการอ่านค่ามากที่สุด

วิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษา และนำเสนอวิธีการสอบเทียบ IMU อย่างละเอียดทีละขั้นตอน เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอน และแนวคิดที่ใช้ในการสอบเทียบ อีกทั้งยังทำให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการแก้ไขข้อผิดพลาดของตัวรับรู้ที่จะแสดงในแต่ละขั้นตอน เนื่องจากในปัจจุบันมีวิธีการสอบเทียบต่างๆ มากมาย ทั้งวิธีการที่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง และราคาสูง หรือวิธีการที่ยุงยากซับซ้อน ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับบุคคลทั่วไป วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอแนวทางที่ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนต่ำ รวมทั้งมีขั้นตอนในการสอบเทียบที่ไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถศึกษา และเรียนรู้ค่าความผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้ได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความเหมาะสมกับตัวรับรู้ IMU แบบ MEMS ถึงแม้จะใช้อุปกรณ์ในการสอบเทียบที่มีความแม่นยำไม่สูง แต่ผลของการสอบเทียบทั้งตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม สามารถที่จะให้ค่าที่มีความถูกต้องแม่นยำได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นใน IMU
2. เพื่อศึกษาอัลกอริทึมต่างๆ ที่ใช้ในการแก้ไขค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น
3. เพื่อออกแบบขั้นตอน และวิธีการที่ใช้ในการสอบเทียบ IMU

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ทำการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยแยกขั้นตอน และวิธีการสอบเทียบของตัวรับรู้ทั้ง 2 ตัวออกจากกัน โดยกำหนดให้ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิไม่ถูกนำมาคิด เมื่อทำการสอบเทียบตัวรับรู้ทั้ง 2 แล้ว ตัวรับรู้ทั้ง 2 จะให้ค่าที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ใช้ IMU ชนิด MEMS ที่ประกอบไปด้วยตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น 3 แกน และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม 3 แกน
2. ใช้การรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย
3. ใช้อัลกอริทึมในการสอบเทียบโดยแยกขั้นตอน และวิธีการสอบเทียบระหว่าง ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมออกจากกัน
4. การคำนวณอัลกอริทึมของค่าที่ได้จาก IMU จะถูกประมวลผลแบบออฟไลน์
5. หลังการสอบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม มีค่าลดลง

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. กำหนดวัตถุประสงค์ และขอบเขตการวิจัย
2. ศึกษาวิธีการ และอัลกอริทึมที่ใช้ในการสอบเทียบ IMU
3. ศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลจาก IMU ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม
4. ศึกษาการใช้โปรแกรม Arduino เพื่อใช้ในการออกคำสั่งต่างๆ และใช้ในการรับส่งข้อมูล
5. ศึกษาการใช้โปรแกรม Microsoft Excel เพื่อใช้ในการคำนวณค่าของอัลกอริทึมที่ใช้
6. สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ IMU เพื่อตรวจสอบอัลกอริทึมที่ใช้ในการสอบเทียบ
7. ทดสอบอัลกอริทึมกับอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อยืนยันความถูกต้อง
8. อภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจากกรณีต่างๆ
9. สรุปผล และข้อเสนอแนะ

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจหลักการทำงาน และข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นใน IMU ทั้งของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม รวมทั้งยังสามารถเก็บข้อมูลของ IMU เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้
2. สามารถสร้างเครื่องทดสอบ IMU อย่างง่ายได้ อีกทั้งยังสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อออกคำสั่งให้กับเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ
3. สามารถศึกษา และเข้าใจอัลกอริทึมที่ใช้ในการสอบเทียบในแต่ละขั้นตอน อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองได้อย่างมีหลักการ และถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันการสอบเทียบ IMU ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม สามารถทำได้หลายวิธี ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบ IMU โดยวิธีการประมาณค่าสเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) การเอียงแนวแกน (Misalignment) คุณสมบัตินิ่งตั้งฉาก (Orthogonality) และค่าไบแอส (Bias) โดยทำการปรับปรุงค่าสัญญาณก่อนนำไปคำนวณ โดยใช้ตัวกรองแบบความถี่ต่ำ (Low pass filter) ในการลดสัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนของการเก็บข้อมูลหรือแม้กระทั่งเกิดจากตัวของตัวรับรู้เอง เมื่อนำค่าสัญญาณที่ทำการปรับปรุงด้วยวิธีการดังกล่าวแล้วนั้น จะนำค่าที่ได้ไปทำการหาค่าความผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นของตัวรับรู้ แล้วนำค่าต่างๆ เหล่านี้มาทำการชดเชย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้กับตัวรับรู้ให้มากยิ่งขึ้น

เพื่อที่จะทำการวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลของ IMU ชนิดต้นทุนต่ำ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ตัวกรองความถี่ต่ำ และข้อผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้ที่เกิดขึ้นเพื่อทำการชดเชย รวมทั้งได้ศึกษาขั้นตอนและวิธีการต่างๆ ที่ถูกใช้ในการสอบเทียบ พร้อมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบที่ผ่านๆ มา เพื่อที่จะทำการออกแบบกระบวนการในการสอบเทียบ ให้มีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนในการชดเชยข้อผิดพลาด สามารถเข้าใจขั้นตอนการชดเชยค่าต่างๆ ได้ง่าย รวมทั้งสามารถออกแบบอุปกรณ์ในการสอบเทียบที่มีราคาไม่สูง และสามารถสร้างขึ้นเองแต่ยังคงมีประสิทธิภาพพอที่จะใช้ในการสอบเทียบได้

### 2.1 ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการสอบเทียบ IMU ชนิดต้นทุนต่ำ ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ขั้นตอนในการสอบเทียบจะเริ่มจากการสร้างเครื่องมือ หรือการเลือกเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบ เมื่อได้เครื่องมือในการสอบเทียบจะเข้าสู่ขั้นตอนในการเก็บข้อมูล และเข้าสู่ขั้นตอนในการกรองสัญญาณที่ได้จากการเก็บข้อมูล หลังจากที่ได้ข้อมูลที่ได้ผ่านการกรองแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนของการใช้อัลกอริทึมในการแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่ากระบวนการสอบเทียบ รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบนั้นมีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี ขึ้นอยู่กับผู้วิจัยว่าจะเลือกใช้วิธีการแบบใดในการสอบเทียบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องมือ และเลือกใช้ อัลกอริทึม ดังนั้นจึงมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องศึกษาข้อมูลจากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิจัยการสอบเทียบ ให้ได้ อัลกอริทึม และเครื่องมือที่ใช้สอบเทียบ เพื่อให้กระบวนการสอบเทียบเป็นไปตามความต้องการ และอยู่ภายในขอบเขตงานวิจัยมากที่สุด ดังจะกล่าวต่อไปนี้

W T Fong, S K Ong และ A Y C Nee (2008) บทความฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยใช้วิธีการ LM (Levenberg-Marquardt) โดยใน ส่วนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะใช้ควอเตอร์เนียนเข้ามาช่วยในการแก้ค่าเพื่อหาพารามิเตอร์ที่ ต้องการ

Benjamin Peter (2011) บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการสร้างเครื่องสอบเทียบแบบอัตโนมัติ โดยได้ทำการออกแบบเครื่องสอบเทียบที่ใช้ได้ทั้งกับ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็ว เชิงมุม ซึ่งทำให้การเก็บข้อมูลมีความสะดวกรวดเร็วมากขึ้นกว่าวิธีการใช้มือแบบเก่าอีกด้วย ซึ่ง บทความนี้ถูกใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือสอบเทียบแบบอัตโนมัติของงานวิจัยฉบับนี้

Mohammed Awad, Abbas Dehghani, David Moser และ Saeed Zahedi (2011) บทความฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบ 3 แกน โดยนำเสนอวิธีการ เก็บค่า 12 ตำแหน่ง เพื่อใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ข้อผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้ เพื่อลด จำนวนในการเก็บข้อมูลลงเพื่อประหยัดเวลาในการเก็บข้อมูล เนื่องจากเป็นวิธีการที่จะต้องใช้มือใน การปรับตำแหน่งของตัวรับรู้ในแต่ละตำแหน่ง

Bin Fang, Wusheng Chou, และ Li Ding (2013) บทความฉบับนี้ได้กล่าวถึงการใช้ตัวกรอง คาลมานในการสอบเทียบ IMU ซึ่งเกิดข้อผิดพลาดขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป โดยทำการทดสอบตัว รับรู้ที่อุณหภูมิต่างๆ และลักษณะท่าทางต่างๆ เพื่อยืนยันความถูกต้องของอัลกอริทึม

ขามา สารพร, จิระพล ศรีเสริฐผล และ เกียรติศักดิ์ ทีฆะ (2013) ในบทความนี้ได้กล่าวถึงวิธีการ สอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบ 2 แกน โดยใช้ตัวกรองคาลมานในการลดค่าสัญญาณรบกวน แล้วใช้วิธีการ Nonlinear least square ในการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อชดเชยค่าความผิดพลาด ต่างๆ โดยได้ทำการสร้างเครื่องที่ใช้ทดสอบ และเก็บข้อมูลจากมอเตอร์เซอร์โวที่มีคุณภาพสูง

David Tedaldi, Alberto Pretto และ Emanuele Menegatti (2014) บทความนี้ได้นำเสนอ วิธีการสอบเทียบ โดยไม่ใช้อุปกรณ์ภายนอกใดๆ ในการช่วย โดยใช้เพียงแค่ตัวรับรู้วัดค่าในลักษณะ ท่าทางต่างๆ แล้วทำการประมวลผลผ่านโปรแกรม Matlab ซึ่งตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ ความเร็วเชิงมุม ได้ใช้วิธีการ LM (Levenberg-Marquardt) ในการหาค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ ที่ เกิดจากการตั้งสมมติฐานข้อผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้ ซึ่งวิธีการนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในการ สอบเทียบ IMU ในปัจจุบัน

Jeff Ferguson (2015) บทความนี้แนะนำเสนอ Vector Nav VN - 200 เป็นระบบนำทางแบบ MEMS ที่มีตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม เช่นเดียวกับตัวรับรู้นำทางอื่นๆ ซึ่งได้ กล่าวถึงข้อผิดพลาดของตัวรับรู้ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ทำให้ตัวรับรู้เกิดข้อผิดพลาด จึงได้ นำเสนอกระบวนการสอบเทียบโดยการหาค่าไบแอสของตัวรับรู้ โดยบทความนี้ได้ใช้โต๊ะระดับที่มี ความแม่นยำสูงในการประมาณค่าไบแอส

Jan Rohac, Martin Sipos และ Jakub Simanek (2015) บทความฉบับนี้ได้เสนอวิธีการ สอบเทียบ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ด้วยการตั้งสมมติฐานความผิดพลาด

ของตัวรับรู้ ประกอบไปด้วย สเกลเฟกเตอร์ ความไม่เป็นมุมฉาก การเอียงแนวแกน และไบแอส โดยวิธีการคำนวณจะใช้ Matlab toolbox ในการสร้างอัลกอริทึม ซึ่งจะใช้ fminunc function ในการหาค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และใช้ Cholesky decomposition และ LU factorization ในการหาค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยในส่วนของเก็บข้อมูล ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจะถูกเก็บในตำแหน่งต่างๆ เมื่อหยุดนิ่ง 24 ตำแหน่ง และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะถูกเก็บเมื่อทำการหมุนด้วยมือ โดยอาศัย ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบ FOG ในการระบุตำแหน่งความเร็วของตัวรับรู้ที่ทำการสอบเทียบ ซึ่งบทความนี้ถูกใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ในการสอบเทียบ IMU ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

Yuanxin Wu และ Ling Pei (2015) บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยอาศัยการสอบเทียบร่วมกับตัวรับรู้สนามพลังแม่เหล็ก โดยการตั้งสมมติฐานข้อผิดพลาดของตัวรับรู้ ซึ่งประกอบไปด้วย สเกลเฟกเตอร์ ความไม่เป็นมุมฉาก และค่าไบแอส ซึ่งทำการสอบเทียบด้วยวิธีการ EKF (Extended Kalman filter) จากการสอบเทียบสามารถแสดงให้เห็นว่าการสอบเทียบร่วมกับตัวรับรู้สนามพลังแม่เหล็กสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

ปิจิราวุช เวียงจันทา, ไกรสิทธิ์ มหิวรรณ, สมศักดิ์ คงโชติ และ ญัฐวุฒิ เตไปวา (2015) บทความนี้นำเสนอการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นชนิดต้นทุนต่ำ (Low-Cost Accelerometer) ในตัวรับรู้ IMU ด้วยวิธีการกำลังสองสมบูรณ์ที่น้อยที่สุด (Least Mean Squares) โดยไม่ต้องใช้โต๊ะปรับระดับที่มีความละเอียดแม่นยำสูง ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นถูกติดตั้งบนโต๊ะปรับระดับเพื่อปรับตำแหน่งจำนวน 6 ทิศทางตามแกนของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น ระบบสมองกลแบบฝังตัวถูกนำมาใช้ในการบันทึกค่าที่วัดได้จากตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิคแบบ HIL (Hardware in the Loop) เพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ การเอียงแนวแกน (Misalignment) สเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) และ ค่าไบแอส (Bias) ด้วยวิธีการแบบกำลังสองสมบูรณ์ที่น้อยที่สุดด้วยโปรแกรม Matlab หลังจากการสอบเทียบสามารถลดความผิดพลาดของการวัดค่าความเร่งในแต่ละแกนต่างๆ ได้ประมาณ 2 – 10 %

Jixin Lv, Ankit A. Ravankar, Yukinori Kobayashi และ Takanori Emaru (2016) บทความนี้นำเสนอวิธีการที่ง่ายที่สุด ซึ่งเป็นการสอบเทียบตัวรับรู้ IMU ต้นทุนต่ำ โดยใช้ลูกบาศก์พลาสติกที่ทำโดยเครื่องพิมพ์ 3D ถูกนำมาใช้เป็นตัวปรับตำแหน่งต่างๆ ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น โดยจะใช้การเปลี่ยนพิกัดแกนอ้างอิงเพื่อช่วยในการหาค่าระหว่างตัวรับรู้กับลูกบาศก์ ในส่วนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะถูกหมุนกับโต๊ะทำงานด้วยมือ โดยอาศัยการบอกความเร็วในการหมุนจากตัวเลเซอร์สแกน โดยวิธีการคำนวณจะใช้ Matlab toolbox ในการสร้างอัลกอริทึม ซึ่งจะใช้ fminunc function ในการหาค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และใช้ Cholesky decomposition และ LU factorization ในการหาค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ซึ่งการตั้งสมมติฐานความผิดพลาดของตัวรับรู้ในบทความนี้ถูกใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

V Avrutov, P Aksonenko, P Henaff และ Laurent Ciarletta (2017) บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบ IMU ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม และวงจรรวมผลสัญญาณ ซึ่งจะใช้วิธีการเก็บข้อมูลเพื่อสอบเทียบโดยการหมุน IMU ไปยังมุมต่างๆ เพื่อสอบเทียบทั้งสามแนวแกน โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวกรองคาลมานในการสอบเทียบ อีกทั้งยังใช้เครื่องสอบเทียบประสิทธิภาพสูงในการสอบเทียบร่วมด้วย เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

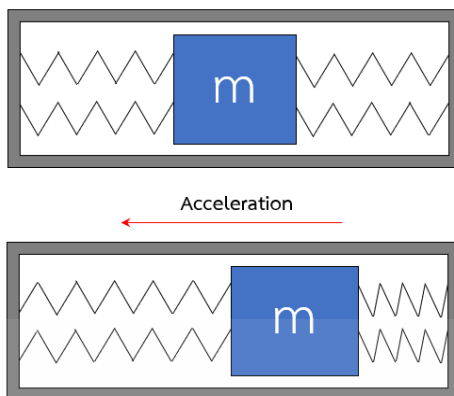
จากงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมานั้น ยังเป็นเพียงส่วนน้อยของวิธีการสอบเทียบที่ถูกคิดค้นขึ้น ยังคงมีวิธีการสอบเทียบต่างๆ อีกมากมายที่ไม่ได้ถูกกล่าวถึง ซึ่งผู้ที่ให้ความสนใจควรศึกษาเพิ่มเติมถึงวิธีการอื่นๆ ที่ถูกคิดค้นขึ้นมาจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงกระบวนการสอบเทียบอย่างลึกซึ้ง

## 2.2 ระบบ IMU

ระบบ IMU (Inertial Measurement Unit) เป็นระบบหนึ่ง ซึ่งบรรจุในระบบนำทางด้วยแรงเฉื่อย (Inertial Navigation System : INS) มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ซึ่งโดยปกติจะต้องมีตัวรับรู้อย่างน้อยหนึ่งตัวในแต่ละแนวแกน ลักษณะการออกแบบโดยทั่วไป IMU จะมีลักษณะเป็นกล่อง ภายในบรรจุตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น 3 ตัว และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม อีก 3 ตัว ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจะถูกติดตั้งเข้าไปในแต่ละแนวแกนที่ต้องการวัด โดยที่แต่ละแนวแกนตั้งฉากกัน ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมอีก 3 ตัวจะถูกติดตั้งในลักษณะตั้งฉากเช่นเดียวกัน

### 2.2.1 ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น (Accelerometer) มีหลักการทำงานง่ายๆ คือ ห้องสี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่ทุกด้านของกำแพงมีสปริงติดตั้งอยู่ เมื่อห้องเอียงไปทางใดทางหนึ่ง สปริงในด้านนั้นๆ ก็จะยุบตัว โดยสมมติว่าแรงดันของสปริงมีน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก แล้วใช้วงจรไฟฟ้าดึงค่าเอาต์พุต (Output) ออกมา ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นถูกใช้สำหรับเป็นตัวชี้ว่าอยู่ในสถานะหยุดนิ่ง (Static) หรือเคลื่อนไหว (Dynamic) ซึ่งทำให้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นเป็นตัวบอกสถานะความเอียงได้เป็นอย่างดี

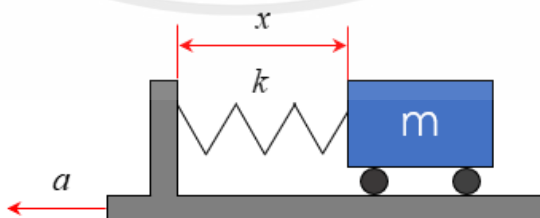


รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

อัตราเร่ง คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเทียบกับเวลา เครื่องมือที่ใช้วัดอัตราเร่งก็คือ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น โดยลักษณะการตรวจวัดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ (1) การตรวจวัดการช็อก (Shock) และการสั่นสะเทือน (Vibration) ซึ่งการช็อก คืออัตราการเร่งขนาดมหาศาลที่เกิดในช่วงเวลาสั้นๆ และการสั่นสะเทือน คืออัตราเร่งขนาดเล็กที่เกิดขึ้นซ้ำกันไปเรื่อยๆ (2) การตรวจวัดอัตราเร่งของวัตถุ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการระบุตำแหน่ง ความเร็ว และระยะทางที่ได้จากการเคลื่อนที่ โดยตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

### 2.2.1.1 ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบมวลตรวจการสั่นไหว

ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบมวลตรวจการสั่นไหว (Seismic mass accelerometer) อาศัยหลักการตรวจวัดระยะขจัดเชิงเส้นแล้วนำไปคำนวณหาอัตราเร่งที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคดังกล่าวสามารถอธิบายง่ายๆ ได้ก็คือ วัตถุชิ้นหนึ่งจะมีความเร่งได้ ก็จะต้องมีแรงมากกระทำ ยิ่งมีแรงมากกระทำ ก็จะมีแรงมาก ในขณะที่เดียวกันแรงต้านการเคลื่อนที่ก็จะมากด้วย นอกจากนี้เมื่อมีแรงมาทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ ก็จะมีระยะขจัด ซึ่งก็จะแปรผันตรงกับแรงที่มากระทำที่วัตถุ ยิ่งแรงมาก ระยะขจัดยิ่งมาก จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้นำไปใช้เป็นหลักการพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบมวลตรวจการสั่นไหว ในการตรวจวัดอัตราเร่งของวัตถุในทอมของระยะขจัดที่เกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ  $F = ma = kdx$  อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบมวลตรวจการสั่นไหว

จากรูปที่ 2.2 โครงสร้างนี้มีมวล  $m$  ที่เรียกว่ามวลตรวจการสั่นไหว (Seismic mass) ยึดติดอยู่กับสปริงที่มีค่าคงตัวของสปริง (Spring constant) เท่ากับ  $k$  และมวลนี้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระดับได้ ซึ่งหลักการทำงานก็คือ เมื่อตัวตัวรับรู้นี้ถูกทำให้มีอัตราเร่งเกิดขึ้นจะส่งผลให้มวล  $m$  เคลื่อนที่ ซึ่งระยะที่เคลื่อนที่ออกไปจะเป็นระยะขจัดเท่ากับ  $x$  และมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวมิเตอร์ ดังนั้นอัตราเร่ง  $a$  ของวัตถุสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

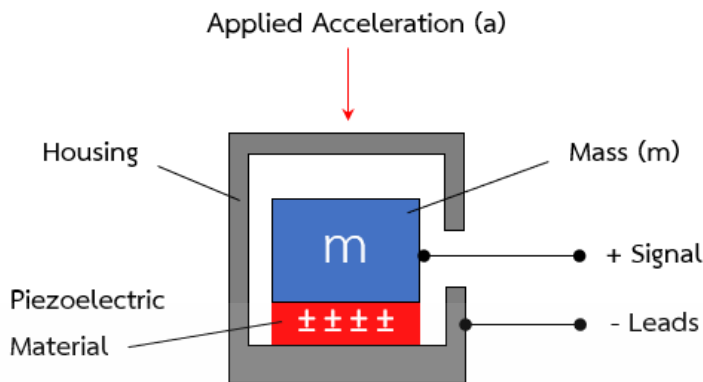
$$a = \frac{kx}{m} \quad (2.1)$$

โดยที่  $a$  คือ อัตราเร่งของวัตถุ มีหน่วยเป็น m/s,  $x$  คือ ระยะขจัดของมวล มีหน่วยเป็น m,  $k$  คือ ค่าคงที่ของสปริง มีหน่วยเป็น N/m และ  $m$  คือ น้ำหนักของมวล มีหน่วยเป็น kg

จากสมการดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้ระยะขจัดของมวล  $m$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าลดลง จะทำให้มวล  $m$  เคลื่อนที่ไปดันสปริง เมื่ออัตราเร่งของวัตถุหยุดลง ก็จะทำให้มวล  $m$  เคลื่อนที่กลับมาอยู่ตำแหน่งเดิม (ตำแหน่งอ้างอิง) แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดระยะขจัดของมวล  $m$  ได้โดยอาศัยตัวรับรู้อีกชนิดหนึ่ง คือตัวรับรู้วัดระยะขจัดเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformer : LVDT, Potentiometer) ส่วนการวิเคราะห์หาค่าอัตราเร่งที่เกิดขึ้นเราสามารถคำนวณหาได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบมวลตรวจการสั่นไหว นิยมใช้ในการตรวจวัดลักษณะการช็อก และลักษณะการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่ำมากๆ เช่น ในเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว หรือในเครื่องมือตรวจวัดการปะทุใต้ดินของภูเขาไฟ ฯลฯ

### 2.2.1.2 ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบเพียโซอิเล็กทริก

ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric accelerometer) คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของผลึกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric crystal) ถูกค้นพบโดย Pierre และ Jacques Curie ในราวปี ค.ศ.1880 ซึ่งผลึกเพียโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติพิเศษ คือเมื่อถูกแรงทางกลมากระทำจะสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นมาโดยเป็นส่วนสัดส่วนกับแรงกระทำนั้น ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษนี้ได้ถูกดัดแปลงนำไปใช้สร้างอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น ใช้เป็นแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับนาฬิกาข้อมือดิจิตอล และยังใช้สร้างตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบเพียโซอิเล็กทริกอีกด้วย โครงสร้างของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วยมวลตรวจการสั่นไหว (Seismic mass) ยึดติดกับผลึกเพียโซอิเล็กทริก และบรรจุอยู่ในตัวถังป้องกัน โดยผลึกเพียโซอิเล็กทริกที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ ผลึกควอตซ์ และผลึกโซเดียมโปตัสเซียมตาเตรต (Sodium potassium tartrate) เพราะมีความทนทานต่อแรงกระทำ และราคาไม่แพงมากนัก



รูปที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบเพียโซอิเล็กทริก

เมื่อมวลตรวจการสั่นไหว (Seismic mass) ถูกทำให้เกิดอัตราเร่งขึ้น (ถูกกด) จะส่งผ่านแรงกดไปกระทำกับผลึกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric crystal) ที่ถูกยึดติดอยู่ด้วยกัน ด้วยคุณสมบัติพิเศษจะทำให้ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้น และถูกสายนำสัญญาณออกไปยังเอาต์พุตของวงจร โดยที่ด้านเอาต์พุตจะต้องมีวงจรขยายประจุไฟฟ้า (Charge amplifier) เพื่อขยายค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นแรงดันเอาต์พุตตามสัดส่วนของอัตราเร่งที่เกิด จะได้สามารถแสดงผลได้ด้วยโวลต์มิเตอร์ ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อทางด้านความถี่สูงได้ดี แต่ในทางกลับกันก็จะมีผลตอบสนองทางด้านความถี่ต่ำที่ไม่ดีนัก มีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถใช้งานที่มีอัตราเร่งได้สูงถึง  $250,000 \text{ m/s}^2$

### 2.2.2 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) คือล้อที่ติดตั้งในกรอบวงแหวนหมุนได้ ที่ยอมให้ล้อหมุนโดยอิสระในทิศทางใด ๆ ก็ได้ เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อหมุน เพื่อช่วยรักษาทิศทางของแกนหมุน โมเมนตัมเชิงมุมของล้อหมุนดังกล่าวทำให้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมสามารถรักษาทิศทางการหมุนได้ แม้ว่ากรอบล้อจะเอียง จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำหลักการการรักษาทิศทางการหมุนไปประยุกต์ใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่างๆ มากมาย เช่น เข็มทิศตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมที่ไม่ขึ้นกับการหมุนของโลก การสร้างนักบินอัตโนมัติโดยใช้คุณสมบัติการรักษาทิศทางของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม เพื่อให้เครื่องบินบินได้ตรงเส้นทาง มีการใช้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบ 2 กรอบวงแหวนเพื่อสร้างอุปกรณ์รักษาเสถียรภาพ ที่เรียกว่า ไจโรสแตบิไลเซอร์ (Gyrostabilizer) สำหรับใช้ลดการโคลงของเรือ ซึ่งเท่ากับลดความเสียหายของสินค้าลงเหลือน้อยที่สุด และลดความเค้นในโครงสร้างกระดูกงู อีกทั้งยังเพิ่มความรู้สึกสบายในการนั่งเรือของผู้โดยสาร สำหรับตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบ 3 กรอบวงแหวนมีการใช้ในการออกแบบเส้นขอบฟ้าประดิษฐ์ครั้งแรกสำหรับอากาศยาน เครื่องมือนี้บ่งบอกระดับการเียง (Pitch) และการหมุน (Roll) ต่อตัวนักบินหรือคนขับ และมีประโยชน์อย่างยิ่งโดยเฉพาะเมื่อไม่สามารถมองเห็นเส้นขอบฟ้าได้เนื่องจากสภาพอากาศไม่ดี นอกจากนี้ยังมี

การใช้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบ 3 กรอบวงแหวน ร่วมกับตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบ 2 กรอบวงแหวน ในการบังคับทิศทางอัตโนมัติของจรวดนำวิถี และในดาวเทียมบางดวงก็ใช้หลักของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม เพื่อปรับตำแหน่งของดาวเทียมในอวกาศ หรือใช้ในการหมุนแผงโซลาร์เซลล์ให้หันไปทางดวงอาทิตย์ตลอดเวลา จากประโยชน์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมที่มีลักษณะเป็นล้อหมุน และกรอบวงแหวนนั้นยังมีข้อเสียที่สำคัญ นั่นคือขนาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมทำให้ต้องการพื้นที่ในการติดตั้ง อีกทั้งการเคลื่อนที่ของแต่ละกรอบวงแหวนอาจมีการติดขัดของจุดหมุนได้ ซึ่งส่งผลต่อการวัด และการควบคุมทิศทางของอุปกรณ์ จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจึงถูกพัฒนาให้อยู่ในอีกรูปแบบหนึ่งนั่นคือ ชิปอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบล้อหมุน ทำให้มีการประยุกต์ใช้งานตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมอย่างกว้างขวางมากขึ้น โดยเฉพาะในอุปกรณ์ขนาดเล็ก ยกตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์บังคับ และเครื่องบินไร้คนขับขนาดเล็ก เป็นต้น ซึ่งตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมสามารถแบ่งชนิดตามหลักการทำงานพื้นฐานได้เป็น 4 ประเภทดังจะกล่าวต่อไปนี้

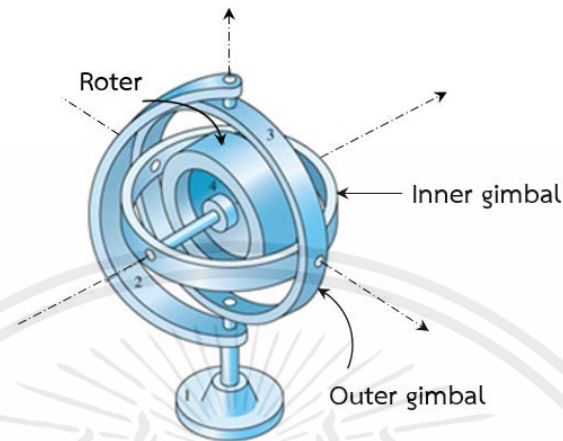
### 2.2.2.1 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบดั้งเดิม

ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบดั้งเดิม (Rotary gyroscopes) ใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม สามารถกล่าวได้ว่าเมื่อแรงกระทำเนื่องมาจากแรงบิดภายนอกของระบบเท่ากับศูนย์ ผลรวมโมเมนตัมเชิงมุมของระบบจะมีค่าคงที่ ทั้งขนาด และทิศทาง ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมชนิดนี้ประกอบไปด้วยล้อหมุน ซึ่งติดไว้บนชุดของกรอบวงแหวน ในขณะที่ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมหมุนมันจะรักษาตำแหน่ง หรือวงโคจรให้คงที่ เมื่อมีแรงบิดภายนอก หรือการหมุนของแกนใดแกนหนึ่งมากระทำกับอุปกรณ์นี้ ตำแหน่งหรือวงโคจรจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถวัดความเร็วเชิงมุมได้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปรากฏการณ์ไจโรสโคปิก (Gyroscopic phenomenon)

ปรากฏการณ์ไจโรสโคปิกเกิดขึ้นเมื่อวัตถุซึ่งหมุนรอบแกนหมุน (Spin axis) มีแรงบิดภายนอกมากระทำในทิศทางตั้งฉากกับแกนหมุน เรียกแกนที่มีแรงบิดภายนอกมากระทำนี้ว่าแกนอินพุต (Input axis) ในระบบที่มีการหมุนรอบแกนเมื่อมีแรงบิดภายนอกมากระทำ เวกเตอร์ของโมเมนตัมเชิงมุมซึ่งเดิมอยู่ในทิศทางแกนหมุนจะย้ายเข้ามาในทิศทางของเวกเตอร์แรงบิดที่มากระทำ ผลเนื่องจากแรงบิดทำให้แกนหมุน หมุนรอบแกนที่ตั้งฉากกับแกนหมุน และแกนอินพุต เรียกแกนนี้ว่าแกนเอาต์พุต (Output axis)

ปัจจุบันตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบดั้งเดิม ถูกประยุกต์ใช้ในการรักษาเสถียรภาพเป็นหลัก และสำหรับชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ไม่ว่าจะเป็นกรอบวงแหวน (Gimbal) หรือล้อหมุน (Rotor) นั้นหมายความว่าตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมชนิดนี้ อาจเกิดการชำรุดหรือติดขัดเมื่อใช้งานไปเป็นเวลานาน มีการพัฒนาลูกปืน (Bearing) เพื่อลดการชำรุดและโอกาสที่จะเกิดการติดขัดขึ้นในตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมชนิดนี้ ผลของการมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่อีกอย่างหนึ่งก็คือมีข้อจำกัดเรื่องการผลิตขนาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม อย่างไรก็ตามในปัจจุบันตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมชนิดนี้ ยังมีการใช้ในงาน

ด้านการทหาร หรือการเดินเรือ ที่ซึ่งขนาดทางกายภาพของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมชนิดนี้ไม่ได้เป็นอุปสรรคในการทำงาน

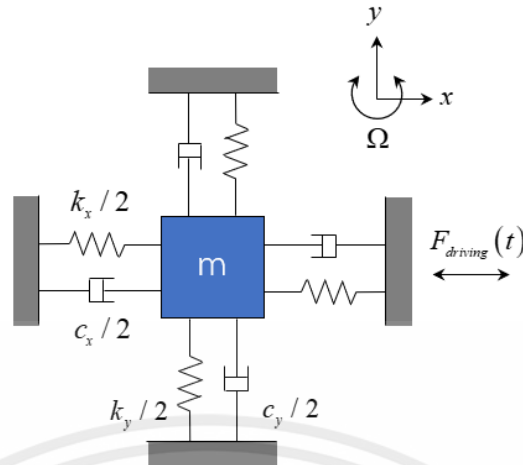


รูปที่ 2.4 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบดั้งเดิม

#### 2.2.2.2 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดการสั่นสะเทือน

ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดการสั่นสะเทือน (Vibrating structure gyroscopes) เป็นอุปกรณ์ชนิดไมโครสร้างเป็นโพลีซิลิกอน (Polysilicon) หรือคริสตัลซิลิกอน ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบ MEMS มีขนาดเล็กกว่าตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบล้อยหมุนหลายเท่า และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้นซึ่งปัจจุบันสามารถหาซื้อได้ง่าย หลักการทำงานของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดการสั่นสะเทือน เมื่อพิจารณาแบบจำลองตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ชนิดแกนเดียว (Single z-axis vibratory gyroscope) สามารถอธิบายหลักการทำงานของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดการสั่นสะเทือนชนิดนี้ บนพื้นฐานของระบบมวลสปริง และตัวหน่วง โดยมวลจะถูกขับให้สั่น ตามแนวแกน  $x$  (Driving axis) แสดงดังแสดงในรูป 2.5 เมื่อมีความเร็วเชิงมุมเป็นอินพุตตามแนวแกน  $z$  มากระทำต่อตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะทำให้เกิดการสั่นของมวล ตามแนวแกนที่ตั้งฉากกันแนวการสั่นเดิมนั่นคือแนวแกน  $y$  อันเนื่องมาจากแรงหนีศูนย์กลาง (Coriolis force) ความเร็วเชิงมุมสามารถหาค่า ได้จากการวัดแอมพลิจูดการสั่นในแนวแกน  $y$

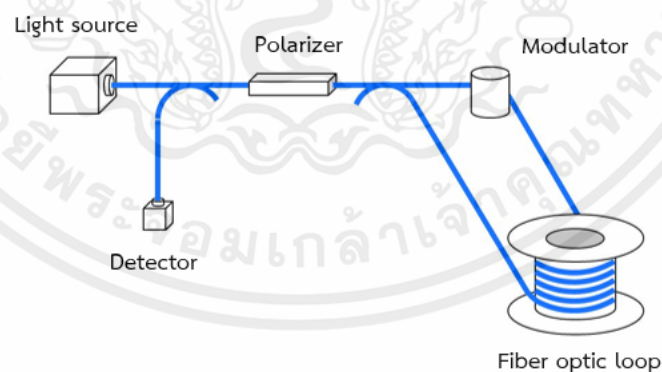
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แบบจำลองพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบ MEMS ชนิดแกนเดียว

### 2.2.2.3 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดด้วยแสง

ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดด้วยแสง (Fiber Optic Gyroscopes : FOG) ได้ถูกพัฒนาขึ้นหลังจากการค้นพบเทคโนโลยีเลเซอร์ ความน่าสนใจของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมชนิดนี้คือตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดด้วยแสงมีความแตกต่างจากตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมชนิดอื่นคือหลักการทำงานของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมชนิดนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับ หลักการการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Conservation of Angular Momentum) แต่ขึ้นอยู่กับความคงที่ของความเร็วของแสง

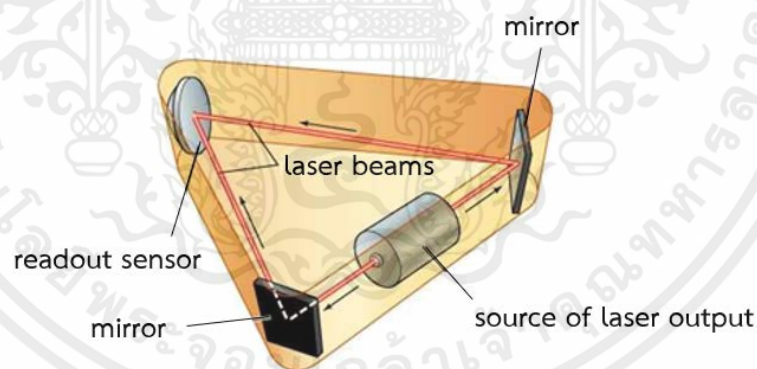


รูปที่ 2.6 แบบจำลองพื้นฐานของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวัดด้วยแสง

### 2.2.2.4 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวงแหวนเลเซอร์

ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวงแหวนเลเซอร์ (Ring laser gyroscope) หลักการทำงานของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวงแหวนเลเซอร์ เนื่องจากตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวงแหวนเลเซอร์ ไม่มี Gimbal Ring ทำให้ Sensor Block ที่ถูกยึดติดไว้กับตัวเรือนนั้นจะถูกปรับเปลี่ยน

ตำแหน่งไปตามอาการโคลงของเรือ ไม่สามารถปรับตัวให้อยู่บนระนาบอ้างอิงที่ขนานกับพื้นโลก ตลอดเวลาได้ ดังนั้นเทคโนโลยีที่เรียกว่า Strapdown Technology จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้โดยที่ คอมพิวเตอร์ของระบบจะสร้างระนาบอ้างอิง (Reference Plane) ขึ้น เรียกว่า แกนอ้างอิงนำทาง (Navigation Frame) โดยจะทำการเปรียบเทียบจากระนาบที่ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมติดตั้ง เรียกว่า แกนอ้างอิงวัตถุ (Body Frame) การเปลี่ยนพิกัดจากแกนอ้างอิงหนึ่งเป็นอีกแกนอ้างอิงหนึ่งถูก เรียกว่าเทคนิคการสร้าง Analytic Platform เป็นการเปลี่ยนพิกัดแบบ 3 แกน ซึ่งการคำนวณ ดังกล่าวจะอาศัยปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายโอนที่สำคัญก็คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก และอัตราการหมุน ของโลกที่ถูกตรวจวัดได้จาก ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และ Sensor Block ตามแนวแกนต่างๆ จาก การที่ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ถูกติดตั้งกับฐานแท่นที่ยึดติดกับตัวเรือ ตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณค่า การเยื้องแนวแกน (Misalignment) ของตัวเรือ หรือแกน อ้างอิงวัตถุที่แตกต่างจากแนวทิศเหนือ และแนวที่ตั้งฉากกับพื้นโลก ซึ่งการคำนวณค่าต่างๆ เหล่านี้ จำเป็นต้องทราบสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงในขณะนั้นจริงๆ โดยต้องตัดปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง เช่น สัญญาณรบกวน (Noise) ที่เกิดขึ้น ในเอาต์พุต (Output sensor) หรือที่เกิดขึ้นภายในตัวตัวรับรู้เอง หรือเกิดจากอาการเคลื่อนตัวของตัวเรือที่ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมต่างๆ ยึดติดอยู่ วิธีการที่ทำให้ สามารถได้ค่าของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง ณ เวลานั้นๆ ก็คือเทคนิคที่เรียกว่าตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) ซึ่งจะทำให้สามารถได้ค่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นไปตามเวลาจริง (Real time)



รูปที่ 2.7 ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแบบวงแหวนเลเซอร์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ IMU ชนิดตันทุนต่ำ แบบ MEMS ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวรับรู้ ความเร่งเชิงเส้น 3 แกน และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม 3 แกน ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ IMU ชนิดนี้เป็น อย่างมาก เนื่องจากมีขนาดเล็ก และราคาถูก แต่ก็ยังมีข้อเสียเนื่องจากข้อผิดพลาดของตัวตัวรับรู้เอง หรือแม้กระทั่งความผิดพลาดจากการประกอบของผู้ผลิตเอง ดังนั้นการสอบเทียบก่อนนำไปใช้งานจึง มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากถ้าค่าสัญญาณที่ได้มีความคลาดเคลื่อน อาจส่งผลกระทบต่อ

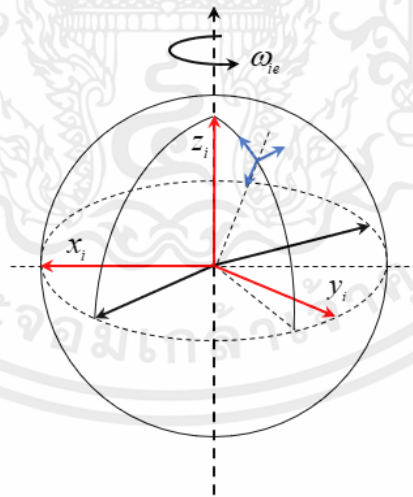
ทำงานของอุปกรณ์นั้นๆ ที่ทำการติดตั้ง IMU หรือแม้กระทั่งส่งผลกระทบต่อแบบลูกโซ่กับงานที่ต้องการความละเอียด และความถูกต้อง ในลักษณะงานที่มีการคำนวณค่าหลายขั้นตอน ข้อผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะถูกตั้งสมมติฐาน แล้วทำการสอบเทียบอย่างเป็นระบบ โดยอาศัยการทำงานร่วมกับเครื่องสอบเทียบที่ถูกสร้างขึ้นอย่างง่าย ๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ผลกระทบจากอุณหภูมิจะไม่ถูกนำมาคิด

## 2.3 ระบบพิกัด

ระบบพิกัดในแกนอ้างอิงต่างๆ ล้วนมีความสำคัญต่อการนำไปใช้ในการคำนวณตำแหน่งของวัตถุที่ติดตั้ง IMU วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงแกนอ้างอิงต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการเข้าใจถึงหลักการของแนวคิดในการวิจัย ซึ่งระบบพิกัดแกนอ้างอิงต่อไปนี้เป็นที่นิยมใช้ในระบบนำทางเฉื่อย

### 2.3.1 แกนอ้างอิงเฉื่อย

แกนอ้างอิงเฉื่อย (Inertial Frame) คือล้อที่ติดตั้งในกรอบวงแหวนหมุนได้ ที่ยอมให้ล้อหมุนโดยอิสระในทิศทางใดๆ ก็ได้ เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อหมุน เพื่อช่วยรักษาทิศทางของแกนหมุน โมเมนตัมเชิงมุมของล้อหมุนดังกล่าว ทำให้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมสามารถรักษาทิศทางการหมุนได้ แม้ว่าแกนล้อจะเอียง จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้สามารถนำหลักการการรักษาทิศนั้นคือแกนอ้างอิงที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ซึ่งจุดกำเนิดของระบบพิกัดความเฉื่อยนั้นสามารถกำหนดเป็นตำแหน่งใดๆ ก็ได้แล้วแต่การพิจารณา แต่แกนพิกัดทั้ง 3 แกนนั้นจะต้องตั้งฉากกัน ดังนั้นค่าที่วัดได้จากตัวรับรู้วัดความเฉื่อยทุกชนิดจะมีค่าที่สัมพันธ์กับแกนอ้างอิงเฉื่อย



รูปที่ 2.8 แกนอ้างอิงเฉื่อย

เพื่อความสะดวกจึงมีการกำหนดแกนอ้างอิงเฉื่อยไว้ที่แกนกลางโลก หรือที่เรียกว่าแกนอ้างอิงเฉื่อยที่แกนกลางโลก (Earth Centered Inertial : ECI Frame) โดยจุดศูนย์กลางของระบบพิกัดนี้จะทับกับจุดศูนย์กลางมวลของโลกดังรูปที่ 2.8 ที่เวลาเดียวกันความเฉื่อยบนแกน  $x$  และแกน  $z$  จะชี้ไปทางเวอร์นอลอิควินอกซ์ (Vernal Equinox) และตามการหมุนของแกนโลกตามลำดับ โดย

แกน  $y$  จะกำหนดตามกฎมือขวาในแกนอ้างอิงแบบ ECEF (Earth Centered Earth Fixed Frames) นั้นการหมุนจะเทียบกับแกนอ้างอิงแบบ ECI ด้วยอัตราความเร็วเชิงมุม  $\omega_{ie}$  ซึ่งในแกนอ้างอิงแบบ ECI นั้นเวกเตอร์อัตราเร็วเชิงมุมคือ  $\omega_{ie}^i = [0, 0, \omega_{ie}]^T$  ซึ่งแกนอ้างอิงเฉื่อยมีจุดกำเนิดอยู่ที่ใจกลางของโลก แกนจะไม่หมุนโดยอ้างอิงจากดวงดาวที่คงที่ แกนเหล่านี้จะถูกแสดงโดย  $x_i$ ,  $y_i$  และ  $z_i$  โดย  $z_i$  จะสอดคล้องกับแกนขั้วโลก

### 2.3.2 แกนอ้างอิงวัตถุ

แกนอ้างอิงวัตถุ (Body Frame) ในการประยุกต์ใช้ในการนำร่องนั้นวัตถุประสงค์คือ เพื่อหาตำแหน่ง และความเร็วของยานพาหนะที่ขึ้นอยู่กับการวัดค่าที่ได้มาจากตัวรับรู้ ที่ติดตั้งอยู่บนยานพาหนะ ด้วยสาเหตุที่กล่าวมานี้จึงกำหนดแกนอ้างอิงวัตถุที่รวมทั้งยานพาหนะ และเครื่องมือวัดรวมทั้งความสัมพันธ์ต่างเกี่ยวกับระบบพิกัดอีกด้วย

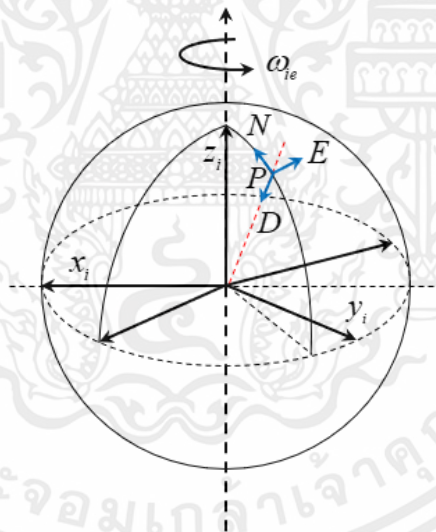
แกนอ้างอิงวัตถุจะวางลงไปบนยานพาหนะที่เราสนใจ บ่อยครั้งที่มันกำหนดให้อยู่กับที่ อาทิเช่น จุดศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วงของวัตถุหรือจุดศูนย์กลางของมวล โดยการวางจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงวัตถุไว้ที่จุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของวัตถุนั้นจะง่ายต่อการหาที่มาของสมการทางจลนศาสตร์ และบ่อยครั้งมันมีความเหมาะสมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมโดยแกน  $x_b$  จะถูกกำหนดให้ชี้ไปด้านหน้าของยานพาหนะ แกน  $z_b$  จะกำหนดให้ชี้ลงด้านล่างของยานพาหนะ และแกน  $y_b$  จะเป็นไปตามกฎมือขวาตามระบบพิกัดฉาก โดยทิศทางของแกนที่แสดงดังรูปที่ 2.9 นั้นไม่ได้เป็นลักษณะเฉพาะ แต่เป็นรูปแบบที่จะประยุกต์ใช้กับอากาศยาน, ยานดำน้ำ เป็นต้น ดังนั้นสัญลักษณ์  $[r, p, y]$  จะใช้สำหรับแกนของยานพาหนะที่มีเวกเตอร์หนึ่งหน่วยแทนรูปแบบมาตรฐาน  $[x, y, z]$  จากรูปจะเห็นได้ว่าเวกเตอร์อัตราการหมุนของแกนอ้างอิงวัตถุนั้น จะสัมพันธ์กับแกนอ้างอิงเฉื่อย โดยการหมุนรอบแกนวัตถุถูกกำหนดให้เป็น  $\omega_b^b = [r, p, y]^T$  เมื่อ  $r$  เป็นอัตราความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $p$ ,  $y$  เป็นอัตราความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $x_b$  และ  $y_b$  เป็นความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $z_b$  โดยแต่ละอัตราความเร็วเชิงมุมนั้น จะเป็นบวกตามกฎมือขวา และแกนอ้างอิงวัตถุนั้นจะไม่ใช่แกนอ้างอิงแบบเฉื่อย สรุปลือคือแกนอ้างอิงวัตถุเป็นชุดแกนมุมฉากมีจุดกำเนิดอยู่ที่ใจกลางของยานพาหนะ ซึ่งสอดคล้องกับมุม roll, pitch, yaw กับแกน  $x_b$ ,  $y_b$  และ  $z_b$  ของยานพาหนะที่ติดตั้งระบบนำทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 2.3.4 แกนอ้างอิงการเคลื่อนที่

แกนอ้างอิงการเคลื่อนที่ (Navigation Frame) แกนอ้างอิงแบบนี้ใช้จุดศูนย์กลางของโลกเป็นหลักเฉพาะที่ (Local Geodetic) นั่นคือทิศเหนือ ตะวันออก และทิศซีก ในระบบพิกัดฉากดังรูปที่ 2.11 แกนอ้างอิงนี้จะถูกกำหนดโดยการปรับระนาบสัมผัสให้สัมผัสกับวงรีอ้างอิงโลก โดยระนาบสัมผัสจะติดอยู่บนจุดคงที่บนพื้นผิวของโลก เพื่อให้เป็นจุดที่มีความเหมาะสมในการวัดแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local) ซึ่งจุดนี้จะมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดกึ่งกลางของแกนแบบบริเวณเฉพาะที่ (Local) แกน  $x$  จะชี้ไปทางทิศเหนือที่แท้จริง แกน  $z$  จะชี้ไปในทิศพุ่งเข้าหาแกนโลก และตั้งฉากกับวงรีอ้างอิง ส่วนแกน  $y$  จะเป็นไปตามกฎมือขวาและชี้ไปทิศตะวันออกดังในรูปที่ 2.11 ซึ่งสรุปได้ว่าแกนอ้างอิงการเคลื่อนที่ เป็นระบบพิกัดแกนอ้างอิงการเคลื่อนที่ทางภูมิศาสตร์ ที่มีต้นกำเนิดที่ของระบบนำทางที่จุด  $P$  ซึ่งระบบนำทางจะได้รับการกำหนดจากภายในยานพาหนะ และระบบจะสันนิษฐานว่าจุดที่ตั้งอยู่เป็นจุดศูนย์กลางของยานพาหนะ และแกนจะสอดคล้องกับทิศ North, East และ Down เมื่อกำหนดไว้ด้วยวิธีนี้ ระบบพิกัดแกนอ้างอิงการเคลื่อนที่จะถูกเรียกว่า ระบบพิกัดแกนอ้างอิง NED ค่าของระบบนำทางที่เปลี่ยนแปลงจะสอดคล้องกับการหมุนของโลก  $\omega_{en}$  และจะถูกควบคุมโดยจุดหมุน  $P$  ที่สอดคล้องกับโลก



รูปที่ 2.11 แกนอ้างอิงการเคลื่อนที่

### 2.3.5 แกนอ้างอิงแพลตฟอร์ม

แกนอ้างอิงแพลตฟอร์ม (Platform Frame) ในที่นี้จะพิจารณากรอบอ้างอิงของตัวรับรู้ที่วางอยู่กับที่เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงของยานพาหนะ ดังนั้นสำหรับระบบนำร่องที่ประยุกต์ใช้ความเฉื่อย (Inertial Navigation) นั้น อาทิเช่นระบบที่เรียกว่า Strap Down เป็นต้น ดังนั้นจะต้องมีการชดเชยแกนอ้างอิงของตัวรับรู้ หรืออาจจะต้องหมุนเทียบกับจุดกำเนิดของแกนอ้างอิงวัตถุ โดยจุดกำเนิดของกรอบอ้างอิงของตัวรับรู้อาจจะถูกนำไปตั้งอยู่ตรงไหนก็ได้ ซึ่งจะต้องกำหนดให้ทั้งสามแกน

ตั้งฉากซึ่งกันและกัน และเป็นไปตามกฎมือขวาอีกด้วย แต่ทิศทางนั้นจะขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งานที่ต่างกันไป โดยทั่วไปแล้วเมทริกซ์การหมุนของแกนอ้างอิงของตัวรับรู้ไปยังแกนอ้างอิงของวัตถุหรือยานพาหนะนั้นจะคงที่ และหาได้จากขั้นตอนการออกแบบระบบ

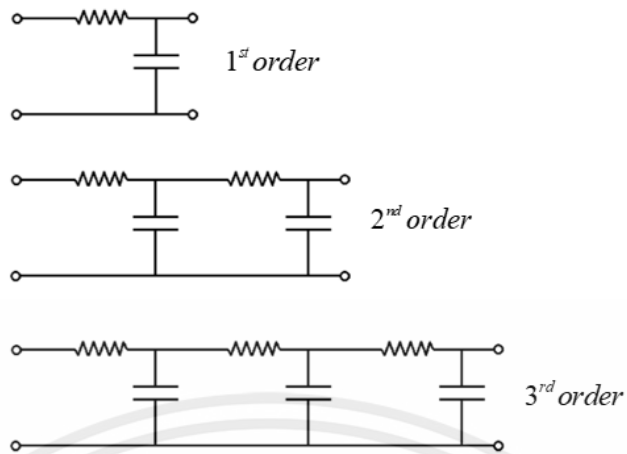
## 2.4 ตัวกรอง

สัญญาณรบกวนในการวัดหรือการส่งข้อมูลจะพบได้เสมอในทุกสภาวะ โดยสัญญาณรบกวนมักอยู่ในรูปแบบของสัญญาณแบบสุ่ม (Random Signal) ซึ่งการออกแบบระบบการวัดที่ดี จะสามารถลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้มาก ผู้ทำการวัดควรมีความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความถี่ของสัญญาณที่ต้องทำการวัดเช่น ต้องการวัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อม อาจคาดได้ว่าอุณหภูมิดังกล่าวจะมีค่าคงที่ในช่วงเวลาสั้นๆ ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลที่เป็นสัญญาณความถี่ต่ำ จึงเป็นเพียงส่วนเดียวที่ต้องคำนึงถึง ดังนั้นสัญญาณความถี่สูงจึงเป็นสัญญาณรบกวนและสามารถกำจัดไปได้โดยไม่ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดเกิดการสูญหาย หรืออีกตัวอย่างหนึ่งคือการค้นหาสัญญาณรบกวนการได้ยินของมนุษย์ ซึ่งปกติมนุษย์จะได้ยินเสียงในช่วงความถี่เสียง 20 Hz ถึง 20 kHz ดังนั้นการกำจัดสัญญาณรบกวนที่อยู่นอกช่วงดังกล่าวจะทำให้ข้อมูลที่ได้สมบูรณ์มากขึ้น ตัวกรองสัญญาณโดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังต่อไปนี้

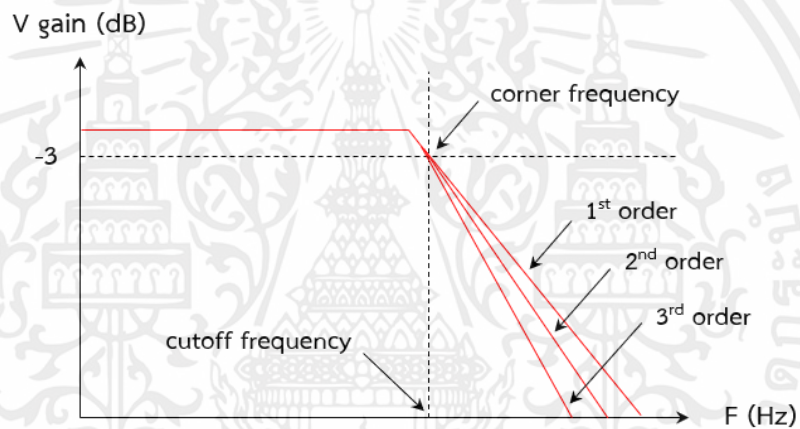
### 2.4.1 ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) คือตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ผ่านโดยไม่มีการลดทอนของสัญญาณหรือมีการลดทอนสัญญาณในปริมาณน้อยมาก ซึ่งตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึงช่วงความถี่ตัด (Cutoff Frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย  $f_c$  โดยความถี่ตัด คือความถี่ ณ ขณะที่อัตราการลดทอนของวงจรจะมีค่าลดลงเป็น 0.707 เท่าของแอมพลิจูดปกติ (-3 dB) บางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ได้ว่า ความถี่มุม (Corner Frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน  $f_c$  ผ่านวงจร จะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมาก จากรูปที่ 2.13 เส้นที่ตัดกันแสดงถึงผลตอบสนองของวงจรในทางความเป็นจริง ส่วนเส้นประแสดงถึงผลตอบสนองของวงจรในทางอุดมคติ ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้ เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (Passband) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน (Stopband) จากรูปที่ 2.12 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 วงจรตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำลำดับต่างๆ



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับการลดทอนความถี่ในตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

การคำนวณหาค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ในตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำทำได้โดยใช้สมการที่ 2.2

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \tag{2.2}$$

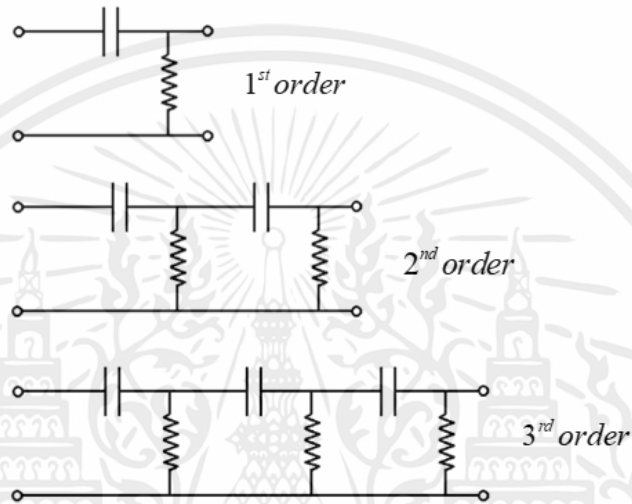
โดยที่  $\omega_c$  คือความถี่ตัดเชิงมุม มีหน่วยเป็น rad/s,  $f_c$  คือความถี่ตัดเชิงเส้น มีหน่วยเป็น Hz,  $R$  คือความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $\Omega$  และ  $C$  คือความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ตัวกรองความถี่ต่ำในการกรองสัญญาณข้อมูลของ IMU ประกอบไปด้วย ข้อมูลสัญญาณของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ซึ่งหลังจากทำการ

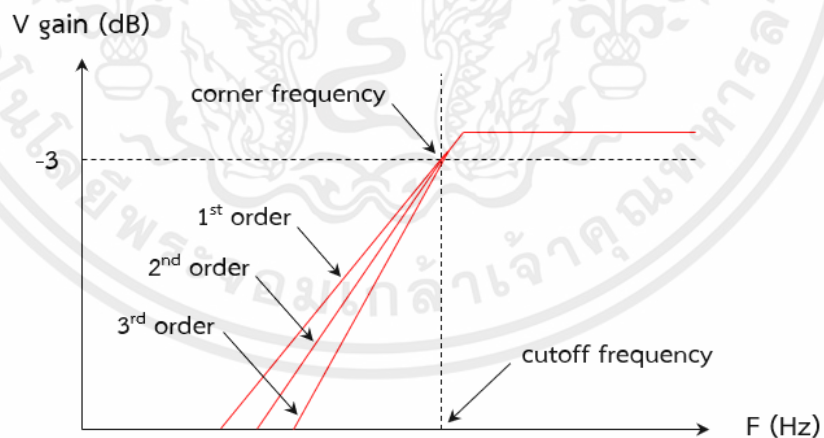
กรองสัญญาณด้วยตัวกรองความถี่ต่ำ จะทำให้ค่าข้อมูลสัญญาณที่ถูกนำไปคำนวณหาข้อผิดพลาดเพื่อทำการชดเชยให้ค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

#### 2.4.2 ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง

ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง (High Pass Filter) คือตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าค่าความถี่ตัดผ่าน โดยที่ความถี่ที่ต่ำกว่านั้นจะถูกลดทอนไปตามลำดับ สามารถทำได้โดยการต่อตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรตัวกรองสัญญาณความถี่สูงลำดับต่างๆ

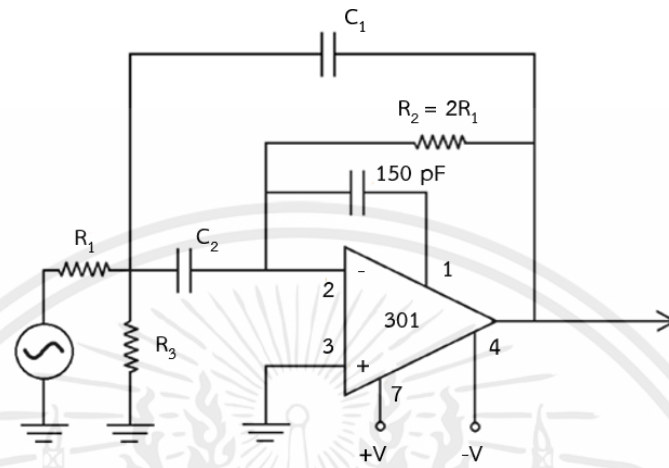


รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับการลดทอนความถี่ในตัวกรองสัญญาณความถี่สูง

การคำนวณค่าความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ในตัวกรองสัญญาณความถี่สูง ทำได้  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 โดยใช้หลักการเดียวกับตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ นั่นคือคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.2  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

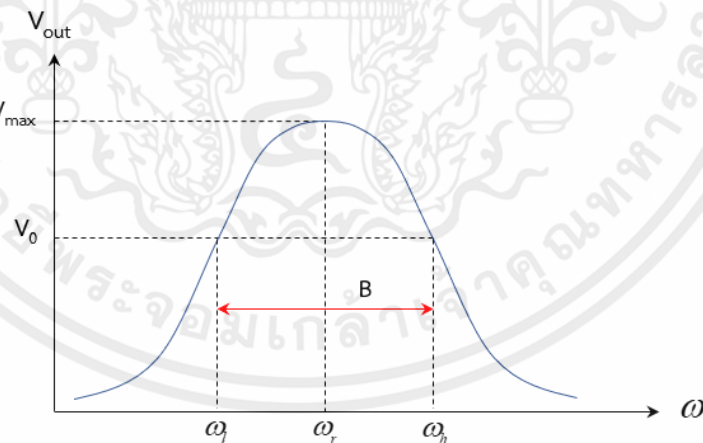
#### 2.4.3 ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่

ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band Pass Filter) คือตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ อยู่ในช่วงความถี่ที่กำหนดผ่าน สัญญาณที่มีความถี่อยู่นอกช่วงที่กำหนดจะถูกลดทอนสัญญาณลงไปตามลำดับ



รูปที่ 2.16 วงจรตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่

จากรูปที่ 2.16 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่

จากรูปที่ 2.17 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ( $V_{\max}$ ) จะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงความถี่เท่านั้น เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) ส่วนตำแหน่งที่มีแรงดันไฟฟ้าลดลง ( $V_0$ ) มี 2 ความถี่ เรียกว่า ความถี่ตัด (Cutoff Frequency) คือ ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (Higher Cutoff Frequency) ใช้สัญลักษณ์  $\omega_h$  และความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (Lower Cutoff Frequency) ใช้สัญลักษณ์  $\omega_l$

ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ (Lower Cutoff Frequency) ใช้สัญลักษณ์  $\omega_l$  ซึ่งช่วงผลต่างระหว่าง  $\omega_h$  และ  $\omega_l$  เรียกว่า แบนวิธ (Bandwidth) โดย  $B = \omega_h - \omega_l$

นอกจากนั้นอัตราส่วนระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับแบนวิธ เรียกว่า ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) ซึ่งใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการเลือกความถี่ ค่าตัวประกอบคุณภาพนี้ไม่มีหน่วย โดยยิ่งค่าตัวประกอบคุณภาพมีค่าสูง วงจรจะสามารถเลือกความถี่ได้ดีมากยิ่งขึ้น ดังนั้นความถี่ช่วงแคบ (Narrow band) จะมีค่า  $B < 0.01$  และ  $Q > 10$  ความถี่ช่วงกว้าง (Wide band) จะมีค่า  $B > 0.01$  และ  $Q < 10$  ในวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่สามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) ของวงจรได้จากค่าแบนวิธของวงจรมานั้นๆ ดังสมการต่อไปนี้

$$Q = \frac{\omega_r}{B} \quad (2.3)$$

#### 2.4.3.1 ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงแคบ

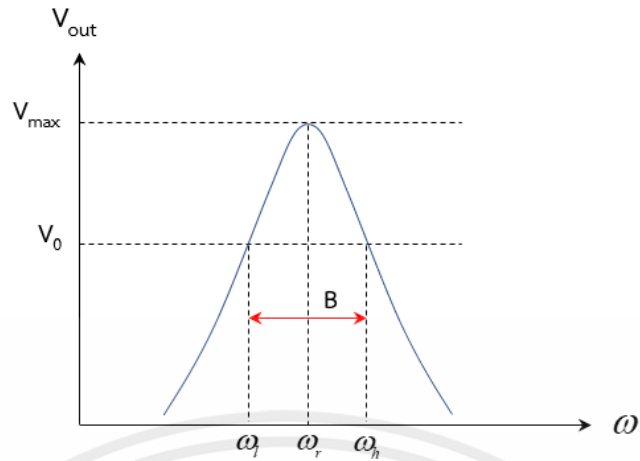
ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงแคบ (Narrow band pass filter circuit) การออกแบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยถ้าต้องการเฉพาะความถี่ช่วงแคบ (Narrow band) สามารถทำได้โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 2.16 แต่จะต้องกำหนดค่าแบนวิธที่ต้องการ รวมถึงค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) จากสมการที่ 2.3 จากนั้นคำนวณหาค่าอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะกำหนดให้  $C_1 = C_2 = C$  ให้มีค่าที่เหมาะสม และคำนวณหาค่าความต้านทานต่างๆ ในวงจรได้จากสมการต่อไปนี้

$$R_2 = \frac{2}{BC} \quad (2.4)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} \quad (2.5)$$

$$R_3 = \frac{R_2}{4Q^2} \quad (2.6)$$

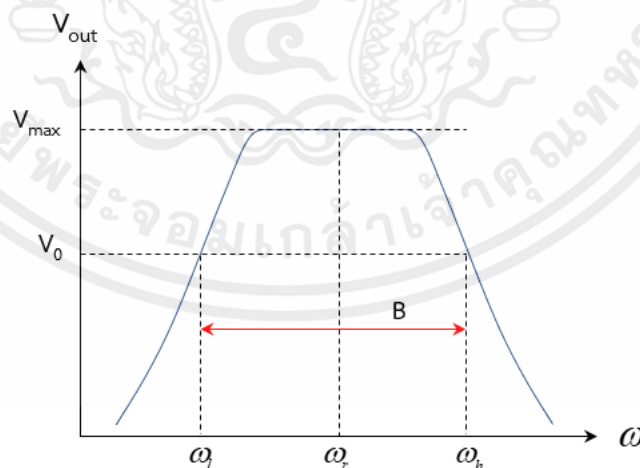
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ที่ออกมาจากวงจรตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงแคบนี้ สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งมีลักษณะคำอธิบายคล้ายรูปที่ 2.17 แต่จะมีช่วงความถี่ที่แคบกว่า



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่วงจรตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงแคบ

#### 2.4.3.2 ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงกว้าง

ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงกว้าง (Wide band pass filter circuit) การออกแบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ โดยถ้าต้องการเฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (Wide band) สามารถทำได้โดยการต่อวงจรตามรูปที่ 2.16 เช่นเดียวกับวงจรกรองความถี่ช่วงแคบ แต่จะเลือกให้ตัวประกอบคุณภาพ (Q factor) มีค่าน้อยกว่า 10 โดยการออกแบบ นอกจากนั้นจะเหมือนกับวงจรกรองความถี่ช่วงแคบทุกประการ สัญญาณที่ออกมาจากวงจรกรองความถี่ช่วงกว้างนี้ สามารถนำมาเขียนแสดงด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า และความถี่ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งมีลักษณะคำอธิบายคล้ายรูปที่ 2.17 แต่จะมีช่วงความถี่ที่กว้างกว่า

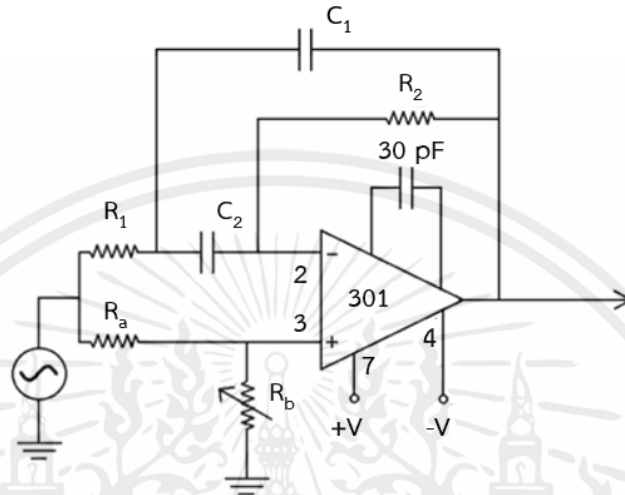


รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่วงจรตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ช่วงกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ ใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ ใช้งาน หรือจำหน่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

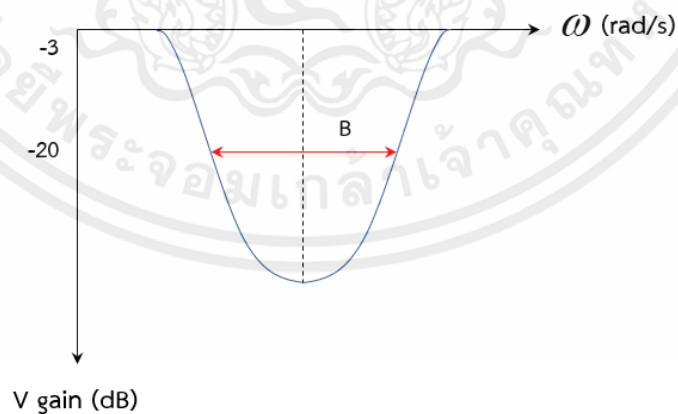
### 2.4.4 ตัวกรองลดทอนสัญญาณช่วงความถี่

ตัวกรองลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band Reject Filter Circuit) คือตัวกรองที่ลดทอนสัญญาณ ในช่วงที่กำหนด วงจรตัวกรองลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ เป็นวงจรที่กำจัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการบางช่วงออกไป สามารถทำได้โดยการต่อวงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.20 วงจรตัวกรองลดทอนสัญญาณช่วงความถี่

จากรูปที่ 2.20 สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งจะมีลักษณะคำอธิบายคล้ายรูปที่ 2.17 แต่กราฟจะอยู่ในลักษณะกลับหัว



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับความถี่ในวงจรตัวกรองลดทอนสัญญาณช่วงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนการออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่นั้น ทำคล้ายกับวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ เพื่อความสะดวกจะกำหนดให้  $C_1 = C_2 = C$  อยู่ช่วงระหว่าง  $100 \mu\text{F} - 0.1 \mu\text{F}$  โดยสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานต่างๆ ได้ดังนี้

$$R_2 = \frac{2}{BC} \quad (2.7)$$

$$R_1 = \frac{R_2}{4Q^2} \quad (2.8)$$

$$R_a \approx 1k\Omega \quad (2.9)$$

$$R_b = 2Q^2 R_a \quad (2.10)$$

## 2.5 การสอบเทียบ

ระบบการวัดทุกระบบจะต้องให้ผลการวัดที่มีความน่าเชื่อถือ โดยกระบวนการที่ใช้ในการตรวจสอบสเกลการวัดของระบบเรียกว่า “กระบวนการสอบเทียบ” คือการให้อินพุตที่ทราบค่าแก่ระบบการวัด เพื่อวัตถุประสงค์ในการสังเกตเอาต์พุตของระบบ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตและเอาต์พุต โดยอินพุตที่ทราบค่าสำหรับกระบวนการสอบเทียบเรียกว่า ค่ามาตรฐาน (Standard)

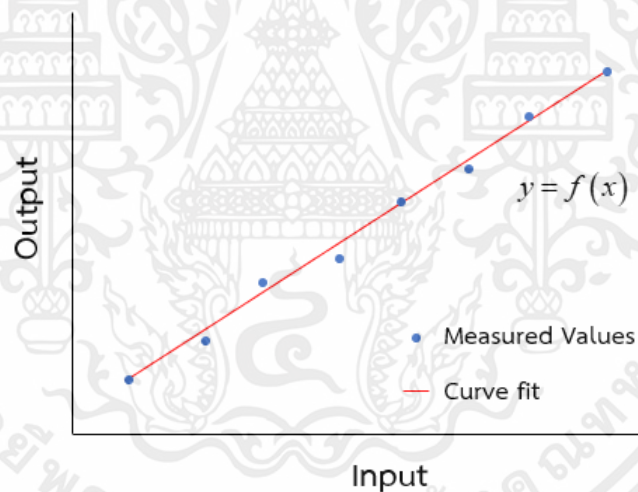


รูปที่ 2.22 กระบวนการวัดพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การสอบเทียบแบบสถิต

การสอบเทียบแบบสถิต (Static Calibration) เป็นการสอบเทียบพื้นฐาน ประเภทหนึ่ง ในกระบวนการนี้เป็นการให้อินพุตที่ทราบค่าแน่นอนให้กับระบบที่ทำการสอบเทียบ และเอาต์พุตของระบบจะถูกบันทึก คำว่า สถิต หมายถึงวิธีการสอบเทียบที่ค่าของตัวแปร ที่เกี่ยวข้องเป็นค่าคงที่ ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง นั่นคือตัวแปรเหล่านั้นไม่ขึ้นกับเวลา ในการสอบเทียบแบบสถิตนั้น จะมีเพียงขนาดของอินพุตที่ทราบค่า และเอาต์พุตที่วัดได้เท่านั้น ที่สำคัญจากการให้อินพุตที่ทราบค่าแก่ระบบ และสังเกตเอาต์พุตของระบบ กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิตที่แสดงดังรูปที่ 2.23 นั้นเป็นการพล็อตอินพุตบนแกนแนวนอน เปรียบเทียบเอาต์พุตจากการวัดบนแกนแนวตั้ง ค่าอินพุตในการสอบเทียบนั้น โดยปกติแล้วจะเป็นตัวแปรอิสระ ในขณะที่เอาต์พุตของการวัดเป็นตัวแปรตาม กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิต สามารถใช้ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุต สมการความสัมพันธ์จะอยู่ในรูปแบบ  $y = f(x)$  ซึ่งหามาจากการใช้เทคนิคการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) เราสามารถนำความสัมพันธ์นี้ไปใช้ในกระบวนการวัดครั้งต่อไป เพื่อหาค่าอินพุตที่ต้องการทราบค่าจากค่าเอาต์พุตของเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงการสอบเทียบแบบสถิต

### 2.5.2 การสอบเทียบแบบพลวัต

เมื่อตัวแปรที่สนใจมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อหาข้อมูลเหล่านี้จึงต้องการข้อมูลทางพลวัต (Dynamic Information) ตัวแปรทางพลวัตเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับเวลาทั้งขนาด (Magnitude) และความถี่ (Frequency) ที่รับได้ กระบวนการสอบเทียบแบบพลวัต (Dynamic Calibration) เป็นเอกสารนี้เป็น การหาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตที่ทราบพฤติกรรมทางพลวัต และเอาต์พุตของระบบที่ทำการวัด อย่างไรก็ตาม โดยปกติการทำการสอบเทียบแบบพลวัตส่วนใหญ่มักจะใช้สัญญาณเช่น Sinusoidal หรือ Step ที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณอินพุตให้กับระบบที่ทำการวัด

### 2.5.3 ความไวของการวัด

ความไวของการวัด (Sensitivity of Measurement) คือการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณที่ต้องการวัดซึ่งเป็นอัตราส่วนของผลลัพธ์ ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ ดังนั้นความไวของการวัด คือความชัน (Slope) ของเส้นตรง ในรูปที่ 2.23 เมื่อ  $S_k$  คือความชันของกราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิติ

$$S_k = \frac{dy}{dx} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $S_k$  เป็นฟังก์ชันของ  $x$  ความไวของการวัด ถูกวัดให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิติอาจเป็นเส้นตรง หรือไม่เป็นเส้นตรงก็ได้ ขึ้นกับกระบวนการวัด และตัวแปรที่ต้องการวัด ดังนั้น  $S_k$  อาจเป็นค่าคงตัว หรือไม่เป็นค่าคงตัวตลอดช่วงของค่าอินพุต

### 2.5.4 ความเป็นเชิงเส้น และความไม่เป็นเชิงเส้น

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity and Non-linearity) หมายถึง การที่ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวัด เป็นสัดส่วนโดยตรงกับอินพุตของปริมาณที่ต้องการวัด เช่น เมื่อปริมาณอินพุตเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ค่าเอาต์พุตของเครื่องวัดจะเปลี่ยนไป 1 หน่วย หรือเมื่อค่าอินพุตของการวัดเปลี่ยนไป 2 หน่วย ค่าเอาต์พุตที่ได้จากเครื่องวัดจะเปลี่ยนไป 2 หน่วย เป็นต้น ซึ่งความเป็นเชิงเส้นเป็นคุณสมบัติการวัดที่ต้องการ จากรูปที่ 2.23 โดยทั่วไปมักใช้การลากเส้นตรงผ่านจุดข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณในแกนตั้ง และแกนนอนให้มากที่สุด โดยใช้เทคนิคทางสถิติ ส่วนความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity) จะหมายถึงจุดข้อมูลที่เบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงมากที่สุด โดยค่าความไม่เป็นเชิงเส้นนี้มักแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล

### 2.5.5 ความเที่ยงตรง ความสามารถของการวัดซ้ำ และความสามารถของการทำซ้ำ

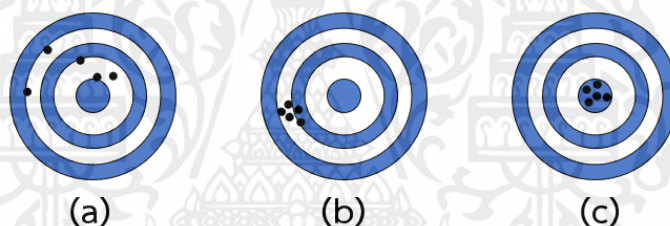
ความเที่ยงตรง (Precision) เป็นค่าที่ใช้อธิบายองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom) ของเครื่องวัดจากความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) โดยความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด จะพิจารณาจากขนาดของความแปรผันที่เกิดขึ้นจากการวัดวัตถุชิ้นเดียวกัน หลายครั้ง โดยใช้ผู้วัด วิธีวัด เครื่องวัดชุดเดียวกัน ถ้าได้ค่าใกล้เคียงกันโดยไม่คำนึงว่าค่านั้น เป็นค่าที่ถูกต้องหรือไม่ แสดงว่าขนาดของความแปรผันในการวัดซ้ำเกิดขึ้นน้อย หรือระบบการวัดมีความเที่ยงตรงสูง

ความเที่ยงตรงนี้มักใช้สับสนกันกับความถูกต้อง (Accuracy) ของเครื่องวัด เครื่องวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงอาจไม่ใช่เครื่องวัดที่มีความถูกต้องสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าเครื่องวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงอาจมีความถูกต้องต่ำได้ ซึ่งการวัดที่มีความถูกต้องต่ำจากเครื่องวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงมักเกิดจากความเอนเอียงของการวัด ซึ่งสามารถลดหรือกำจัดได้โดยการสอบเทียบใหม่

ความสามารถของการวัดซ้ำ (Repeatability) หมายถึง ความสามารถของเครื่องวัดที่จะสามารถให้ค่าเอาต์พุตที่ใกล้เคียงกัน เมื่อวัดซ้ำหลายครั้งภายใต้เงื่อนไขการวัดเดียวกัน หรือค่าความ

แปรปรวนของผลการวัด เมื่อใช้ผู้วัด วิธีการวัด สถานการณ์ และสถานที่วัดเดียวกัน ความสามารถในการทำซ้ำ (Reproducibility) คือความสามารถของเครื่องวัด ในการให้ผลการวัดสิ่งเดียวกันที่มีความใกล้เคียงกัน เมื่อเปลี่ยนวิธีวัด ผู้วัด เครื่องวัด สถานที่ สถานการณ์ และเวลาที่ทำการวัด

ความสามารถในการวัดซ้ำ และความสามารถในการทำซ้ำเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ แสดงความเที่ยงตรงของการวัด ซึ่งใช้อธิบายการกระจายของผลการวัดสิ่งเดียวกัน โดยหากทำการวัดภายใต้สภาวะเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จะแสดงการกระจายของผลลัพธ์ในการวัดซ้ำ แต่หากการวัดกระทำภายใต้สภาวะต่างกัน ข้อมูลที่ได้จะแสดงการกระจายของผลลัพธ์ในการทำซ้ำ รูปที่ 2.24 แสดงผลการยิงปืนของผู้ยิงสามคน โดยมีเป้าหมายของการยิงอยู่ที่ศูนย์กลางของวงกลม จุดดำแต่ละจุดแสดงจุดที่ผู้ยิงแต่ละคนยิงโดนเป้า จากรูปจะเห็นว่าผู้ยิงคนที่ 1 (a) มีความถูกต้อง และความเที่ยงตรงของการยิงต่ำ ในขณะที่ผู้ยิงคนที่ 2 (b) สามารถยิงโดนเป้าในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน แต่เป็นตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง ผลการยิงของผู้ยิงคนที่ 2 จึงถือได้ว่ามีความเที่ยงตรงสูงแต่มีความถูกต้องต่ำ ส่วนผู้ยิงคนที่ 3 (c) จะมีความถูกต้อง และความเที่ยงตรงสูง เพราะสามารถยิงตรงจุดที่ถูกต้องอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.24 การเปรียบเทียบความเที่ยงตรง และความถูกต้องของผลลัพธ์

### 2.5.6 ย่านวัด

ย่านวัด หรือช่วงการวัด (Range or Span) ของเครื่องวัดใช้ระบุค่าต่ำสุด และค่าสูงสุดที่เครื่องวัดได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้งาน

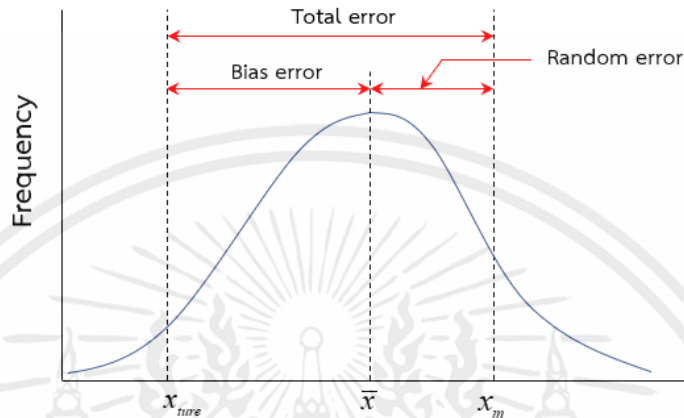
### 2.5.7 ความละเอียดของการวัด

ความละเอียดของการวัด (Resolution) คือขีดจำกัดล่าง (Lower Limit) ของขนาดอินพุตที่เปลี่ยนแปลง หรือขนาดของอินพุตที่น้อยที่สุดที่เปลี่ยนแปลง แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต ซึ่งการระบุความละเอียดของการวัดอาจแสดงด้วยค่าสัมบูรณ์ หรือเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนของค่าเต็มสเกลได้

### 2.5.8 ความผิดพลาด และความไม่แน่นอน

ความผิดพลาดในการวัดเป็นความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้ (Measured Value) และค่าที่แท้จริงที่ควรจะเป็น (True Value) ความผิดพลาดพื้นฐานที่เกิดขึ้นในการวัดมี 2 ชนิด คือ ความผิดพลาดระบบ (Systematic, or Bias Error) และความผิดพลาดความเที่ยงตรง หรือความผิดพลาด

แบบสุ่ม (Precision, or Random Error) ในกระบวนการวัดจริง การไม่รู้ค่าที่ถูกต้องนั้นคือการไม่ทราบค่าความผิดพลาด จึงมีการประมาณค่าของเขตของความผิดพลาด โดยขอบเขตนั้นเราเรียกว่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ซึ่งความผิดพลาดจะมีขนาดไม่เกินความไม่แน่นอน จากคำอธิบายดังกล่าวข้างต้น สามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่ม และความผิดพลาดทั้งหมด

ความไม่แน่นอนของการวัด เป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับผลการวัด ซึ่งบอกลักษณะการกระจายของค่าที่วัดได้ และสามารถบอกค่าของสิ่งที่ถูกวัดอย่างสมเหตุสมผล ความไม่แน่นอนของการวัดประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบบางอย่างอาจประเมินได้จากการแจกแจงทางสถิติของผลลัพธ์ของอนุกรมการวัด และสามารถบอกลักษณะได้ด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ที่ได้จากการทดลอง องค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งสามารถบอกลักษณะได้โดยการประเมินจากการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีพื้นฐานจากความชำนาญ หรือข้อมูลอื่นๆ จากการวิเคราะห์ทางสถิติของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัด และการวิเคราะห์แหล่งของความผิดพลาดที่มีอิทธิพลต่อค่าจากการวัด เราสามารถประมาณค่า  $x'$  ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนข้อมูลที่ได้มาจากการวัดค่า  $x$  ซ้ำๆ ได้ดังสมการ

$$x' = \bar{x} \pm u_x (P\%) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\bar{x}$  คือค่าเฉลี่ยที่แทนการประมาณค่า  $x'$  ที่เป็นไปได้มากที่สุดบนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้ และ  $u_x$  คือความไม่แน่นอนในการประมาณค่าที่ระดับความเป็นไปได้  $P\%$  ช่วงของความเชื่อมั่น หรือความไม่แน่นอนอยู่บนพื้นฐานของความผิดพลาดแบบสุ่ม และความผิดพลาดระบบในการวัดค่า  $x$

ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องระบุสาเหตุ หรือแหล่งของความไม่แน่นอนในการวัด จากนั้นจึงประเมินขนาดของความไม่แน่นอนของแต่ละแหล่งโดยแยกจากกัน แล้ว

จึงนำทั้งหมดมารวมกัน การประเมินความไม่แน่นอนมี 2 แนวทางคือ การประเมินแบบ A และ การประเมินแบบ B

การประเมินแบบ A (Type A Evaluation) เป็นการประเมินความไม่แน่นอน โดยใช้เทคนิคสถิติ สูตรที่ใช้ในการคำนวณของการประเมินแบบ A คือ

$$\mu = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\mu$  คือค่าความไม่แน่นอน,  $s$  คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ  $n$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

การประเมินแบบ B (Type B Evaluation) เป็นการประเมินความไม่แน่นอน จากข้อมูลข่าวสารอย่างอื่นที่อาจประกอบด้วยประสบการณ์ในอดีตของการวัด จากใบรับรอง การสอบเทียบจากข้อกำหนดของผู้ผลิต จากการคำนวณจากสิ่งพิมพ์ต่างๆ และจากสามัญสำนึก สมการที่ใช้ในการคำนวณของการประเมินแบบ B คือ

$$p = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $p$  คือ ค่าความไม่แน่นอน และ  $a$  คือครึ่งหนึ่งของค่าความไม่แน่นอนที่ระบุมากับเครื่องมือ

## 2.6 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ IMU ชนิดต้นทุนต่ำแบบ MEMS ที่ประกอบไปด้วย ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น 3 แกน และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม 3 แกน โดยค่าสัญญาณที่ได้จากการเก็บข้อมูลจะถูกกรองด้วยตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ เพื่อให้ค่าข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุด ก่อนการสอบเทียบ ซึ่งแนวทางในการสอบเทียบจะอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่าง IMU และเครื่องสอบเทียบ โดยจะใช้การแปลงพิกัดแกนอ้างอิงเข้ามาช่วยในการหาข้อผิดพลาดต่างๆ ของ IMU แล้วทำการชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้แก่ IMU ชนิดต้นทุนต่ำให้ได้มากที่สุด ตามสมมติฐานความผิดพลาดต่างๆ ที่ตั้งขึ้น โดยผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิจะไม่ถูกนำมาคิด แต่การทดลองจะถูกควบคุมปัจจัยด้านอุณหภูมิไว้ที่ 25 °C ตามคู่มือการใช้งานของตัวรับรู้

โดยจะมุ่งเน้นไปที่ส่วนของข้อผิดพลาดตามสมมติฐานที่ถูกตั้งขึ้น เนื่องจากงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษามานั้นยังขาดรายละเอียดของกระบวนการแก้ไขปัญหาต่างๆ ของตัวรับรู้ ซึ่งส่วนมากจะมีการนำเสนอเพียงแนวคิดของสมมติฐาน แต่กระบวนการแก้ไขยังไม่ถูกลงรายละเอียดมากนัก เนื่องจากงานวิจัยส่วนมากใช้ Matlab toolbox ในการทำการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization) ทำให้ผู้ศึกษา หรือผู้ที่สนใจขาดความรู้ความเข้าใจในการบวนการแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้

## บทที่ 3

### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ IMU ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วย สเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) การเยื้องแนวแกน (Misalignment) คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonality) และค่าไบแอส (Bias) ค่าสัญญาณจะถูกปรับปรุงก่อนนำไปใช้ในการคำนวณ โดยใช้ตัวกรองแบบความถี่ต่ำ (Low pass filter) ในการลดสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งค่าต่างๆ ที่ถูกกล่าวมานั้นเป็นค่าที่ถูกสร้างขึ้นจากสมมติฐานข้อผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้ โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ดังจะกล่าวต่อไป

#### 3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

มาตรฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของตัวรับรู้ที่ใช้กับ IMU ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น [12, 13, 15] ถูกกำหนดไว้ดังนี้

$$a_i = a_r - n_a \quad (3.1)$$

เมื่อ  $a_i$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นในอุดมคติ,  $a_r$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นที่วัดได้ และ  $n_a$  คือค่าสัญญาณรบกวน

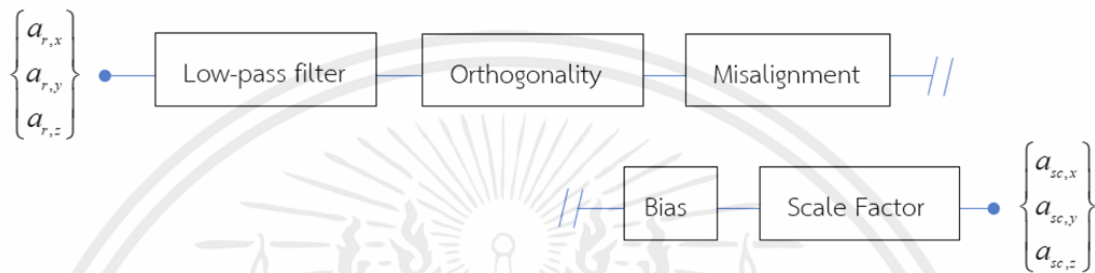
โดยการกำจัดค่าสัญญาณรบกวน  $n_a$  ทำได้ด้วยการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ ในการกรองค่าสัญญาณข้อมูลก่อนการสอบเทียบ ดังนั้นจึงทำให้สามารถตัด  $n_a$  ออกไปได้

จากคำกล่าวที่ว่า ไม่มีตัวรับรู้ใดสามารถทำงานได้ถูกต้อง 100 % จึงมีการเพิ่มสมการข้อผิดพลาดเข้ามา ซึ่งค่าสเกลเฟกเตอร์ คือตัวแปรที่นำมาใช้ในการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตเมื่อเทียบกับอินพุต (Sensitivity) ของตัวรับรู้, ค่าไบแอส คือตัวแปรที่นำมาใช้ในการเผื่อความคลาดเคลื่อนของไบแอส (Zero-Rate Output), การเยื้องแนวแกนเป็นตัวแปรที่เพิ่มเข้ามาโดยเฉพาะสำหรับตัวรับรู้ที่ใช้ใน IMU เมื่อต้องการวัดค่าตำแหน่งการติดตั้งระหว่างเครื่องสอบเทียบกับตัวตัวรับรู้ และค่าคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก เป็นตัวแปรที่ถูกเพิ่มเข้ามาเมื่อแกนทั้ง 3 ของตัวรับรู้ไม่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้นสมการโดยทั่วไปที่นิยมใช้ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น [12, 13] จะสามารถเขียนได้ว่า

$$a_i = M_a O_a S_a (a_r - b_a) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $a_i$  คือค่าของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้นในอุดมคติ,  $M_a$  คือค่าการเยื้องแนวแกนระหว่างตัวรับรู้กับเครื่องสอบเทียบ,  $O_a$  คือค่าความไม่เป็นมุมฉากของตัวรับรู้,  $S_a$  คือค่าสเกลเฟกเตอร์,  $a_r$  คือค่าของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้นที่วัดได้ และ  $b_a$  คือค่าไบแอส

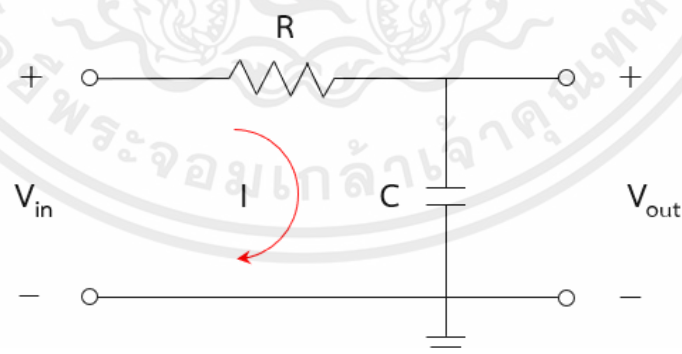
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้นที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับการสอบเทียบจะต้องมีความสัมพันธ์กันระหว่างเครื่องสอบเทียบ (เครื่องมือที่ใช้สอบเทียบ) กับตัวของตัวรับรู้ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการสอบเทียบตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น

### 3.1.1 ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น

ตัวกรองแบบความถี่ต่ำ (Low pass filter) [6] จากกระบวนการเก็บค่าสัญญาณของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น ค่าสัญญาณดังกล่าวจะยังคงมีค่าสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย ดังนั้นการที่จะนำค่าสัญญาณไปคำนวณเพื่อทำการสอบเทียบ จึงมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องนำค่าสัญญาณเหล่านี้ไปทำการกรองสัญญาณเสียก่อน ซึ่งค่าดิบของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้นทั้ง 3 แกน จะถูกกรองผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ เพื่อกำจัดค่าสัญญาณรบกวน และเพื่อช่วยเพิ่มความถูกต้องของค่าสัญญาณ



รูปที่ 3.2 วงจร RC ของตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ ซึ่งคุณสมบัติของตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ คือ ความถี่สูงจะลัดวงจรผ่าน  $C$  ลงกราวด์ ถ้าไม่ว่ากรณีใด และความถี่ต่ำจะสามารถผ่านไปยัง  $V_{out}$  ได้ สัญญาณตัวกรองความถี่ต่ำสามารถเขียนเป็นสมการจะได้ว่า

$$-V_{in} + IR + V_{out} = 0 \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$I = i_c = C \frac{d}{dt} V_{out} \quad (3.4)$$

ดังนั้น

$$-V_{in} + \left( C \frac{d}{dt} V_{out} \right) R + V_{out} = 0 \quad (3.5)$$

$$-V_{in} + RC \frac{d}{dt} V_{out} + V_{out} = 0 \quad (3.6)$$

ดังนั้น Numerical differential จะได้ว่า

$$-V_{in} + RC \frac{(V_{out} - V_{out,t-1})}{t - t_{-1}} + V_{out} = 0 \quad (3.7)$$

กำหนดให้ Sampling Rate มีค่าเท่ากับ  $dt$  จะได้ว่า

$$-V_{in} + RC \frac{(V_{out} - V_{out,t-1})}{dt} + V_{out} = 0 \quad (3.8)$$

$$-V_{in} dt + RC V_{out} - RC V_{out,t-1} + V_{out} dt = 0 \quad (3.9)$$

$$(RC + dt) V_{out} = V_{in} dt + RC V_{out,t-1} \quad (3.10)$$

ดังนั้น  $V_{out}$  มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงนี้  $V_{out} = \frac{V_{in} dt + RC V_{out,t-1}}{(RC + dt)}$  เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ (3.11)

ค่าสัญญาณความถี่ตัดสามารถเขียนได้ว่า

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.12)$$

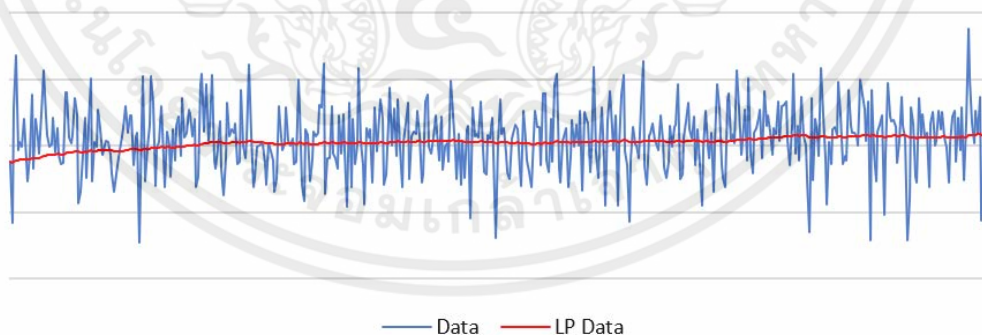
เมื่อ  $dt$  เท่ากับค่าเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล (Sampling time) จะสามารถเขียนได้ว่า

$$k = \frac{dt}{dt + RC} \quad (3.13)$$

สามารถเขียนในรูปแบบสมการตัวรับรู้ความถี่เชิงเส้นจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} a_{lp,x} \\ a_{lp,y} \\ a_{lp,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{lp,x-1} + k_a (a_{r,x} - a_{lp,x-1}) \\ a_{lp,y-1} + k_a (a_{r,y} - a_{lp,y-1}) \\ a_{lp,z-1} + k_a (a_{r,z} - a_{lp,z-1}) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

เมื่อ  $k_{a,i}$  คือค่าคงที่ความราบเรียบของตัวรับรู้ความถี่เชิงเส้น,  $a_{r,i}$  คือค่าสัญญาณดิบของแกนต่างๆ ของตัวรับรู้ความถี่เชิงเส้น และ  $a_{lp,i}$  คือค่าสัญญาณของตัวรับรู้ความถี่เชิงเส้นที่ถูกจำกัดสัญญาณรบกวนผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

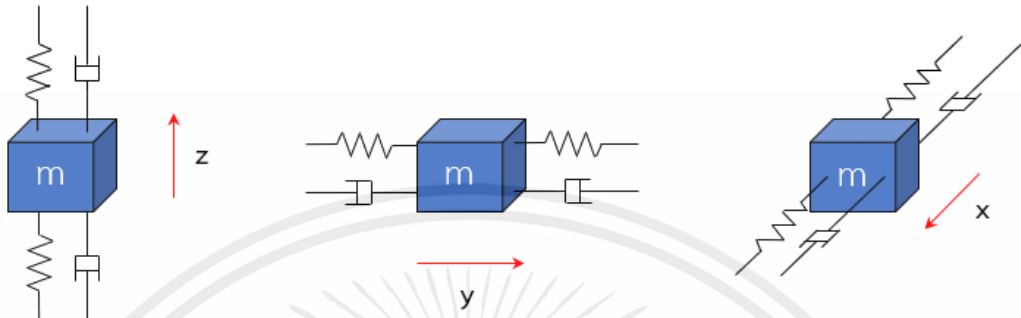


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงลักษณะค่าสัญญาณหลังผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

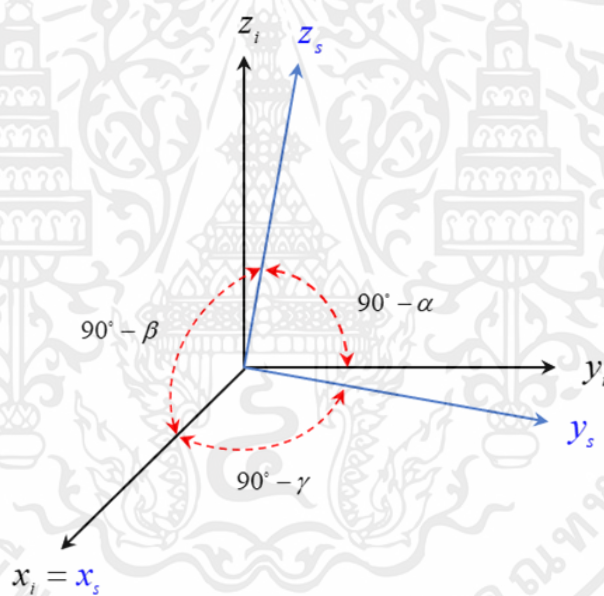
### 3.1.2 คุณสมบัติเชิงตั้งฉากของตัวรับรู้ความถี่เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonality) หรือถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความไม่เป็นมุมฉาก (Non-orthogonality) [7, 8, 10, 13] ปัญหาความไม่เป็นมุมฉากของตัวรับรู้ นั้น เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ซึ่งค่าความไม่เป็นมุมฉากได้เกิดจากขั้นตอนการประกอบตัวตัวรับรู้อย่างไม่

สมบูรณ์ ทำให้แกนทั้ง 3 ของตัวรับรู้ไม่เป็นมุมฉากซึ่งกันและกัน เนื่องจากการตั้งสมมติฐานดังกล่าว ทำให้ต้องมีการหาค่ามุมที่ผิดเพี้ยนไปของตัวรับรู้ เพื่อทำการปรับแนวแกนทั้ง 3 ของตัวรับรู้ให้เป็นมุมฉากซึ่งกันและกัน



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นในแต่ละแนวแกน



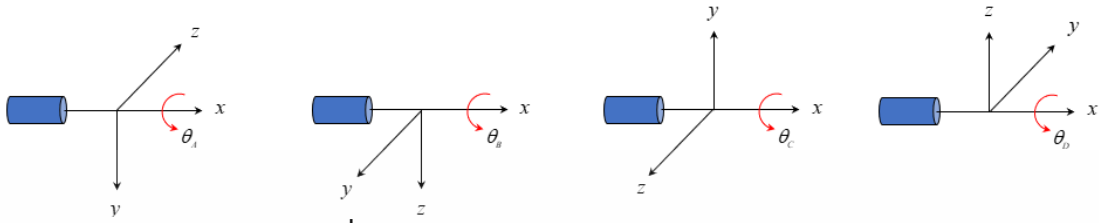
รูปที่ 3.5 แสดงลักษณะของปัญหาความไม่เป็นมุมฉาก

ซึ่งจากรูปที่ 3.5 ได้แสดงตัวอย่างของปัญหาที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้  $x_i$ ,  $y_i$  และ  $z_i$  แทนแนวแกนของตัวรับรู้ในอุดมคติ ซึ่งทั้ง 3 แกนจะทำมุมฉากซึ่งกันและกัน ในส่วนของ  $x_s$ ,  $y_s$  และ  $z_s$  แทนแนวแกนของตัวรับรู้จริงที่มีข้อผิดพลาดเนื่องจากการผลิต ทำให้แกนทั้ง 3 ไม่เป็นมุมฉากซึ่งกันและกัน ซึ่งแนวทางการแก้ไขปัญหาค่าความไม่เป็นมุมฉากนี้ ทำได้ด้วยการกำหนดให้แกนใดแกนหนึ่ง

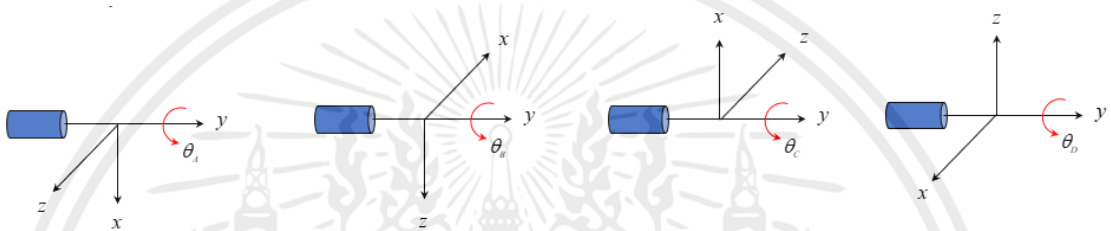
เป็นหลัก แล้วหาค่าของมุมที่ผิดเพี้ยนไปในแต่ละแนวแกน ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้แนวแกน  $x_i$  และ  $x_s$  อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แกนทั้ง 2 ซ้อนทับกันอยู่อย่างสมบูรณ์

จากสมมติฐานดังกล่าวข้างต้น ได้ทำการกำหนดแนวแกนเพื่อใช้หาค่ามุมที่ผิดเพี้ยนไปของตัวรับรู้ เพื่อทำการหาค่าความไม่เป็นมุมฉากในแนวแกน  $y$  เทียบแกน  $x$ , แนวแกน  $z$  เทียบ

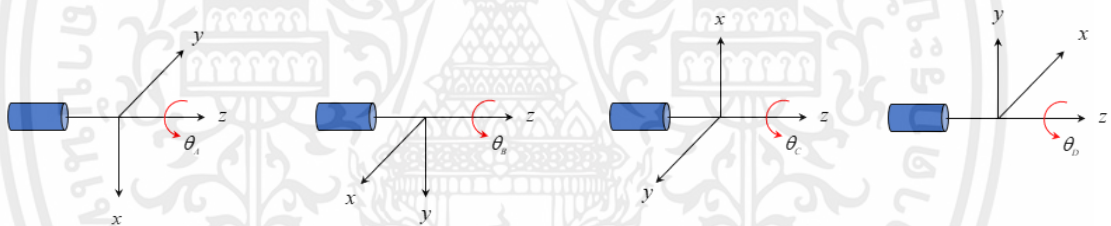
แกน  $x$  และแนวแกน  $y$  เทียบแกน  $z$  สามารถเขียนได้ใหม่ในรูปแบบของแนวแกน ดังแสดงในรูปดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการหมุนรอบแกน  $x$



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะการหมุนรอบแกน  $y$



รูปที่ 3.8 แสดงลักษณะการหมุนรอบแกน  $z$

จากสมมติฐานดังกล่าวข้างต้น ได้ทำการกำหนดแนวแกนเพื่อใช้หาค่ามุมที่ผิดเพี้ยนไปของตัวตัวรับรู้ เพื่อทำการหาค่าความไม่เป็นมุมฉากในแนวแกน  $y$  เทียบแกน  $x$ , แนวแกน  $z$  เทียบแกน  $x$  และแนวแกน  $y$  เทียบแกน  $z$  สามารถเขียนได้ใหม่ในรูปแบบของแนวแกน ดังแสดงในรูปดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 3.6 เมื่อกำหนดให้  $\theta_A$  คือมุมการหมุนของมอเตอร์ที่ทำให้ได้ค่า  $y$  สูงสุด,  $\theta_B$  คือมุมการหมุนของมอเตอร์ที่ทำให้ได้ค่า  $z$  สูงสุด,  $\theta_C$  คือมุมการหมุนของมอเตอร์ที่ทำให้ได้ค่า  $y$  ต่ำสุด,  $\theta_D$  คือมุมการหมุนของมอเตอร์ที่ทำให้ได้ค่า  $z$  ต่ำสุด และในลักษณะเดียวกันในรูปที่ 3.7 และ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ดัดแปลงจากรูปที่ 3.6 การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงตั้งฉากจะกล่าวได้ว่า การตรวจสอบการตั้งฉากไม่ว่ากรณีใดก็ตามจะเป็นการตรวจสอบที่ละระนาบของการหมุน ซึ่งค่าในอุดมคติของการหมุนจาก  $\theta_A$  ไป  $\theta_B$  ควรหมุนได้มุม 90 องศา

$$\theta_B - \theta_A = 90^\circ \quad (3.15)$$

อย่างไรก็ตามไม่มีตัวรับรู้ใดสามารถทำงานได้แม่นยำ ดังนั้นความเป็นจริงสามารถเขียนได้ว่า

$$\theta_B - \theta_A = 90^\circ + \alpha_P \quad (3.16)$$

ค่าในอุดมคติของการหมุนจาก  $\theta_D$  ไป  $\theta_C$  ควรหมุนได้มุม 90 องศา

$$\theta_D - \theta_C = 90^\circ \quad (3.17)$$

อย่างไรก็ตามไม่มีตัวรับรู้ใดสามารถทำงานได้แม่นยำ ดังนั้นความเป็นจริงสามารถเขียนได้ว่า

$$\theta_D - \theta_C = 90^\circ + \alpha_N \quad (3.18)$$

เมื่อกำหนดให้  $N$  คือค่าในแนวแกนลบ (Negative) และ  $P$  คือค่าในแนวแกนบวก (Positive) ดังนั้นสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแกนบวก และแกนลบ ซึ่งค่าในอุดมคติสามารถเขียนได้ว่า

$$\theta_C - \theta_A = 180^\circ \quad (3.19)$$

ดังนั้นความเป็นจริงสามารถเขียนได้ว่า

$$\theta_C - \theta_A = 180^\circ + \alpha_{xy} \quad (3.20)$$

ค่าในอุดมคติเขียนได้ว่า

$$\theta_D - \theta_B = 180^\circ \quad (3.21)$$

ดังนั้นความเป็นจริงสามารถเขียนได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  

$$\theta_D - \theta_B = 180^\circ + \alpha_{xz} \quad (3.22)$$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่แต่ละท่าทางมีพารามิเตอร์ซ้ำกัน จะต้องหาค่าดังกล่าวโดยใช้ค่าเฉลี่ยแต่ละท่าสามารถเขียนได้ว่า

$$a_{zero,xz} = \frac{1}{2}(a_{zero,xz_A} + a_{zero,xz_C}) \quad (3.23)$$

และ

$$a_{zero,xy} = \frac{1}{2}(a_{zero,xy_B} + a_{zero,xy_D}) \quad (3.24)$$

จะได้ว่า

$$a_{zero,xx} = 0.25 \sum_{i=A}^D (a_{zero,xx_i}) \quad (3.25)$$

ซึ่งค่าพารามิเตอร์มีลักษณะสมการรูปแบบเดียวกันในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ดังนั้นจะสามารถสรุปการหาค่าคุณสมบัติเชิงตั้งฉากในแนวแกนบวก (Positive) ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} O_{P,x} & 0 & 0 \\ 0 & O_{P,y} & 0 \\ 0 & 0 & O_{P,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_p \cos \gamma_p & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_p \cos \gamma_p & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha_p \cos \beta_p \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

และการหาค่าคุณสมบัติเชิงตั้งฉากในแนวแกนลบ (Negative) ได้ว่า

$$\begin{bmatrix} O_{N,x} & 0 & 0 \\ 0 & O_{N,y} & 0 \\ 0 & 0 & O_{N,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_N \cos \gamma_N & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_N \cos \gamma_N & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha_N \cos \beta_N \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

จากขั้นตอนดังกล่าวการนำค่าคุณสมบัติเชิงตั้งฉากไปชดเชยให้กับการสัญญาณของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น เมื่อ  $a_{p,i} \geq 0$  จะสามารถเขียนได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} a_{non,x} \\ a_{non,y} \\ a_{non,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{lp,x} O_{p,x} \\ a_{lp,y} O_{p,y} \\ a_{lp,z} O_{p,z} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

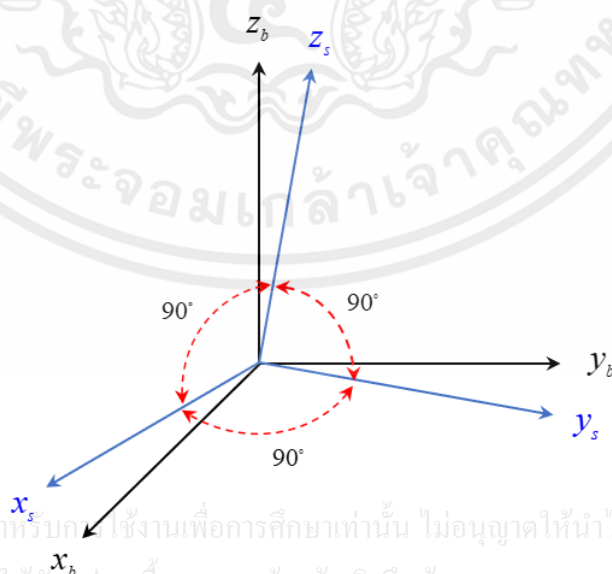
เมื่อ  $a_{lp,i} < 0$  จะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} a_{non,x} \\ a_{non,y} \\ a_{non,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{lp,x} O_{N,x} \\ a_{lp,y} O_{N,y} \\ a_{lp,z} O_{N,z} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

เมื่อ  $a_{lp,i}$  คือค่าสัญญาณของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นที่ถูกกำจัดสัญญาณรบกวนผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ และ  $a_{non,i}$  คือค่าสัญญาณหลังการชดเชยคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก

### 3.1.3 การเยื้องแนวแกนของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

การเยื้องแนวแกน (Misalignment) [4, 12, 13] เป็นปัญหาที่เกิดจากแนวการวางตัวของตัวรับรู้กับตัวของเครื่องสอบเทียบไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ในระหว่างขั้นตอนของการติดตั้งตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นเข้ากับเครื่องสอบเทียบเพื่อทำการสอบเทียบจากสมมติฐานดังกล่าวจึงมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องทำการหาค่ามุมที่ผิดเพี้ยนไประหว่างตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น กับเครื่องสอบเทียบ เพื่อให้กระบวนการสอบเทียบเป็นไปอย่างถูกต้อง และให้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุด

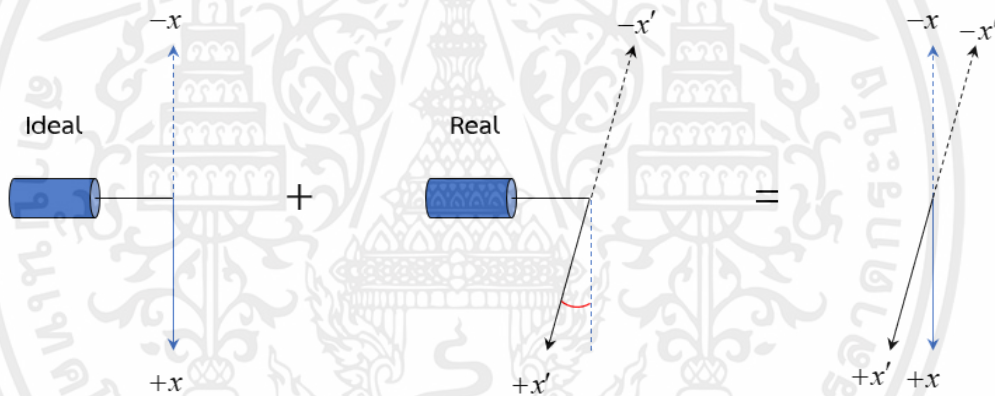


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะของปัญหาการเยื้องแนวแกน

จากรูปที่ 3.9 ได้แสดงตัวอย่างของปัญหาการเอียงแนวแกนที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้  $x_s$ ,  $y_s$  และ  $z_s$  แทนแนวแกนของตัวรับรู้ ซึ่งทั้ง 3 แกนจะทำมุมฉากซึ่งกันและกัน ในส่วนของ  $x_b$ ,  $y_b$  และ  $z_b$  แทนแนวแกนของเครื่องสอบเทียบ จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการวางตัวของตัวรับรู้ ไม่ได้ อยู่ในแนวเดียวกันกับแนวแกนของเครื่องสอบเทียบ ซึ่งในกระบวนการนี้มีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องปรับแนวแกนของตัวรับรู้ ให้ไปอยู่ในแนวแกนเดียวกันกับแนวแกนของเครื่องสอบเทียบ เนื่องจากกระบวนการสอบเทียบจะต้องอาศัยแนวแกนของเครื่องสอบเทียบเป็นหลัก ที่จะคอยสั่งให้ตัวรับรู้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เพื่อที่จะทำให้ค่าที่อ่านออกมามีความถูกต้องมากที่สุด

รูปที่ 3.10 แสดงถึงลักษณะของแนวแกนเครื่องสอบเทียบกับตัวของตัวรับรู้ในอุดมคติ เปรียบเทียบกับการวางตัวของตัวรับรู้ที่เกิดขึ้นจริง ที่ไม่ได้ถูกวางตัวอย่างสมบูรณ์แบบ จึงทำให้แนวแกนของตัวรับรู้กับเครื่องสอบเทียบไม่ได้อยู่ในแนวแกนเดียวกัน ซึ่งจะต้องหาค่ามุมที่เอียงแนวแกนเพื่อทำการสอบเทียบให้แนวแกนของตัวรับรู้กลับเข้ามาอยู่ในแนวแกนเดียวกันกับเครื่องสอบเทียบ



รูปที่ 3.10 แสดงลักษณะการหามุมของการเอียงแนวแกน

การหา  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  สามารถเขียนได้ว่า

$$\alpha = \sin^{-1} \left( a_{\text{height},x} / a_{\text{max},x_{\text{global}}} \right) \quad (3.30)$$

ดังนั้น

$$\beta = \sin^{-1} \left( a_{\text{height},y} / a_{\text{max},y_{\text{global}}} \right) \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในท้องถิ่น หากให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
และ

$$\gamma = \sin^{-1} \left( a_{height,z} / a_{max,z,global} \right) \quad (3.32)$$

ค่าความสัมพันธ์ของค่าการเอียงแนวแกนในแนวแกนบวก (Positive) กล่าวคือเมื่อทำการชดเชยค่าในแกนใดแกนหนึ่ง อีกสองแกนที่เหลือจะมีค่าเท่ากันจะได้ว่า

$$M_{P,x} = M_{P,y} = M_{P,z} \quad (3.33)$$

ดังนั้นค่าการเอียงแนวแกนในแนวแกนบวก (Positive) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} M_{P,x} & 0 & 0 \\ 0 & M_{P,y} & 0 \\ 0 & 0 & M_{P,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_p \cos \beta_p \cos \gamma_p & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_p \cos \beta_p \cos \gamma_p & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha_p \cos \beta_p \cos \gamma_p \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

ลักษณะเช่นเดียวกันในแนวแกนลบ (Negative) สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} M_{N,x} & 0 & 0 \\ 0 & M_{N,y} & 0 \\ 0 & 0 & M_{N,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_N \cos \beta_N \cos \gamma_N & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_N \cos \beta_N \cos \gamma_N & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha_N \cos \beta_N \cos \gamma_N \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

ซึ่งค่าการชดเชยการเอียงแนวแกนในกรณี  $a_{non,i} \geq 0$  จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} a_{mis,x} \\ a_{mis,y} \\ a_{mis,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{non,x} M_{P,x} \\ a_{non,y} M_{P,y} \\ a_{non,z} M_{P,z} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

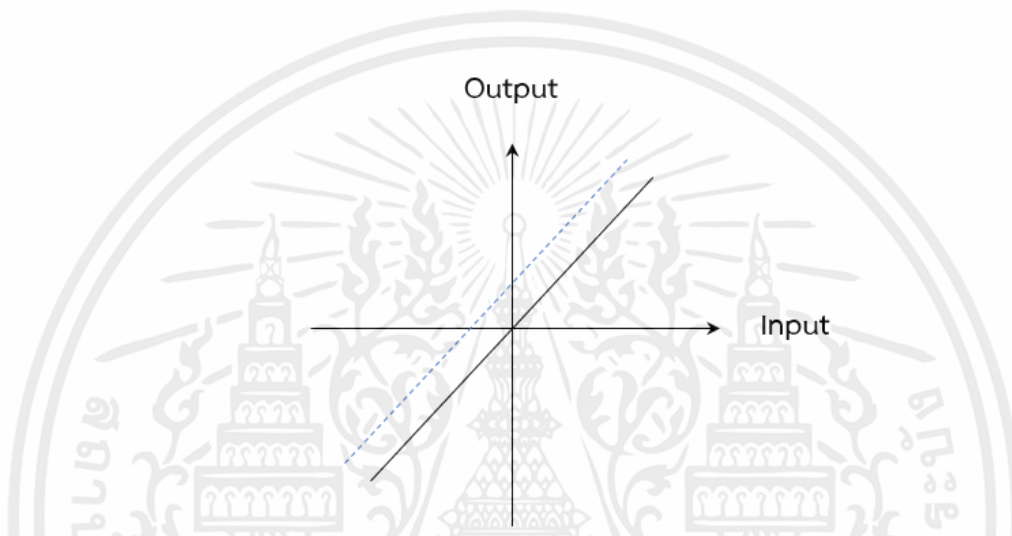
ในกรณี  $a_{non,i} < 0$  จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} a_{mis,x} \\ a_{mis,y} \\ a_{mis,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{non,x} M_{N,x} \\ a_{non,y} M_{N,y} \\ a_{non,z} M_{N,z} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
เมื่อ  $a_{mis,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นเมื่อผ่านการชดเชยค่าการเอียงแนวแกน  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเนื้อหา เราทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 ไบแอสของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

ไบแอส (Bias) [8, 10, 12, 13] เป็นค่าที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดของตัวรับรู้เอง ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากค่าเมื่อตัวรับรู้อยู่ในตำแหน่งที่หยุดนิ่ง หรือไม่มีการเคลื่อนไหว ค่าตัวรับรู้ควร จะอ่านออกมาเท่ากับ 0 แต่ในความเป็นจริงแล้วนั้น ตัวรับรู้แสดงผลออกมาไม่เท่ากับ 0 จึงทำให้ จะต้องทำการสอบเทียบค่าของตัวรับรู้ให้มีความถูกต้องเสียก่อน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.11 เส้นประแสดงถึงค่าไบแอสของตัวรับรู้ ส่วนเส้นสีดำแสดงค่าตัวรับรู้ในอุดมคติ โดยจุดมุ่งหมายของการ ชดเชยค่าไบแอส เพื่อให้ตัวรับรู้สามารถแสดงค่าตำแหน่งที่ถูกต้องมากที่สุด



รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะค่าไบแอส

การหาค่าไบแอสสามารถทำได้จากการเก็บค่าเฉลี่ยในแนวแกนที่ขนานกับพื้นโลกของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} b_{a,x} \\ b_{a,y} \\ b_{a,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{zero,x} \\ a_{zero,y} \\ a_{zero,z} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

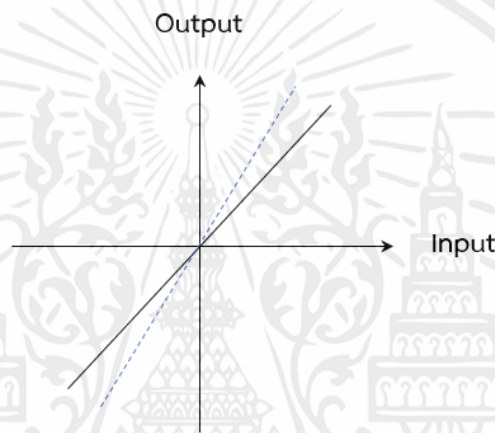
ซึ่งจากค่ากล่าวข้างต้นการชดเชยค่าไบแอสสามารถเขียนเป็นสมการจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} a_{bi,x} \\ a_{bi,y} \\ a_{bi,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{mis,x} - b_{a,x} \\ a_{mis,y} - b_{a,y} \\ a_{mis,z} - b_{a,z} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

เมื่อ  $a_{bi,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้นที่ผ่านกระบวนการชดเชยไบแอสแล้ว และ  $b_{a,i}$  คือค่าชดเชยไบแอส

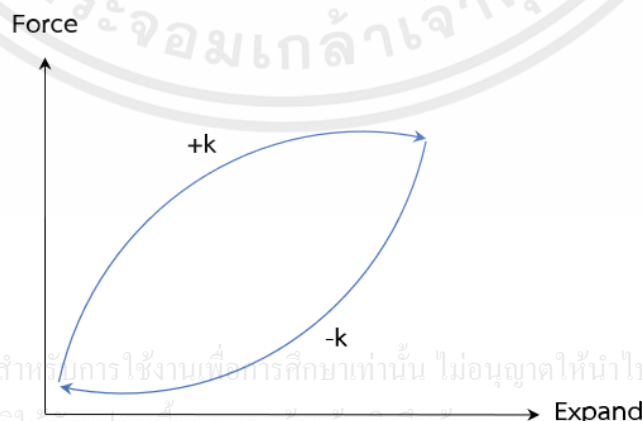
### 3.1.5 สเกลเฟกเตอร์ของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น

ค่าสเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) [10, 12, 13] เป็นค่าของอัตราส่วนการรับส่งข้อมูลระหว่างค่าอินพุตกับค่าเอาต์พุตของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้น ซึ่งจากรูปที่ 3.12 เส้นสีดำแสดงถึงค่าการรับส่งข้อมูลในอุดมคติ ซึ่งมีอัตราส่วนการรับส่งข้อมูลจะอยู่ที่ 1 : 1 ซึ่งในความเป็นจริงแล้วตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้นมีค่าอัตราส่วนที่เปลี่ยนไปดังแสดงดังเส้นประ ซึ่งจุดมุ่งหมายของการชดเชยค่าสเกลเฟกเตอร์ เพื่อต้องการให้ค่าการรับส่งข้อมูลของอินพุตและเอาต์พุตมีอัตราส่วนเท่ากับ 1 : 1 มากที่สุด



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะค่าสเกลเฟกเตอร์

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของสปริง ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าค่า  $k$  ขณะยืดและหดมีค่าที่ไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดได้จากความล้าของสปริง หรือกระบวนการผลิต ทำให้ค่า  $k$  ของสปริงมีค่าที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ในแต่ละแนวแกนของตัวรับรู้ความแรงเชิงเส้นให้ค่าสเกลที่ไม่เท่ากัน



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการยืดหดของสปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารในทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าสเกลเฟกเตอร์ในแนวแกนบวก (Positive) สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} S_{P,x} & 0 & 0 \\ 0 & S_{P,x} & 0 \\ 0 & 0 & S_{P,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1/a_{\max,x} - a_{\text{zero},x})G_{\max} & 0 & 0 \\ 0 & (1/a_{\max,y} - a_{\text{zero},y})G_{\max} & 0 \\ 0 & 0 & (1/a_{\max,z} - a_{\text{zero},z})G_{\max} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

ค่าสเกลเฟกเตอร์ในแนวแกนลบ (Negative) สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} S_{N,x} & 0 & 0 \\ 0 & S_{N,x} & 0 \\ 0 & 0 & S_{N,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1/a_{\min,x} - a_{\text{zero},x})G_{\min} & 0 & 0 \\ 0 & (1/a_{\min,y} - a_{\text{zero},y})G_{\min} & 0 \\ 0 & 0 & (1/a_{\min,z} - a_{\text{zero},z})G_{\min} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบของสมการในกรณี  $a_{bi,i} \geq 0$  จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} a_{sc,x} \\ a_{sc,y} \\ a_{sc,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_{bi,x} - a_{\text{zero},x})S_{P,x} \\ (a_{bi,y} - a_{\text{zero},y})S_{P,y} \\ (a_{bi,z} - a_{\text{zero},z})S_{P,z} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

ในกรณี  $a_{bi,i} < 0$  จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} a_{sc,x} \\ a_{sc,y} \\ a_{sc,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (a_{bi,x} - a_{\text{zero},x})S_{N,x} \\ (a_{bi,y} - a_{\text{zero},y})S_{N,y} \\ (a_{bi,z} - a_{\text{zero},z})S_{N,z} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

เมื่อ  $G_i$  คือค่าขนาดความแรงของแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 1 g,  $a_{bi,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นเมื่อผ่านการชดเชยค่าไบแอส,  $a_{\max,i}$  คือค่าสูงสุดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น  $a_{\min,i}$  คือค่าต่ำสุดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และ  $a_{\text{zero},i}$  คือค่า ณ จุดของแกนตัวรับรู้ที่ขนานกับแกนโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

มาตรฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของตัวรับรู้ที่ใช้กับ IMU ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม [1, 5, 10] ถูกกำหนดไว้ดังนี้

$$g_i = g_r - n_g \quad (3.44)$$

เมื่อ  $g_i$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมในอุดมคติ,  $g_r$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้ และ  $n_g$  คือค่าสัญญาณรบกวน

โดยการกำจัดค่าสัญญาณรบกวน  $n_g$  ทำได้ด้วยการใช้ตัวกรองความถี่ต่ำ ในการกรองค่าสัญญาณข้อมูลก่อนการสอบเทียบ ดังนั้นจึงทำให้สามารถตัด  $n_g$  ออกไปได้

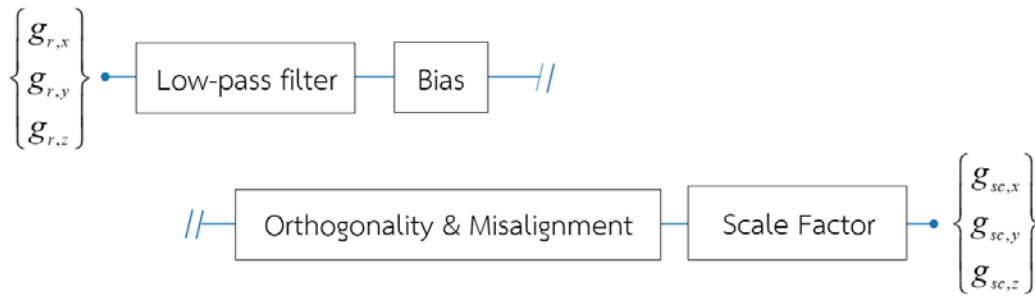
จากคำกล่าวที่ว่า ไม่มีตัวรับรู้ใดสามารถทำงานได้ถูกต้อง 100 % จึงมีการเพิ่มสมการข้อผิดพลาดเข้ามา ซึ่งค่าสเกลเฟกเตอร์ คือตัวแปรที่นำมาใช้ในการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตเมื่อเทียบกับอินพุต (Sensitivity) ของตัวรับรู้, ค่าไบแอส คือตัวแปรที่นำมาใช้ในการเผื่อความคลาดเคลื่อนของไบแอส (Zero-Rate Output), การเยื้องแนวแกนเป็นตัวแปรที่เพิ่มเข้ามาโดยเฉพาะสำหรับตัวรับรู้ที่ใช้ใน IMU เมื่อต้องการวัดค่าตำแหน่งการติดตั้งระหว่างเครื่องสอบเทียบกับตัวตัวรับรู้ และค่าคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก เป็นตัวแปรที่ถูกเพิ่มเข้ามาเมื่อแกนทั้ง 3 ของตัวรับรู้ไม่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ดังนั้นสมการโดยทั่วไปที่นิยมใช้ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงเส้น [10, 13] จะสามารถเขียนได้ว่า

$$g_i = M_g S_g (g_r - b_g) \quad (3.45)$$

เมื่อ  $g_i$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมในอุดมคติ,  $M_g$  คือค่าความไม่เป็นมุมฉาก และค่าการเยื้องแนวแกนระหว่างตัวรับรู้กับเครื่องสอบเทียบ,  $S_g$  คือค่าสเกลเฟกเตอร์,  $g_r$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้ และ  $b_g$  คือค่าไบแอส

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับการสอบเทียบจะต้องมีความสัมพันธ์กันระหว่างเครื่องสอบเทียบ (เครื่องมือที่ใช้สอบเทียบ) กับตัวของตัวรับรู้ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอขั้นตอนในการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมดังรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

### 3.2.1 ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

ตัวกรองแบบความถี่ต่ำ (Low pass filter) [6] จากกระบวนการเก็บค่าสัญญาณของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ค่าสัญญาณดังกล่าวจะยังคงมีค่าสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย ดังนั้นการที่จะนำค่าสัญญาณไปคำนวณเพื่อทำการสอบเทียบ จึงมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องนำค่าสัญญาณเหล่านี้ไปทำการกรองสัญญาณเสียก่อน ซึ่งค่าดิบของตัวรับรู้ความเร็วเชิงเส้นทั้ง 3 แกน จะถูกกรองผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ เพื่อกำจัดค่าสัญญาณรบกวน และเพื่อช่วยเพิ่มความถูกต้องของค่าสัญญาณสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\begin{bmatrix} g_{lp,x} \\ g_{lp,y} \\ g_{lp,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{lp,x-1} + k_g (g_{r,x} - g_{lp,x-1}) \\ g_{lp,y-1} + k_g (g_{r,y} - g_{lp,y-1}) \\ g_{lp,z-1} + k_g (g_{r,z} - g_{lp,z-1}) \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

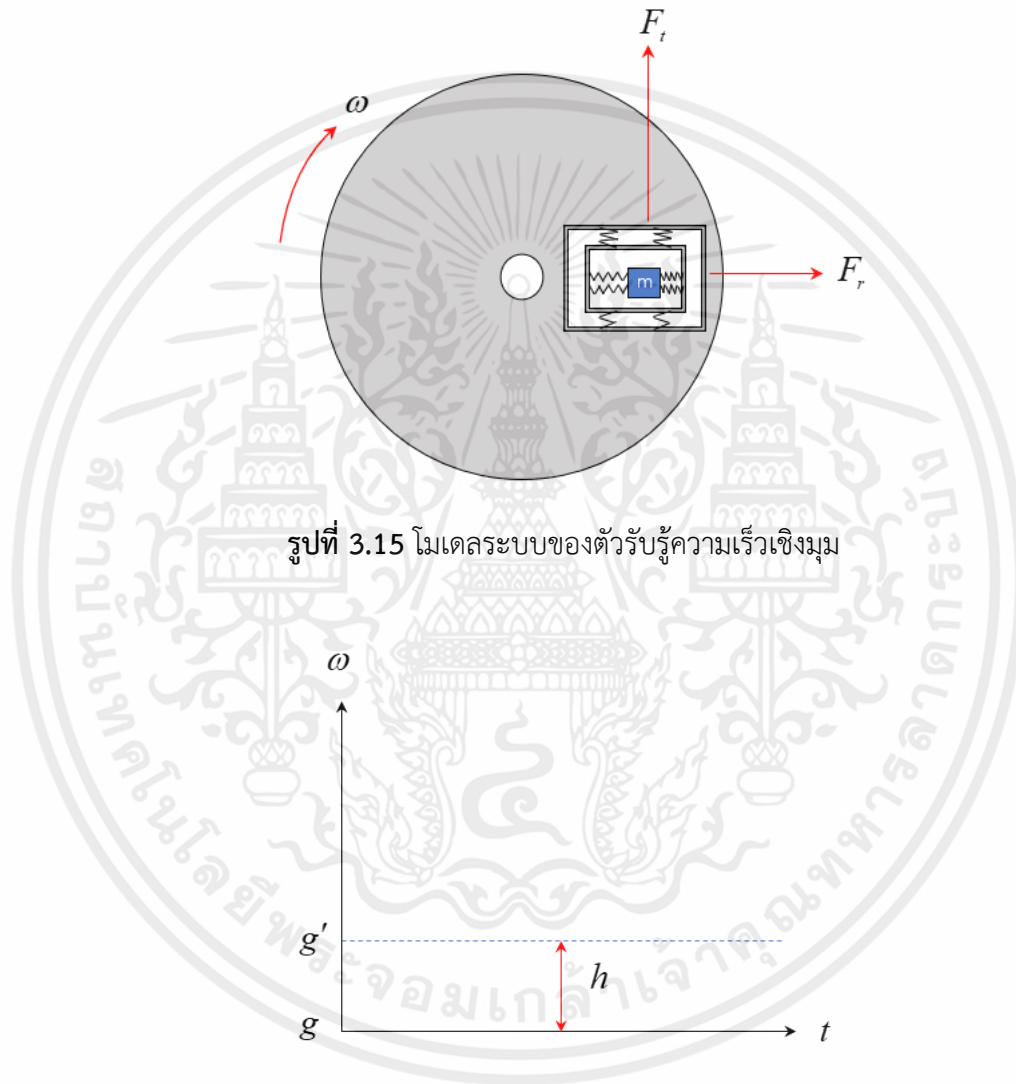
เมื่อ  $k_{g,i}$  คือค่าคงที่ความราบเรียบของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม,  $g_{r,i}$  คือค่าสัญญาณดิบของแกนต่างๆ ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม และ  $g_{lp,i}$  คือค่าสัญญาณของตัวรับรู้ความเร็วเชิงเส้นที่ถูกกำจัดสัญญาณรบกวนผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

### 3.2.2 ไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

ไบแอส (Bias) [8, 10, 13] เมื่อพิจารณาโมเดลระบบมวลสปริง ที่มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางดังรูปที่ 3.15 แสดงลักษณะการติดตั้งตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมบนแท่นหมุน ซึ่งเมื่อตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมถูกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจากแท่นหมุนมากกระทำ จึงทำให้สปริงที่อยู่ภายในตัวรับรู้เกิดการยุบตัวไปตามแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่มากกระทำ จากนั้นตัวรับรู้ถึงจะทำการแสดงค่าความเร็วเชิงมุมออกมา ซึ่งปัญหาค่าไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะมีลักษณะคล้ายกับตัวรับรู้ความเร็วเชิงเส้น ซึ่งเกิดขึ้นจากข้อผิดพลาดของตัวรับรู้เอง เมื่อตัวรับรู้อยู่ในสถานะคงที่ควรมีค่าเท่ากับ 0 แต่ตัวรับรู้กลับให้ค่าที่ต่างออกไป

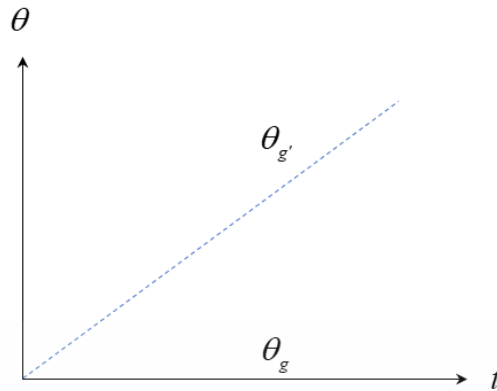
ปัญหาการดริฟต์ (Drift) ของสัญญาณเมื่อเกิดไบแอส (Zero-offset) เนื่องจากค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมมีหน่วยเป็นความเร็วเชิงมุม แต่การนำไปใช้งานจะต้องทำการแปลงหน่วยให้ค่า

ออกมาเป็นองศา ซึ่งต้องใช้การทำ Numerical Integration ณ ขณะหยุดนิ่ง กำหนดให้  $g$  คือค่าในอุดมคติ ซึ่งความเร็วเชิงมุมต้องมีค่าเท่ากับ 0 และ  $g'$  คือค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จริง แสดงดังรูปที่ 3.16 ซึ่งกำหนดให้  $\theta_g = \int g' dt$  และ  $\theta_g = \int g dt$  ดังนั้นจากรูปที่ 3.17 จะเห็นได้ว่าค่ามุมเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาแม้ว่าระบบจะหยุดนิ่งก็ตาม ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องแก้ไขปัญหาค่าไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม เพื่อกำจัดปัญหาการดริฟต์ของระบบ



รูปที่ 3.16 ลักษณะค่าไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมก่อนเปลี่ยนเป็นองศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 ลักษณะค่าไบแอสของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมหลังเปลี่ยนเป็นองศา

การหาค่าไบแอสสามารถหาได้จากการเก็บค่าเฉลี่ยในแนวแกนขณะหยุดนิ่งของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} b_{g,x} \\ b_{g,y} \\ b_{g,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{zero,x} \\ g_{zero,y} \\ g_{zero,z} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

สามารถเขียนเป็นสมการชดเชยค่าไบแอสจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} g_{bi,x} \\ g_{bi,y} \\ g_{bi,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{lp,x} - b_{g,x} \\ g_{lp,y} - b_{g,y} \\ g_{lp,z} - b_{g,z} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

เมื่อ  $g_{lp,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมเมื่อผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ และ  $b_{g,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมเมื่อหยุดนิ่ง

### 3.2.3 คุณสมบัติเชิงตั้งฉากของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonality) หรือถูกเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความไม่เป็นมุมฉาก (Non-orthogonality) [7, 8, 10, 13] โดยการเก็บค่าความไม่เป็นมุมฉากของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะแตกต่างจากการเก็บค่าความไม่เป็นมุมฉากของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น เนื่องจากในกรณีของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะต้องทำการเก็บค่าในแต่ละแนวแกนในขณะที่ทำการหมุนรอบแกนนั้นๆ ด้วยค่าไม่ว่ากรณีใดก็ตาม โดยทำการเก็บรอบแกนทั้ง 3 แกน แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกัน โดยในส่วนของ

ขั้นตอนการสอบเทียบคุณสมบัติเชิงตั้งฉากของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม จะถูกคิดร่วมกับกระบวนการหาค่าการเอียงแนวแกนในหัวข้อต่อไปที่จะถูกกล่าวถึงต่อไป

### 3.2.4 การเอียงแนวแกนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

การเอียงแนวแกน (Misalignment) [4, 13] เมื่อตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องสอบเทียบ จะต้องมีการปรับแนวแกนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมให้อยู่ในแนวแกนเดียวกับเครื่องสอบเทียบ โดยกำหนดให้แนวแกนของเครื่องสอบเทียบเป็นแนวแกนหลัก แล้วทำการหมุนรอบแนวแกนเพื่อปรับแนวแกนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมเข้าหาแนวแกนของเครื่องสอบเทียบ โดยในส่วนของขั้นตอนดังกล่าว จะสามารถแก้ไขความไม่เป็นมุมฉากของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม และการเอียงแนวแกนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมได้พร้อมๆ กัน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

จะสามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.50)$$

นำค่าที่ได้ไปทำการชดเชยจะได้ว่า

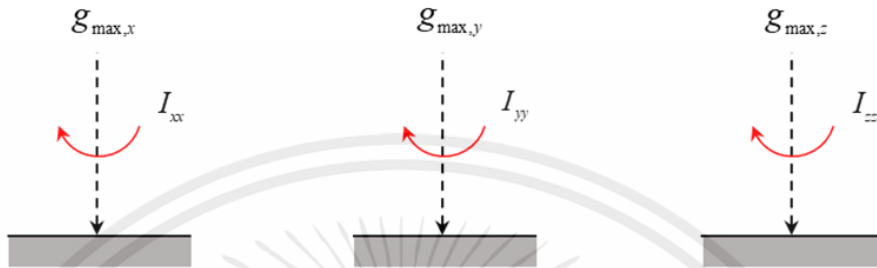
$$\begin{bmatrix} g_{mis,x} \\ g_{mis,y} \\ g_{mis,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{bi,x}M_{11} + g_{bi,y}M_{21} + g_{bi,z}M_{31} \\ g_{bi,x}M_{12} + g_{bi,y}M_{22} + g_{bi,z}M_{32} \\ g_{bi,x}M_{13} + g_{bi,y}M_{23} + g_{bi,z}M_{33} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

เมื่อ  $I_i$  คือค่าความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่เลือกใช้,  $M_i$  คือค่าชดเชยคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก และค่าการเอียงแนวแกนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม,  $S_i$  คือค่าความเร็วที่วัดได้จริง และ  $g_{bi,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมเมื่อผ่านการชดเชยค่าไบแอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.5 สเกลเฟกเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

ค่าสเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) [10, 13] ซึ่งการชดเชยค่าสเกลเฟกเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม มีลักษณะคล้ายตัวรับรู้ความเร่ง ดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 3.1.5 ซึ่งกระบวนการเก็บค่าแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ตำแหน่งในการเก็บค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมในแต่ละแนวแกน

การหาค่าสเกลเฟกเตอร์สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1/g_{\max,x} - g_{\min,x})I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & (1/g_{\max,y} - g_{\min,y})I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & (1/g_{\max,z} - g_{\min,z})I_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

ดังนั้นสามารถชดเชยค่าสเกลเฟกเตอร์ให้กับสัญญาณของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} g_{sc,x} \\ g_{sc,y} \\ g_{sc,z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (g_{mis,x} - g_{\min,x})S_x \\ (g_{mis,y} - g_{\min,y})S_y \\ (g_{mis,z} - g_{\min,z})S_z \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

เมื่อ  $I_i$  คือค่าความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ที่เลือกใช้,  $g_{mis,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมเมื่อผ่านกระบวนการชดเชยค่าคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก และค่าการเอียงแนวแกน,  $g_{\max,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมสูงสุดที่ตัวรับรู้อ่านได้ และ  $g_{\min,i}$  คือค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมต่ำสุดที่ตัวรับรู้อ่านได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 สรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ IMU ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วย สเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) การเยื้องแนวแกน (Misalignment) คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonality) และค่าไบแอส (Bias) ค่าสัญญาณจะถูกปรับปรุงก่อนนำไปใช้ในการคำนวณ โดยใช้ตัวกรองแบบความถี่ต่ำ (Low pass filter) ในการลดสัญญาณรบกวน (Noise) ซึ่งค่าต่างๆ ที่ถูกกล่าวมานั้นเป็นค่าที่ถูกสร้างขึ้นจากสมมติฐานข้อผิดพลาดต่างๆ ของตัวรับรู้ ซึ่งตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม จะมีลักษณะหรือลำดับขั้นตอนในการสอบเทียบที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน ซึ่งจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามความเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการวิจัย

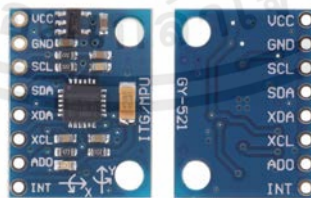
ในขั้นตอนการสอบเทียบ ตำแหน่งการติดตั้งตัวรับรู้ทั้ง 2 และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการสอบเทียบมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบจะต้องได้มาตรฐาน ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้เครื่องสอบเทียบที่สร้างขึ้นเอง (Mark 2 : 3-Axis Rate Table) เพื่อใช้ในการทดสอบอัลกอริทึมในเบื้องต้น แล้วทำการทดสอบอย่างละเอียดอีกครั้งกับเครื่องมือสอบเทียบมาตรฐานสูง (Acutronic : 3-Axis Rate Table) โดยวิธีการดำเนินการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ๆ คือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ การติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องสอบเทียบ และขั้นตอนการสอบเทียบ ดังจะกล่าวต่อไปนี้

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบของวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วย ตัวรับสัญญาณ ตัวส่งสัญญาณ และเครื่องสอบเทียบ ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆ ที่ถูกออกแบบในการเชื่อมต่อของวงจรจะมีความสัมพันธ์กันในการรับส่งค่าสัญญาณที่ถูกเก็บจากเครื่องสอบเทียบ ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 4.1.1 ตัวรับรู้แรงเฉื่อย

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกทดสอบกับ IMU ยี่ห้อ Shenzhen รุ่น MPU6050 2 ตัว เป็นตัวรับรู้แบบต้นทุนต่ำ (Low-cost IMU) ซึ่งในรุ่น MPU6050 นั้น เป็นโมดูลตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ในตัวเดียวกัน บนโมดูลประกอบด้วยชิป MPU6050 ส่งข้อมูลผ่าน Bus I2C ซึ่งสามารถทำงานได้ทั้ง 2 อย่างในเวลาเดียวกัน ใช้ในการตรวจสอบทิศทางการเคลื่อนที่ และสามารถใช้ในการตรวจสอบความเร็วในการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแกนทั้ง 3 ได้



รูปที่ 4.1 IMU รุ่น MPU6050

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ในส่วนช่อง IMU นำมาใช้ในการวัดค่าความถูกต้องหลังการสอบเทียบคือ STIM300 ซึ่งถ้าไม่ว่ากรณีใดเป็น IMU ความแม่นยำสูงที่ใช้ในระบบนำทาง โดยจะประกอบไปด้วยโมดูลตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ในตัวเดียวกัน



รูปที่ 4.2 IMU รุ่น STIM300

#### 4.1.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

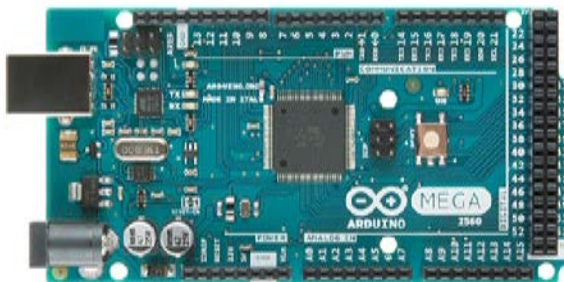
ทำการเก็บข้อมูล และติดต่อกับตัวรับรู้เพื่อส่งข้อมูลไปวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์ โดยใช้ Arduino Uno R3 ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software (Open Source) ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา



รูปที่ 4.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

การวัดมุมเอียง มอเตอร์ทั้งสามตัวของเครื่องทดสอบตัวรับรู้ จะถูกเขียนโปรแกรมควบคุมรอบ และองศาในการหมุนด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 บอร์ดรุ่นใหญ่ในของตระกูล Arduino มีคุณสมบัติต่างๆ เพิ่มขึ้นจาก Arduino Uno R3 ใช้ชิป AT mega 2560 ที่มีหน่วยความจำแฟลช 256 KB แรม 8 KB ใช้ไฟเลี้ยง 7 ถึง 12 V แรงดันของระบบอยู่ที่ 5 V มี Digital Input / Output 54 ขา (เป็น PWM ได้ 14 ขา) มี Analog Input 16 ขา Serial UART 4 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบน Arduino IDE และโปรแกรมผ่าน USB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560

#### 4.1.3 ตัวรับส่งข้อมูล

ทำการรับส่งข้อมูลระหว่าง Arduino Uno R3 ผ่าน XBee (2mW Wire Antenna - Series 2 ZB) ซึ่งเป็นโมดูลรับส่งสัญญาณไร้สาย ย่านความถี่ 2.4 GHz ตามมาตรฐานโปรโตคอล (ZigBee / IEEE 802.15) โดยใช้พลังงานต่ำ (3.3 Volt) รับส่งข้อมูลอัตราความเร็ว 250 Kbps สายอากาศแบบ Wire Ant (Whip antenna) รองรับเครือข่ายแบบรับส่งระยะสั้น (Mesh)

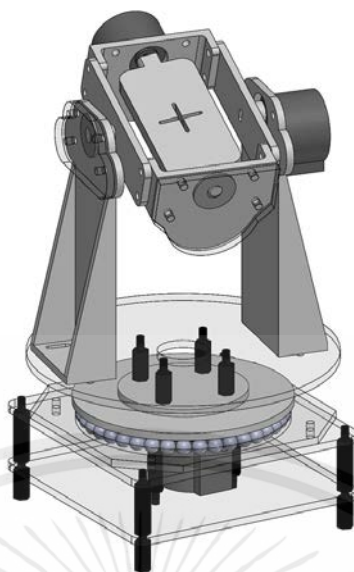


รูปที่ 4.5 โมดูลรับส่งสัญญาณไร้สาย (XBee)

#### 4.1.4 เครื่องสอบเทียบ

เครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเอง (Mark 2 : 3-Axis Rate Table) ทำการออกแบบเครื่องทดสอบตัวรับรู้ขึ้นใหม่เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งสร้างขึ้นจากอะคริลิก และชิ้นส่วนโมเดล 3D ปริ้นเตอร์ พร้อมทั้งใช้มอเตอร์ (RoHS Step Motor : 28BYJ-48 12V DC) ในการควบคุมรอบ และตำแหน่งในการหมุน ซึ่งใช้ดิจิตอลตัวรับรู้ (Digital Level 150 mm : WEN-150) ในการวัดตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่งเครื่องสอบเทียบนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้างขึ้นเพื่อใช้ทดสอบตัวรับรู้ในเบื้องต้น เพื่อที่จะเก็บข้อมูลจากตัวรับรู้ไปใช้ในการทดสอบอัลกอริทึมที่ถูกออกแบบไว้สำหรับการสอบเทียบ ก่อนที่จะนำไปทำการทดสอบด้วยเครื่องสอบเทียบมาตรฐานสูงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



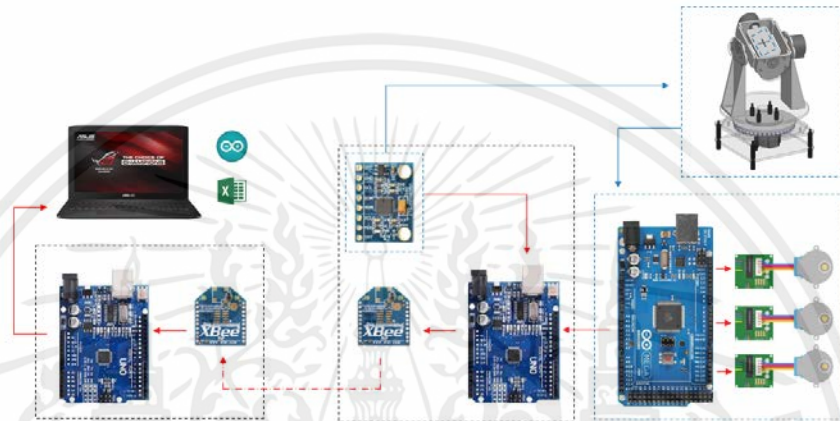
รูปที่ 4.6 เครื่องสอบเทียบตัวรับรู้แบบสร้างชิ้นเอง (Mark 2 : 3-Axis Rate Table)

เครื่องสอบเทียบมาตรฐานสูง (Acutronic : 3-Axis Rate Table) เป็นเครื่องมือสอบเทียบตัวรับรู้ที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ สามารถรองรับน้ำหนักสูงสุดได้ถึง 15 กิโลกรัม โดยมีอัตราความผิดพลาดของตำแหน่งสูงสุดไม่เกิน 0.0005 เปอร์เซ็นต์ ต่อการเคลื่อนที่ 360 องศา ซึ่งค่าความผิดพลาดสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ดังกล่าวจะไม่ถูกนำมาคิด เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดน้อยมาก ซึ่งเครื่องสอบเทียบนี้ถูกใช้ เป็นเครื่องมือสอบเทียบหลักของวิทยานิพนธ์นี้

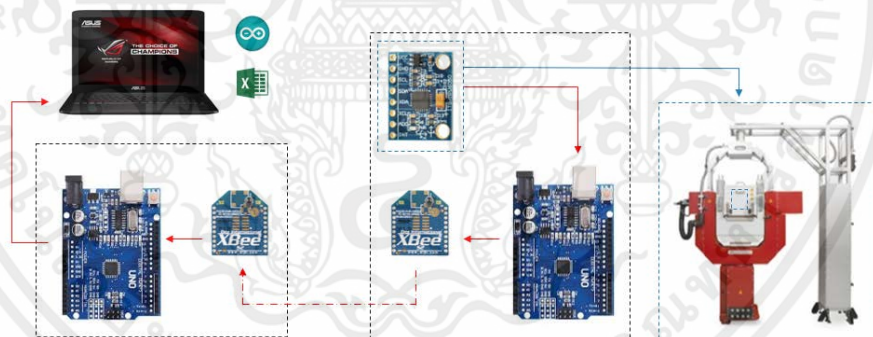


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.7 เครื่องสอบเทียบตัวรับรู้แบบมาตรฐานสูง (Acutronic : 3-Axis Rate Table)ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากอุปกรณ์การสอบเทียบทั้งหมดดังที่กล่าวมาในข้างต้น จะแบ่งการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ออกเป็น 2 แบบ คือ การเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องสอบเทียบแบบสร้างเอง และการเชื่อมต่ออุปกรณ์ กับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง โดยในส่วนของ การเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องสอบเทียบแบบ สร้างเองที่ถูกใช้ทดสอบอัลกอริทึมในเบื้องต้นนั้นจะมีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ การเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงที่ใช้เป็นเครื่องมือสอบเทียบหลักในงาน วิทยานิพนธ์นี้จะมีลักษณะการเชื่อมต่อดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องสอบเทียบแบบสร้างเอง



รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง

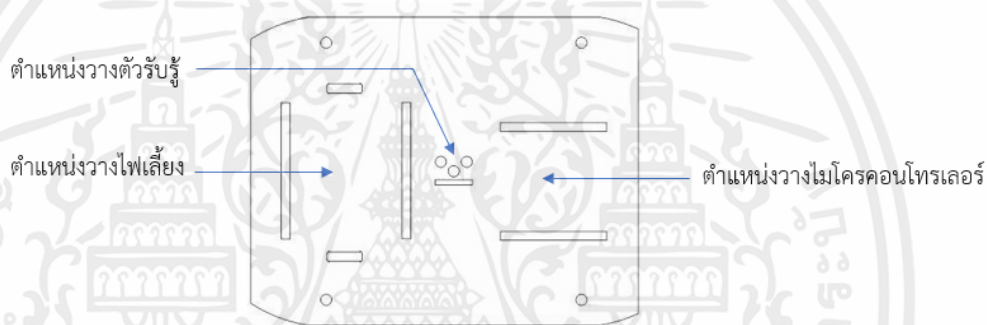
#### 4.2 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

การติดตั้งอุปกรณ์การทดลองเข้ากับเครื่องสอบเทียบ เป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่าง ยิ่ง เนื่องจากผลความผิดพลาดของตำแหน่งในการติดตั้งแม้เพียงเล็กน้อยอาจส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้ จากการทดลอง ซึ่งมีส่วนทำให้ค่าจากการทดลองด้วยวิธีการต่างๆ เกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้ ซึ่งใน วิทยานิพนธ์นี้การทดลองของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจะแบ่งออกเป็น 8 วิธี และตัวรับรู้ความเร็ว เชิงมุม 5 วิธี ซึ่งตัวรับรู้จะต้องอยู่ในตำแหน่งเดิมทุกครั้ง เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความแม่นยำ มากที่สุด โดยการทดลองดังกล่าวจะใช้ตัวรับรู้ทั้งสิ้น 3 ตัว ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองเข้ากับ

เครื่องสอบเทียบจึงเป็นอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การออกแบบแผ่นติดตั้ง และการติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องสอบเทียบ

#### 4.2.1 การออกแบบแผ่นติดตั้ง

การออกแบบแผ่นติดตั้งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งหมดจะต้องจะต้องถูกติดตั้งไว้ที่แผ่นติดตั้ง ก่อนที่จะถูกนำไปติดตั้งเข้ากับเครื่องสอบเทียบ โดยหลักการในการออกแบบแผ่นติดตั้ง จำเป็นอย่างยิ่งที่แผ่นติดตั้งจะต้องมีความหนาน้อยที่สุด เพื่อลดผลกระทบจากการหมุนรอบแกนของตัวรับรู้ โดยแผ่นติดตั้งที่ถูกออกแบบมาจะมีความหนา 2 มิลลิเมตร โดยใช้แผ่นอะคริลิก ทำให้เมื่อทำการติดตั้งแผ่นติดตั้งจะแบนเรียบกับหน้าแปลนตัวเครื่องสอบเทียบมากที่สุด โดยตัวรับรู้จะถูกออกแบบให้อยู่กึ่งกลางแผ่นติดตั้งมากที่สุดเพื่อลดผลกระทบจากการติดตั้งให้น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.10

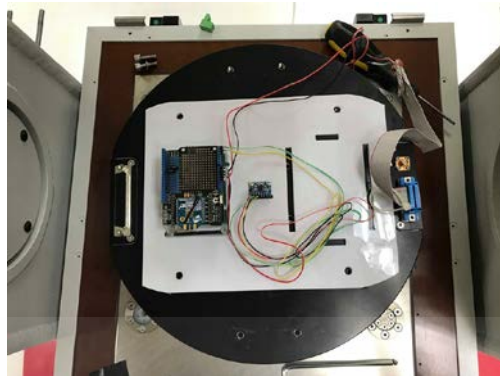


รูปที่ 4.10 การออกแบบแผ่นติดตั้ง

#### 4.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องสอบเทียบ

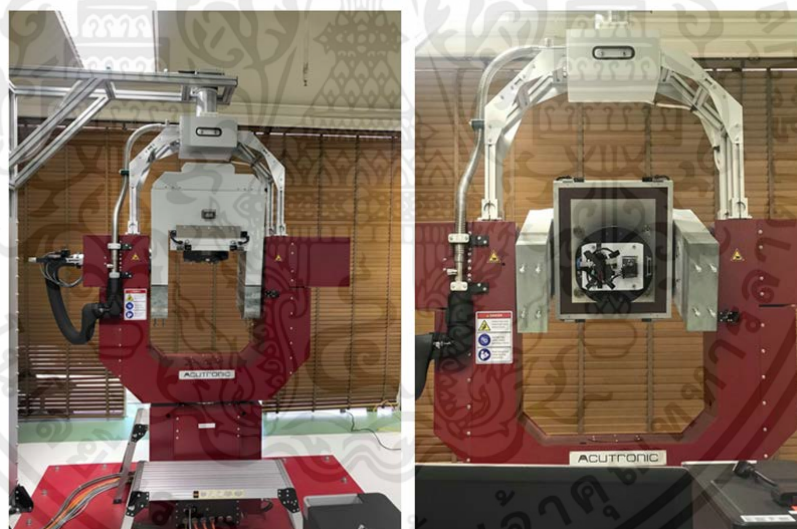
จากแผ่นติดตั้งที่ได้ถูกออกแบบไว้ อีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญคือการติดตั้งแผ่นติดตั้งเข้ากับเครื่องสอบเทียบ โดยอุปกรณ์ต่างๆ บนแผ่นติดตั้งจะต้องถูกยึดติดเข้ากับแผ่นติดตั้งอย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันอุปกรณ์ที่อาจหลุดร่วงออกมาได้ ซึ่งจะส่งผลให้การทดลองต้องหยุดเพื่อทำการแก้ไข ดังนั้นการติดตั้งระหว่างแผ่นติดตั้งเข้ากับหน้าแปลนของเครื่องสอบเทียบจะถูกยึดไว้ด้วยน็อตทั้ง 4 มุม รวมทั้งอุปกรณ์บนแผ่นติดตั้งก็เช่นกัน และในส่วนของสายไฟต่างๆ จะถูกยึดด้วยแผ่นเทปกาว เพื่อป้องกันการกระชากจากการหมุนด้วยความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 การติดตั้งแผ่นติดตั้งเข้ากับหน้าแปลนเครื่องสอบเทียบ

โดยหลังการติดตั้งดังกล่าวจะถูกทดสอบด้วยการหมุนเครื่องไปยังตำแหน่งต่างๆ ด้วยความเร็ว พร้อมทั้งสังเกตการทำงานของระบบที่อยู่บนแผ่นติดตั้ง เพื่อทดสอบว่าการติดตั้งเป็นไปอย่างเรียบร้อยสมบูรณ์ อีกทั้งยังไม่เกิดผลกระทบกับระบบของตัวรับรู้ เพื่อเป็นการตรวจสอบความพร้อมของอุปกรณ์ต่างๆ ก่อนเริ่มทำการทดสอบจริง



รูปที่ 4.12 การหมุนทดสอบการทำงานของระบบหลังติดตั้งอุปกรณ์

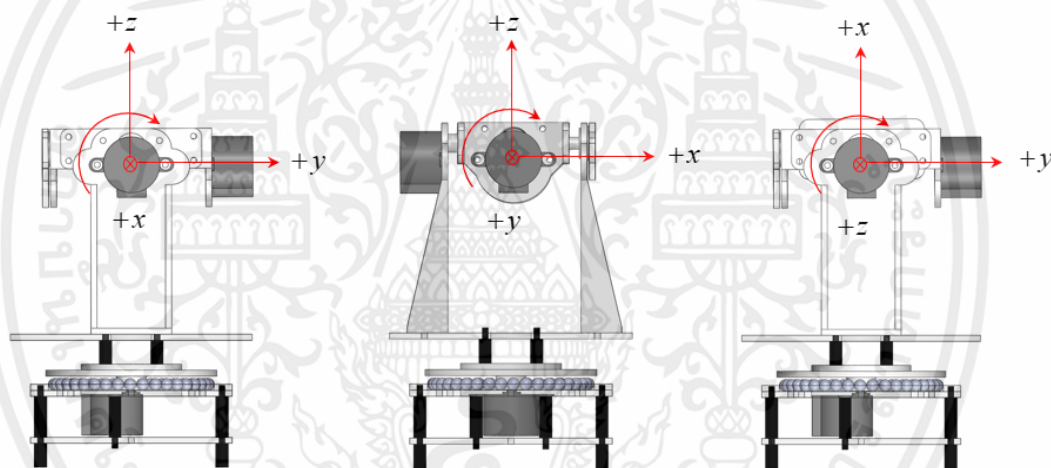
#### 4.3 ขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ด้วยแรงเฉื่อย

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการแบ่งการสอบเทียบออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยตัวรับรู้ทั้งสองจะถูกเก็บค่าการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ จากเครื่องสอบเทียบ แล้วนำค่าข้อมูลมาทำการประมวลผลแบบออฟไลน์ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อดูผลการทดสอบหลังถูกสอบเทียบว่าอัลกอริทึมที่ถูกออกแบบมานั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวรับรู้ทั้ง 2 ได้มากน้อยเพียงใด

### 4.3.1 ขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น ในการสอบเทียบจะต้องทำการเก็บข้อมูลของตัวรับรู้ ในตำแหน่งทิศทางต่างๆ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็นสองวิธีการเก็บข้อมูลใหญ่ๆ คือ การเก็บค่าแบบหมุนหยุด และการเก็บค่าแบบหมุนต่อเนื่อง เพื่อทดสอบว่าการเก็บค่าในลักษณะไหนเหมาะสมกับอัลกอริทึมที่ถูกออกแบบมามากที่สุด

โดยการเก็บค่าแบบหมุนหยุด วิธีการนี้คือไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับทิศทาง ซึ่งทำให้ผู้ที่เริ่มต้นศึกษาสามารถเก็บข้อมูลได้ง่าย และไม่สับสนในการวางตำแหน่งทิศทางของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น ซึ่งจะทำให้การออกคำสั่งผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ปรับตำแหน่งครั้งละ 1 องศา จนครบ 360 องศา ในแกนที่ต้องการเก็บค่า และการเก็บค่าแบบหมุนต่อเนื่องจะมีลักษณะคล้ายคลึงกับวิธีการข้างต้น จะมีความแตกต่างกันคือการปรับตำแหน่งจะถูกหมุนต่อเนื่องจนครบ 360 องศา ในแกนที่ต้องการเก็บค่า



รูปที่ 4.13 ลักษณะการเก็บค่าตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นโดยการหมุนรอบแกนทั้ง 3 แกน

วิทยานิพนธ์นี้ค่าผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิจะไม่ถูกนำมาคิด แต่ในการทดลองจะมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ตามคู่มือที่ตัวรับรู้แนะนำ โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนในการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น จะถูกกล่าวดังต่อไปนี้

#### 4.3.1.1 การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบหมุนหยุด

1. เปิดการทำงานตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น เพื่ออุ่นเครื่องตัวรับรู้ ก่อนที่จะทำการ

สอบเทียบเพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิและรักษาสภาพการทำงาน เป็นเวลา 30 วินาที

2. เก็บข้อมูลของตัวรับรู้ในตำแหน่งทิศทางต่างๆ แบบหมุนหยุด โดยหมุนรอบแกน

ที่จะทำการเก็บข้อมูล โดยหมุน 1 องศา หยุดนิ่ง T วินาที จนครบ 360 องศา

โดยทำซ้ำวิธีการดังกล่าวจนครบทั้ง 3 แนวแกน (กำหนดให้ T เท่ากับ 1, 5 และ 10 วินาที ตามลำดับ) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (Sampling time เท่ากับ 0.12 วินาที)

3. นำค่าดิบมาคำนวณผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low pass filter) เพื่อเป็นการลดทอนค่าสัญญาณรบกวน (Noise) ก่อนนำค่าดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการสอบเทียบขั้นต่อไป
4. นำค่าที่ได้จากการคำนวณข้างต้นมาหาคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonality) เพื่อทำการปรับแนวแกนทั้ง 3 ให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการเยื้องแนวแกน (Misalignment) เพื่อปรับแนวแกนของตัวรับรู้ให้อยู่ในทิศทางเดียวกับเครื่องมือที่ใช้สอบเทียบ
5. นำค่าที่ได้จากกระบวนการข้างต้นมาใช้คำนวณหาค่าไบแอส (Bias) เพื่อทำการชดเชยค่าดังกล่าวให้กับตัวรับรู้
6. นำค่าที่ได้มาทำการปรับค่าสเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) เพื่อปรับค่าของช่วงข้อมูล
7. นำค่าที่ผ่านกระบวนการทั้งหมดดังที่กล่าวในข้างต้น มาชดเชยให้กับค่าสัญญาณการทดลองกลาง เพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาด (Error) เพื่อเปรียบเทียบค่าก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้สัญญาณ ว่าสามารถทำให้ค่าความผิดพลาดลดน้อยลงได้หรือไม่ และวิธีการใดให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

#### 4.3.1.2 การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแบบหมุนต่อเนื่อง

1. เปิดการทำงานตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น เพื่ออุ่นเครื่องตัวรับรู้ ก่อนที่จะทำการสอบเทียบเพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิและรักษาสภาพการทำงาน เป็นเวลา 30 วินาที
2. เก็บข้อมูลของตัวรับรู้ในตำแหน่งทิศทางต่างๆ แบบหมุนต่อเนื่อง โดยหมุนรอบแกนที่จะทำการเก็บข้อมูล โดยหมุนรอบแกนที่ความเร็ว S องศาต่อวินาที จนครบ 360 องศา โดยทำซ้ำวิธีการดังกล่าวจนครบทั้ง 3 แนวแกน (กำหนดให้ S เท่ากับ 0.5, 1, 5, 10 และ 30 องศาต่อวินาที ตามลำดับ) ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (Sampling time เท่ากับ 0.12 วินาที)
3. นำค่าดิบมาคำนวณผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low pass filter) เพื่อเป็นการลดทอนค่าสัญญาณรบกวน (Noise) ก่อนนำค่าดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการสอบเทียบขั้นต่อไป
4. นำค่าที่ได้จากการคำนวณข้างต้นมาหาคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonality) เพื่อทำการปรับแนวแกนทั้ง 3 ให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แล้วนำค่าที่ได้มา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง

คำนวณหาค่าการเยื้องแนวแกน (Misalignment) เพื่อปรับแนวแกนของตัวรับรู้ให้อยู่ในทิศทางเดียวกับเครื่องมือที่ใช้สอบเทียบ

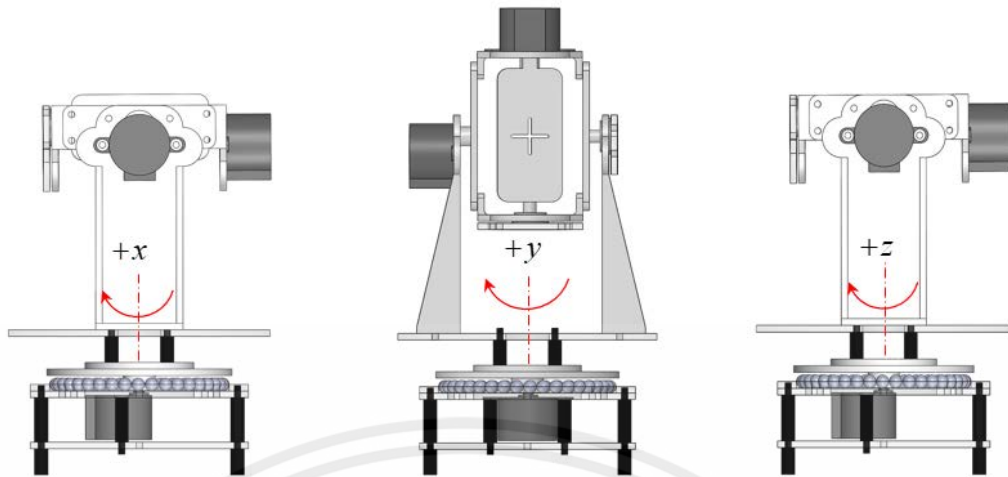
5. นำค่าที่ได้จากกระบวนการข้างต้นมาใช้คำนวณหาค่าไบแอส (Bias) เพื่อทำการชดเชยค่าดังกล่าวให้กับตัวรับรู้
6. นำค่าที่ได้มาทำการปรับค่าสเกลเฟกเตอร์ (Scale factor) เพื่อปรับค่าของช่วงข้อมูล
7. นำค่าที่ผ่านกระบวนการทั้งหมดดังที่กล่าวในข้างต้น มาชดเชยให้กับค่าสัญญาณการทดลองกลาง เพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาด (Error) เพื่อเปรียบเทียบค่าก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้สัญญาณ ว่าสามารถทำให้ค่าความผิดพลาดลดน้อยลงได้หรือไม่ และวิธีการใดให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

#### 4.3.2 ขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ในการสอบเทียบจะมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความละเอียด และประสิทธิภาพของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมนั้นๆ ในกรณีนี้การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจึงจำเป็นต้องมีการหมุนรอบแกนทั้งสามเพื่อทำการเก็บข้อมูล

ในการสอบเทียบจะทำการเก็บค่าข้อมูลจากการหมุนรอบแกนทั้งสาม โดยจะทำการหมุนรอบแกนทีละแกนเพื่อทำการเก็บข้อมูล ซึ่งการเก็บข้อมูลในแต่ละแกนควรที่จะใช้เวลาให้น้อยที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน (Angle random walk) ซึ่งข้อผิดพลาดที่เกิดจาก สัญญาณรบกวนนั้นขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบ ซึ่งในการเก็บข้อมูลรอบแกนในแต่ละแกนจะใช้เวลาไม่เกิน 20 วินาที ซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม (Stochastic errors) ไม่จำเป็นต้องถูกนำมาคิด

ก่อนที่จะทำการสอบเทียบ จะต้องทำการกำหนดแนวแกนเฉพาะของ IMU ด้วยแกนหมุนของเครื่องสอบเทียบ โดยทำให้ค่ามีความถูกต้อง  $\pm 1$  องศา ซึ่งค่าดังกล่าวอาจจะส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดต่ออัตราเชิงมุมอยู่ที่ประมาณ 0.02 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะถือว่าความผิดพลาดดังกล่าวไม่มีความสำคัญในการเก็บข้อมูล ซึ่งถ้าหากไม่มีการกำหนดแนวแกนการหมุน อาจทำให้เกิดความผิดพลาดของมุมในการหมุนที่ได้ทำการกำหนดไว้ ซึ่งขั้นตอนการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะถูกกล่าวดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.14 ลักษณะการเก็บค่าตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมโดยการหมุนรอบแกนทั้ง 3 แนวแกน

#### 4.3.2.1 การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

1. เปิดการทำงานตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น เพื่ออุ่นเครื่องตัวรับรู้ ก่อนที่จะทำการสอบเทียบเพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิและรักษาสภาพการทำงาน เป็นเวลา 30 วินาที
2. เก็บข้อมูลของตัวรับรู้โดยการกำหนดแนวแกนของตัวรับรู้กับเครื่องสอบเทียบให้อยู่ในแนวแกนเดียวกัน จากนั้นหมุนแกนที่กำหนดด้วยความเร็ว  $S$  องศาต่อวินาที จนครบ 360 องศา ทำซ้ำจนครบทั้ง 3 แนวแกน (กำหนดให้  $S$  เท่ากับ 20, 60, 80, 100 และ 200 องศาต่อวินาที ตามลำดับ) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (Sampling time เท่ากับ 0.12 วินาที)
3. นำค่าดิบมาคำนวณผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low pass filter) เพื่อเป็นการลดทอนค่าสัญญาณรบกวน (Noise) ก่อนนำค่าดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการสอบเทียบขั้นต่อไป
4. นำค่าที่ได้จากกระบวนการข้างต้นขณะหยุดนิ่ง มาใช้คำนวณหาค่าไบแอส (Bias) เพื่อทำการชดเชยค่าดังกล่าวให้กับตัวรับรู้
5. นำค่าขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่กำหนดหลังจากชดเชยค่าไบแอสแล้ว มาคำนวณหาคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (Orthogonality) เพื่อทำการปรับแนวแกนทั้ง 3 ให้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าการเอียงแนวแกน (Misalignment) เพื่อปรับแนวแกนของตัวรับรู้ ให้อยู่ในทิศทางเดียวกับเครื่องมือที่ใช้สอบเทียบ
6. นำค่าที่ได้มาทำการปรับค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale factor) เพื่อปรับค่าของช่วงข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำใบเซ

7. นำค่าที่ผ่านกระบวนการทั้งหมดดังที่กล่าวในข้างต้น มาชดเชยให้กับค่าสัญญาณการทดลองกลาง เพื่อคำนวณหาค่าความผิดพลาด (Error) เพื่อเปรียบเทียบค่าก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้สัญญาณ ว่าสามารถทำให้ค่าความผิดพลาดลดน้อยลงได้หรือไม่ และวิธีการใดให้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด

#### 4.4 สรุปวิธีดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการแบ่งการสอบเทียบออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจะใช้เครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงเป็นหลักในการทดลองทั้งหมด ซึ่งค่าจากเครื่องดังกล่าวจะถูกนำไปคำนวณกับอัลกอริทึมที่ถูกสร้างขึ้น เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดกับอัลกอริทึมที่ถูกสร้างขึ้น ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ค่าผลกระทบ หรือค่าความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิจะไม่ถูกนำมาคิด แต่ในการทดลองจะถูกควบคุมปัจจัยเรื่องของอุณหภูมิ ซึ่งพื้นที่ในการทดลองจะถูกควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง

จากการศึกษา [10, 12, 13, 14, 15] การเก็บข้อมูลก่อนที่นำไปสอบเทียบ มีแนวทางเก็บข้อมูลที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งถูกกล่าวไว้ว่าตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจะให้ค่าที่แม่นยำเมื่ออยู่ในสภาวะคงที่ เนื่องโครงสร้างทางกายภาพของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจากอดีตที่มีลักษณะการทำงานคล้ายก้อนมวลติดไว้กับสปริง เมื่อหยุดนิ่งจึงสามารถให้ค่าที่แม่นยำได้ จึงเป็นที่มาของการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 กรณี คือ การหมุนหยุด และการหมุนต่อเนื่อง เพื่อตอบคำถามที่เกิดขึ้นดังกล่าวว่าปัจจุบัน เทคโนโลยีของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นเปลี่ยนไปหรือไม่ แล้ววิธีการเก็บข้อมูลที่สภาวะหยุดนิ่งยังดีที่สุดสำหรับตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น พร้อมทั้งผลการทดลองจะทำให้ทราบว่าอัลกอริทึมที่ถูกออกแบบมาให้ทำงานร่วมกับรอบของเครื่องสอบเทียบเหมาะสมกับวิธีการใดมากที่สุด และในส่วนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจากการศึกษา [12, 13, 14, 15] การเก็บข้อมูลถูกกล่าวไว้ว่ายิ่งใช้เวลาในการเก็บข้อมูลมากเท่าไร ยิ่งทำให้ค่าที่ได้แม่นยำมากขึ้นเท่านั้น จากค่ากล่าวข้างต้น จึงทำให้การเก็บข้อมูลของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมถูกแบ่งออกเป็นหลายช่วงความเร็ว เพื่อตอบคำถามของค่ากล่าวข้างต้น

การทดลองนี้การติดตั้งตัวรับรู้เข้ากับเครื่องสอบเทียบก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่สำคัญ หน้าแปลนในการติดตั้งจึงถูกออกแบบมาให้อยู่บริเวณกลางเครื่องสอบเทียบมากที่สุด และมีการวางแนวแกนของตัวรับรู้ให้อยู่ในแนวแกนเดียวกับเครื่องสอบเทียบมากที่สุด โดยหน้าแปลนดังกล่าวถูกออกแบบมาอย่างระมัดระวัง เพื่อลดปัจจัยที่จะทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าข้อมูลที่ได้จะมาจากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง ซึ่งสามารถให้ข้อมูล และตำแหน่งในการเคลื่อนที่ๆ แม่นยำ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ แล้วสรุปผลในวิทยานิพนธ์นี้เป็นหลัก

โดยจะมีค่าจากการเก็บข้อมูลจากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเองเป็นเพียงการเสนอแนะแนวทางที่น่าสนใจเท่านั้น โดยเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเองจะเก็บค่าข้อมูลของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นด้วยวิธีหมุนหยุด โดยจะหมุน 1 องศา และหยุด 1 วินาที เท่านั้น และในส่วนของ การเก็บ

ข้อมูลตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะให้ความเร็วที่ 60 องศาต่อวินาที เท่านั้น เนื่องด้วยปัจจัยทางด้านกายภาพของเครื่อง และขีดจำกัดของมอเตอร์ที่ถูกติดตั้ง ทำให้วิธีการดังกล่าวยังคงเป็นเพียงวิธีการแนะนำเท่านั้น ซึ่งเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่น่าสนใจในการนำไปพัฒนาต่อยอดให้เครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเองมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นจนสามารถใช้งานได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในการศึกษาวิธีการสอบเทียบในเบื้องต้น สำหรับผู้ที่ให้ความสนใจเนื่องจากมีราคาที่ไม่สูง อีกทั้งยังสามารถสร้างตัวเองได้

ซึ่งการเก็บข้อมูลของตัวรับรู้ในวิธีการต่างๆ เสร็จสิ้นแล้วนั้น ค่าต่างๆ ที่ได้จากตัวรับรู้ทั้ง 3 ตัว จะถูกนำมาเปรียบเทียบ เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัลกอริทึมที่ถูกออกแบบมา อีกทั้งยังเป็นอีกหนึ่งแนวทางในการตอบคำถามของสมมติฐานที่ถูกใช้อ้างอิงในการเก็บข้อมูลของตัวรับรู้ ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

บทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการนำค่าของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ที่ถูกเก็บค่าในลักษณะท่าทางต่างๆ แบบออฟไลน์ แล้วนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณผ่านอัลกอริทึมที่ใช้สำหรับการสอบเทียบ เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของตัวรับรู้ทั้ง 2 โดยใช้การคำนวณผ่านโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งการคำนวณแบบออฟไลน์จะทำให้สามารถศึกษาค่าที่เปลี่ยนแปลงไปได้อย่างชัดเจน เมื่อผ่านกระบวนการหรือขั้นตอนต่างๆ ที่ถูกคำนวณภายในอัลกอริทึมที่ถูกออกแบบมา

โดยผลการทดลองจะประกอบไปด้วย IMU รุ่น MPU6050 2 ตัว และ รุ่น STIM300 1 ตัว ซึ่งภายในของตัวรับรู้ทั้ง 3 จะประกอบไปด้วย ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น 3 แกน และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม 3 แกน ซึ่งตัวรับรู้รุ่น MPU6050 จะเป็นตัวรับรู้ชนิดต้นทุนต่ำ ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีน้ำหนักเบา และราคาถูก ดังนั้นตัวรับรู้นี้จึงถูกนำมาใช้ในการทดสอบอัลกอริทึม เพื่อลดค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ และในส่วนของตัวรับรู้รุ่น STIM300 เป็นตัวรับรู้ที่มีราคาสูง ซึ่งใช้ในระบบนำทาง ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบเพื่อทดสอบอัลกอริทึมอีกครั้งว่าสามารถสอบเทียบตัวรับรู้ที่มีประสิทธิภาพสูงอยู่แล้วให้มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นได้หรือไม่ โดยตัวรับรู้ทั้งหมดที่นำมาทดสอบจะถูกเก็บค่าในลักษณะท่าทางต่างๆ ในลักษณะเดียวกัน

ซึ่งตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น จะถูกเก็บค่าโดยการหมุนรอบแนวแกนทั้ง 3 แบบหมุนหยุด และแบบหมุนต่อเนื่อง และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม จะถูกเก็บค่าโดยการหมุนรอบแนวแกนที่ความเร็ว 20, 60, 80, 100 และ 200 องศาต่อวินาที โดยค่าที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบ เพื่อลดค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ทั้ง 3 และจะถูกยืนยันอีกครั้งโดยการจำลองการใช้งานจริง และวัดผลก่อน และหลังการสอบเทียบ โดยจะถูกแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

#### 5.1 ค่าพารามิเตอร์จากการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

หลังการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ของ สเกลเฟกเตอร์ การเยื้องแนวแกน คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก และค่าไบแอส โดยในการเก็บค่าแต่ละลักษณะจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้ดังกล่าวจะถูกนำไปปรับปรุงสัญญาณการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นที่มีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกัน ซึ่งจะทำให้เห็นถึงข้อแตกต่างว่าวิธีการใดเหมาะสมที่จะใช้ในการสอบเทียบมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.1 พารามิเตอร์ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ด้วยวิธีการหมุนหยุด

Model	Stop (s)	Orthogonal ( $O_x, O_y, O_z$ )	Misalignment ( $M_x, M_y, M_z$ )	Bias (g) ( $b_x, b_y, b_z$ )	Scale factor ( $S_x, S_y, S_z$ )
MPU6050 (1)	1	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.994 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.049 \\ -0.013 \\ -0.127 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.994 \\ 0.945 \end{bmatrix}$
	5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.996 \\ 0.997 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.048 \\ -0.013 \\ -0.129 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.999 \\ 0.962 \end{bmatrix}$
	10	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.994 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.048 \\ -0.013 \\ -0.132 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.001 \\ 0.998 \\ 0.975 \end{bmatrix}$

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง

Model	Speed (deg/s)	Orthogonal ( $O_x, O_y, O_z$ )	Misalignment ( $M_x, M_y, M_z$ )	Bias (g) ( $b_x, b_y, b_z$ )	Scale factor ( $S_x, S_y, S_z$ )
MPU6050 (1)	0.5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.049 \\ -0.013 \\ -0.130 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.002 \\ 0.994 \\ 0.980 \end{bmatrix}$
	1	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.999 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.049 \\ -0.013 \\ -0.127 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.001 \\ 0.994 \\ 0.974 \end{bmatrix}$
	5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.995 \\ 0.994 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.049 \\ -0.013 \\ -0.128 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.996 \\ 1.000 \\ 0.982 \end{bmatrix}$
	10	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.049 \\ -0.014 \\ -0.127 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.001 \\ 1.000 \\ 0.981 \end{bmatrix}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและต้องขออภัยถึงเจ้าของเอกสารนี้ไว้ก่อน

Model	Speed (deg/s)	Orthogonal $(O_x, O_y, O_z)$	Misalignment $(M_x, M_y, M_z)$	Bias (g) $(b_x, b_y, b_z)$	Scale factor $(S_x, S_y, S_z)$
MPU6050 (1)	30	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.992 \\ 0.990 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.049 \\ -0.013 \\ -0.130 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.994 \\ 1.014 \\ 0.952 \end{bmatrix}$

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) ด้วยวิธีการหมุนหยุด

Model	Stop (s)	Orthogonal $(O_x, O_y, O_z)$	Misalignment $(M_x, M_y, M_z)$	Bias (g) $(b_x, b_y, b_z)$	Scale factor $(S_x, S_y, S_z)$
MPU6050 (2)	1	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.998 \\ 0.983 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.016 \\ 0.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.992 \\ 1.000 \\ 0.970 \end{bmatrix}$
	5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.017 \\ -0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.996 \\ 1.001 \\ 0.964 \end{bmatrix}$
	10	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.017 \\ -0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.989 \\ 0.997 \\ 0.981 \end{bmatrix}$

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง

Model	Speed (deg/s)	Orthogonal $(O_x, O_y, O_z)$	Misalignment $(M_x, M_y, M_z)$	Bias (g) $(b_x, b_y, b_z)$	Scale factor $(S_x, S_y, S_z)$
MPU6050 (2)	0.5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.017 \\ -0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.990 \\ 0.993 \\ 0.981 \end{bmatrix}$
	1	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.040 \\ -0.017 \\ -0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.991 \\ 0.996 \\ 0.981 \end{bmatrix}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model	Speed (deg/s)	Orthogonal $(O_x, O_y, O_z)$	Misalignment $(M_x, M_y, M_z)$	Bias (g) $(b_x, b_y, b_z)$	Scale factor $(S_x, S_y, S_z)$
MPU6050 (2)	5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.017 \\ -0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.992 \\ 0.994 \\ 0.983 \end{bmatrix}$
	10	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.040 \\ -0.017 \\ -0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.988 \\ 0.994 \\ 0.986 \end{bmatrix}$
	30	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.990 \\ 0.996 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.017 \\ -0.001 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.984 \\ 1.000 \\ 0.972 \end{bmatrix}$

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 ด้วยวิธีการหมุนหยุด

Model	Stop (s)	Orthogonal $(O_x, O_y, O_z)$	Misalignment $(M_x, M_y, M_z)$	Bias (g) $(b_x, b_y, b_z)$	Scale factor $(S_x, S_y, S_z)$
STIM300	1	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.998 \\ 0.977 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.007 \\ -0.044 \\ -0.009 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.001 \\ 1.017 \\ 0.986 \end{bmatrix}$
	5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.999 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.008 \\ -0.043 \\ -0.009 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.005 \\ 0.995 \end{bmatrix}$
	10	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.999 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.008 \\ -0.044 \\ -0.009 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.999 \\ 1.001 \end{bmatrix}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง

Model	Speed (deg/s)	Orthogonal ( $O_x, O_y, O_z$ )	Misalignment ( $M_x, M_y, M_z$ )	Bias (g) ( $b_x, b_y, b_z$ )	Scale factor ( $S_x, S_y, S_z$ )
STIM300	0.5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.999 \\ 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.009 \\ -0.048 \\ -0.010 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.995 \\ 1.004 \\ 1.003 \end{bmatrix}$
	1	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.997 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.010 \\ -0.047 \\ -0.008 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.995 \\ 1.003 \\ 1.004 \end{bmatrix}$
	5	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.997 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.010 \\ -0.049 \\ -0.009 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.991 \\ 0.997 \\ 1.005 \end{bmatrix}$
	10	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.010 \\ -0.048 \\ -0.007 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.995 \\ 0.998 \\ 0.999 \end{bmatrix}$
	30	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.998 \\ 0.996 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.009 \\ -0.044 \\ -0.008 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.999 \\ 0.998 \end{bmatrix}$

จากตารางการทดลองต่างๆ ข้างต้น เป็นการทดสอบกับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงกับตัวรับรู้ทั้ง 3 ตัว คือรุ่น MPU6050 2 ตัว และรุ่น STIM300 1 ตัว ซึ่งถูกทดสอบด้วยวิธีการหมุนหยุด และวิธีการหมุนต่อเนื่อง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะถูกนำไปชดเชยให้กับตัวรับรู้ในการจำลองการใช้งาน เพื่อหาข้อสรุปสำหรับวิธีการที่เหมาะสมมากที่สุด โดยการทดสอบตัวรับรู้กับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงจะถูกนำไปใช้ในการสรุปผลการทดลอง เพื่อยืนยันการลดข้อผิดพลาดของวิทยานิพนธ์นี้

### 5.1.2 พารามิเตอร์ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.7 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ; M2 วิธีการหมุนหยุด

Model	Stop (s)	Orthogonal ( $O_x, O_y, O_z$ )	Misalignment ( $M_x, M_y, M_z$ )	Bias (g) ( $b_x, b_y, b_z$ )	Scale factor ( $S_x, S_y, S_z$ )
MPU6050 (1) ; M2	1	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.988 \\ 0.962 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.997 \\ 0.997 \\ 0.997 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.046 \\ -0.140 \\ -0.124 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.949 \\ 0.991 \\ 0.982 \end{bmatrix}$

จากตารางการทดลองข้างต้น เป็นการทดสอบกับเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเองกับตัวรับรู้ 1 ตัว คือรุ่น MPU6050 (1) ซึ่งถูกทดสอบด้วยวิธีการหมุนหยุดเพียงวิธีการเดียวเท่านั้น เนื่องด้วยข้อจำกัดของตัวเครื่องรวมทั้งมอเตอร์ที่ใช้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกนำไปชดเชยให้กับตัวรับรู้ในการจำลองการใช้งาน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเอง ซึ่งการใช้เครื่องสอบเทียบดังกล่าว เป็นเพียงอีกแนวทางหนึ่งที่ถูกเสนอแนะขึ้นเท่านั้น ซึ่งจะไม่ถูกใช้ในการยืนยันการลดข้อผิดพลาดของตัวรับรู้ในวิทยานิพนธ์นี้

## 5.2 ผลการปรับแก้สัญญาณตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นด้วยค่าพารามิเตอร์

ผลการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น ซึ่งจะถูกลำถึงโดยค่าความผิดพลาดจะถูกคำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่าของผลรวมค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น โดยจะทำการชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้กับค่าสัญญาณการทดลองกลาง (การเก็บค่าสัญญาณขณะเคลื่อนที่แบบสุ่ม ณ ช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อเป็นการจำลองการทำงานเสมือนจริง) เพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดหลังการปรับแก้สัญญาณ โดยจะสามารถเขียนได้ว่า

$$Error = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} - G \quad (5.1)$$

เมื่อกำหนดให้  $G$  คือขนาดความเร่งของแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 1 g ซึ่งค่าผลรวมของค่าความผิดพลาดจะสามารถเขียนได้ว่า

$$SUM\ errors = \sum_{i=1}^n \left| \sqrt{a_{i,x}^2 + a_{i,y}^2 + a_{i,z}^2} - G \right| \quad (5.2)$$

จากการทดลองต่างๆ ข้างต้นของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นทั้ง 3 ตัว จะสามารถสรุปผลออกมาได้  
 ไม่ว่าจะกรณีใด ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

### 5.2.1 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นที่ได้จากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง

ตารางที่ 5.8 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ด้วยวิธีการหมุนหยุด

Model	Stop (s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU 6050 (1)	1	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.006	91.285
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	61.656	91.285
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.033	81.691
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.032	77.476
	5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.007	89.694
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	72.909	89.694
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.025	86.371
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.043	69.279
	10	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.005	92.262
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	54.742	92.262
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.037	79.565
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.029	79.047

ตารางที่ 5.9 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง

Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU 6050 (1)	0.5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.005	92.117
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	55.764	92.117
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.033	77.989
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.032	79.990
	1	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.006	91.695
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	58.751	91.695
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.031	82.951
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.036	74.434
	5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.006	91.604
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	59.399	91.604
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.034	80.901
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.033	76.445

Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU 6050 (1)	10	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.006	91.178
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	62.407	91.178
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.036	79.871
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.033	76.565
	30	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.008	87.784
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	86.423	87.784
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.027	85.059
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.042	70.224

ตารางที่ 5.10 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) ด้วยวิธีการหมุนหยุด

Model	Stop (s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU 6050 (2)	1	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.005	80.613
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	237.901	46.122	80.613
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.060	0.020	66.443
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.045	-0.020	56.775
	5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.005	77.601
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	237.901	53.288	77.601
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.060	0.013	77.664
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.045	-0.032	28.524
	10	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.003	86.509
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	237.901	32.095	86.509
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.060	0.017	71.368
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.045	-0.020	55.609

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.11 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง

Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU 6050 (2)	0.5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.004	82.210
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	237.901	42.322	82.210
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.060	0.013	78.021
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.045	-0.024	47.897
	1	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.003	85.599
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	237.901	34.259	85.599
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.060	0.015	75.144
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.045	-0.023	49.137
	5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.004	83.124
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	237.901	40.148	83.124
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.060	0.015	75.621
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.045	-0.025	45.624
	10	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.003	85.164
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	237.901	35.296	85.164
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.060	0.016	73.185
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.045	-0.021	52.843
	30	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.004	83.843
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	237.901	38.437	83.843
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.060	0.016	73.749
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.045	-0.022	50.786

ตารางที่ 5.12 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 ด้วยวิธีการหมุนหยุด

Model	Stop (s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
STIM 300	1	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.006	70.526
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	217.896	64.223	70.526
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.059	0.025	58.679
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.063	-0.030	52.862

Model	Stop (s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
STIM 300	5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.005	76.950
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	217.896	50.224	76.950
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.059	0.018	69.283
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.063	-0.025	60.236
	10	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.005	78.724
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	217.896	46.359	78.724
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.059	0.021	64.964
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.063	-0.026	59.409

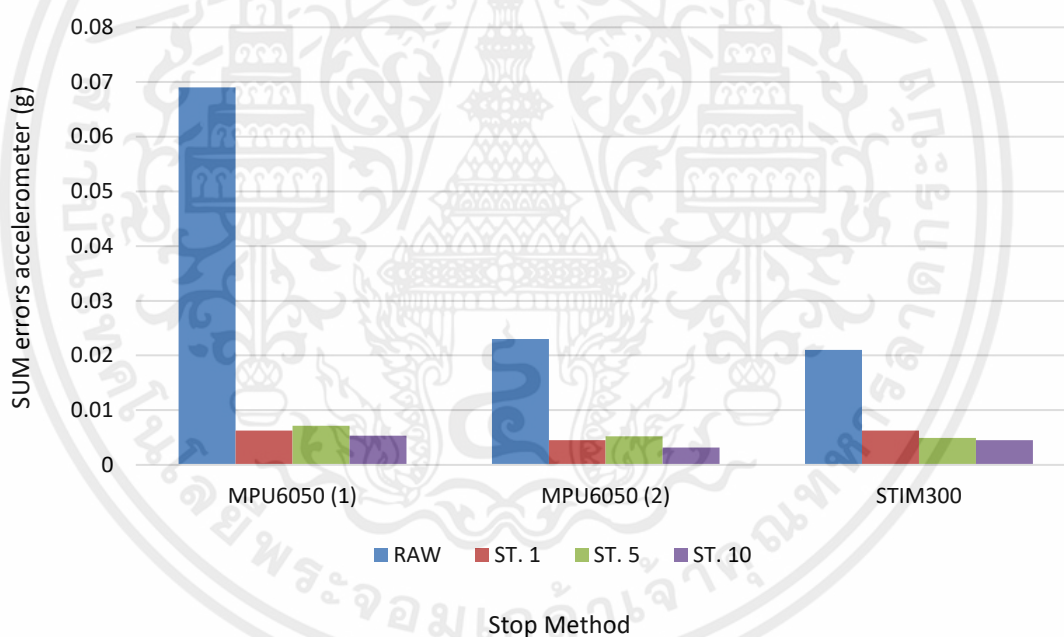
ตารางที่ 5.13 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 ด้วยวิธีการหมุนต่อเนื่อง

Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
STIM 300	0.5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.005	77.271
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	217.896	49.525	77.271
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.059	0.023	61.731
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.063	-0.027	57.061
	1	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.005	78.078
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	217.896	47.768	78.078
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.059	0.023	61.944
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.063	-0.026	58.373
	5	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.005	74.524
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	217.896	55.511	74.524
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.059	0.022	63.386
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.063	-0.029	53.683
	10	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.006	73.609
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	217.896	57.505	73.603
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.059	0.019	67.680
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.063	-0.031	50.226

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกนอกระบบโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

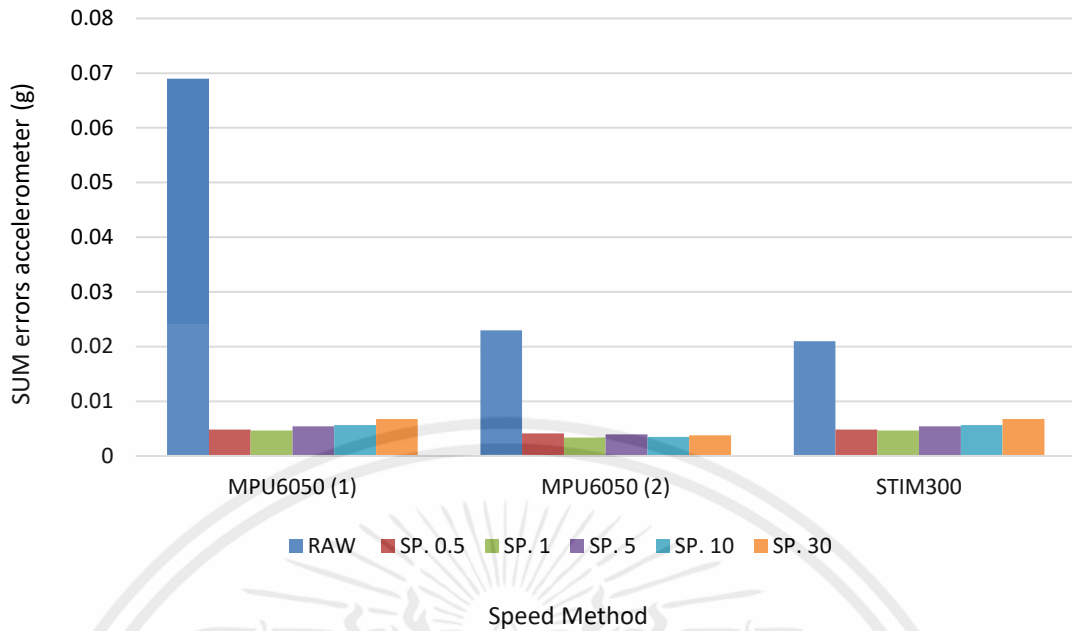
Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
STIM 300	30	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.007	68.250
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	217.896	69.181	68.250
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.059	0.021	64.457
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.063	-0.035	44.671

จากตารางผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าการทดลองด้วยวิธีการหมุน 1 องศาหยุดนิ่ง 10 วินาที สามารถลดค่าความผิดพลาดได้มากที่สุด ซึ่งจากค่าของตัวรับรู้ทั้ง 3 ตัว ให้ผลออกมาในแนวทางเดียวกัน ดังนั้นจึงเลือกกราฟการเปลี่ยนแปลงของวิธีการดังกล่าวมาแสดง ซึ่งค่าการเคลื่อนที่ก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้ รวมทั้งค่าความผิดพลาดก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้ จะสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปต่อไปนี้

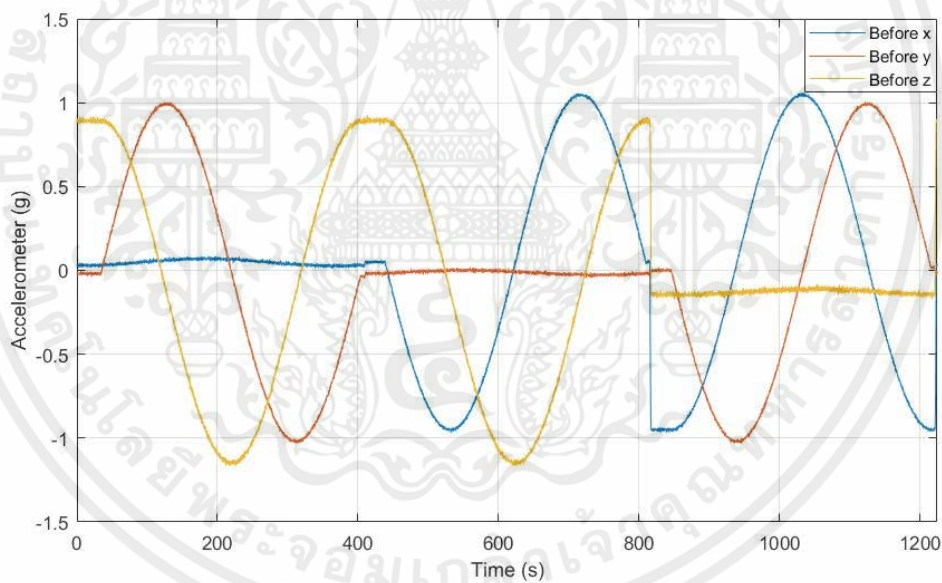


รูปที่ 5.1 ค่าความผิดพลาดหลังการปรับแก้สัญญาณด้วยค่าชดเชยที่ได้จากวิธีการหมุนหยุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

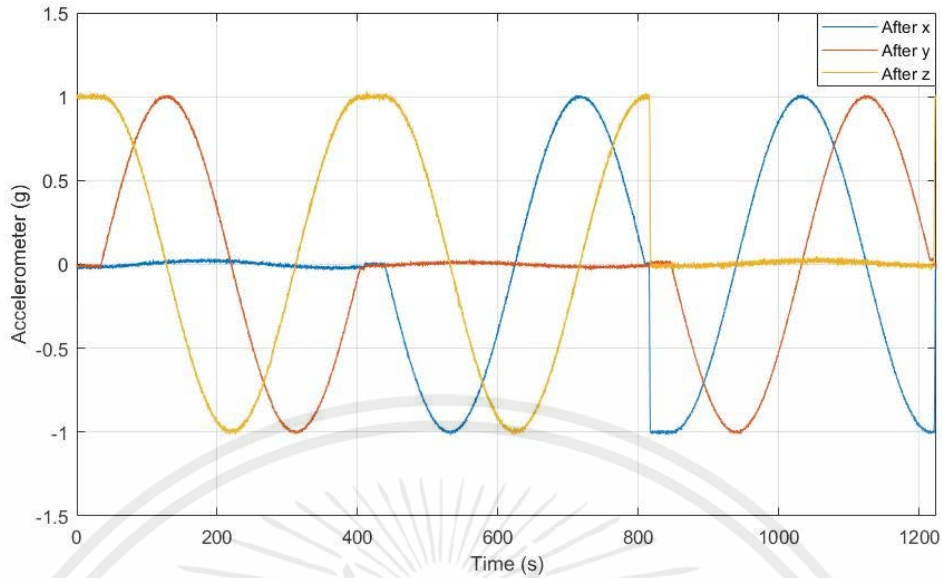


รูปที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดหลังการปรับแก้สัญญาณด้วยค่าชดเชยที่ได้จากวิธีการหมุนต่อเนื่อง

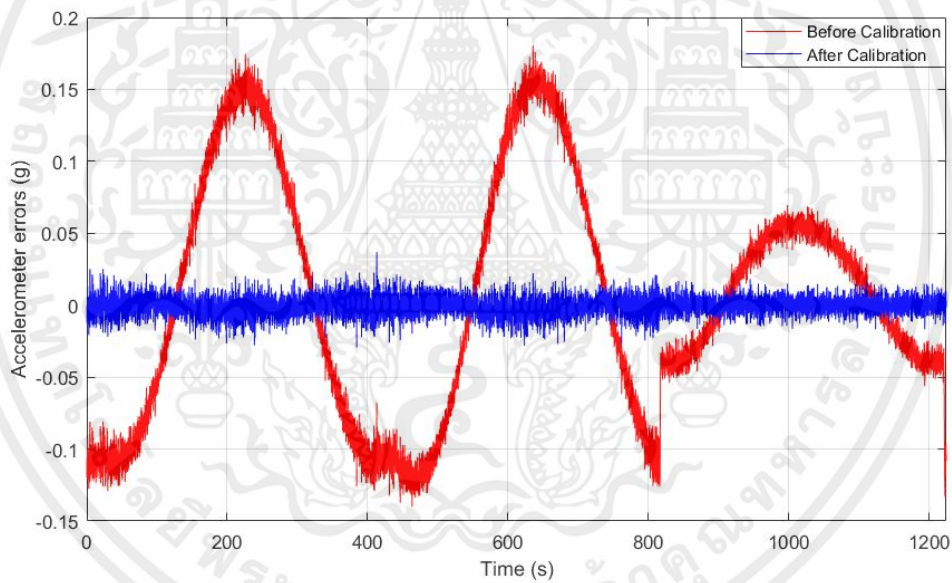


รูปที่ 5.3 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ก่อนการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

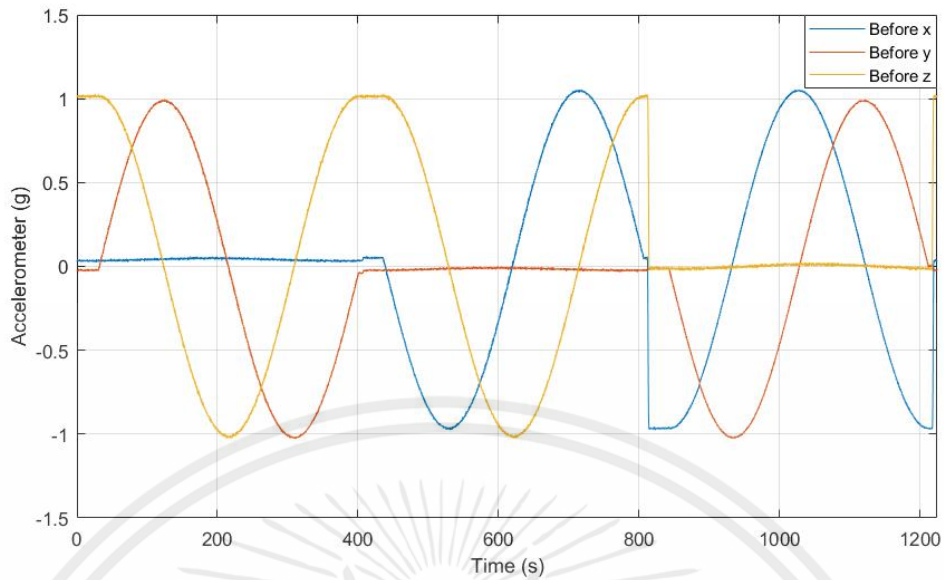


รูปที่ 5.4 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) หลังการปรับแก้

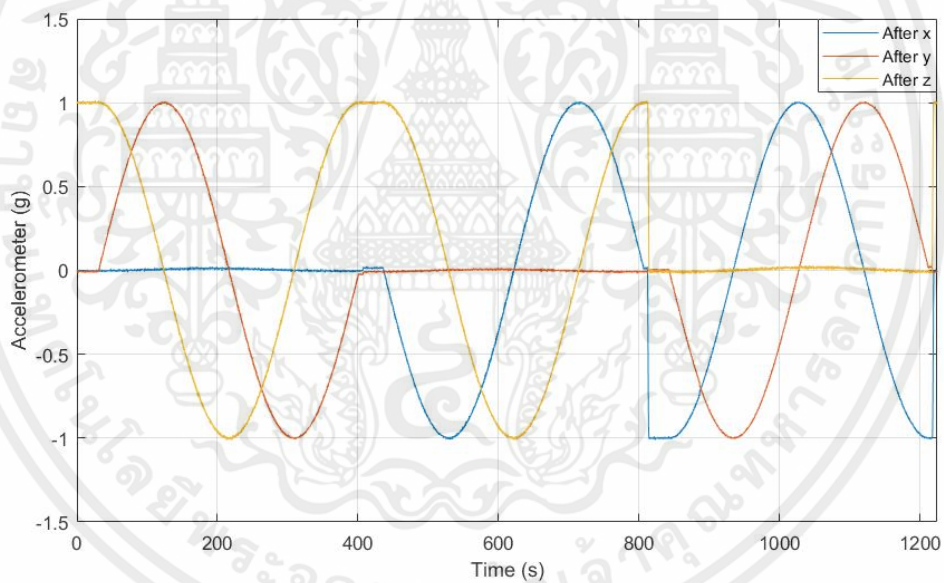


รูปที่ 5.5 ค่าความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ก่อนและหลังการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

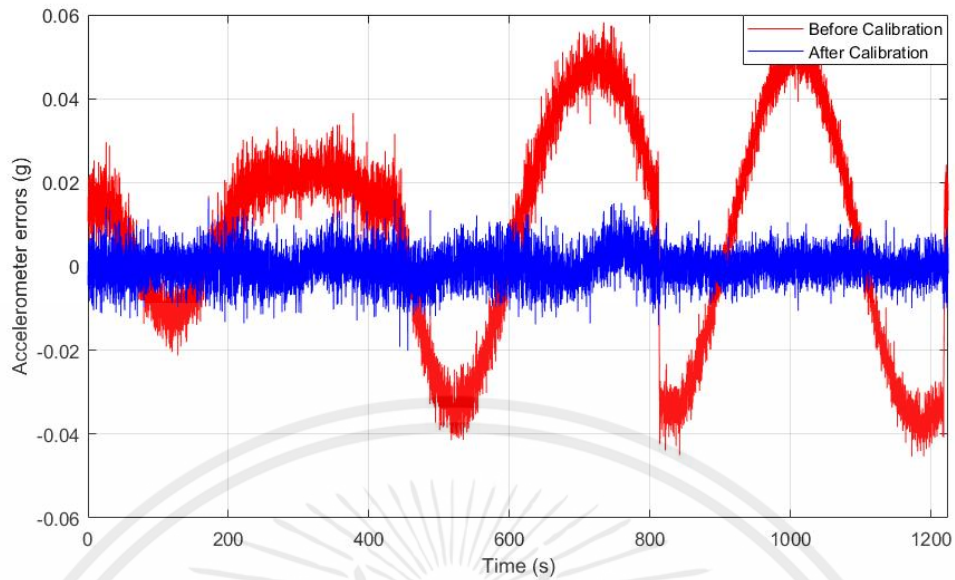


รูปที่ 5.6 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) ก่อนการปรับแก้

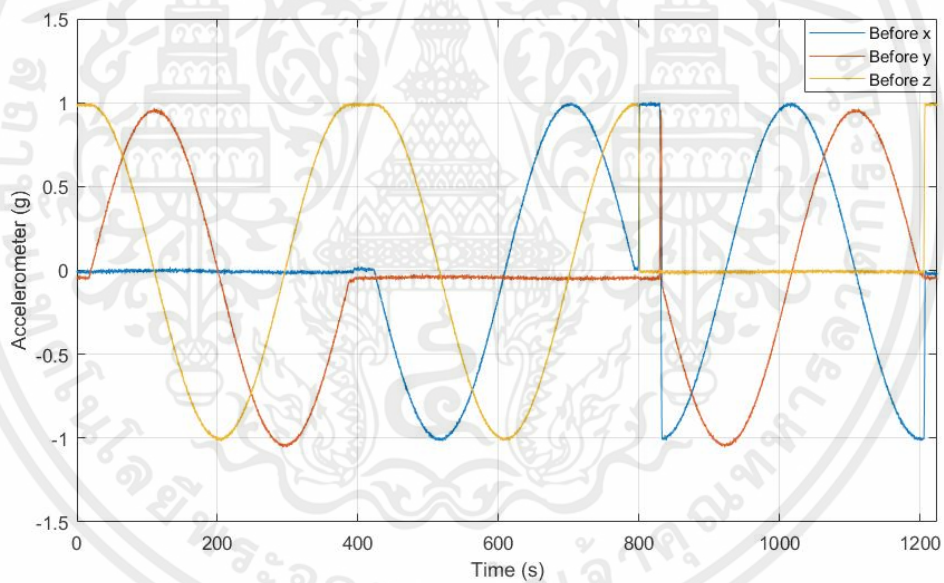


รูปที่ 5.7 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) หลังการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

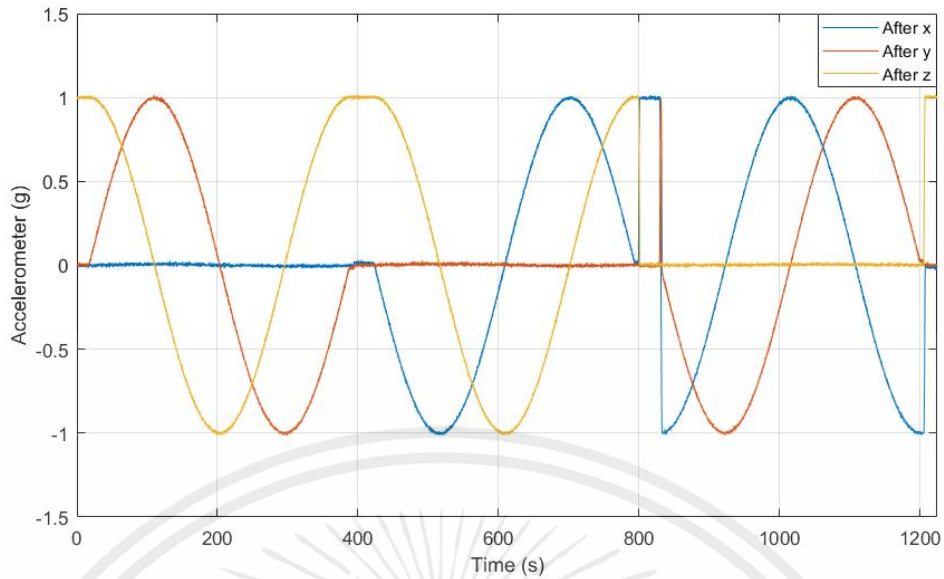


รูปที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (2) ก่อนและหลังการปรับแก้

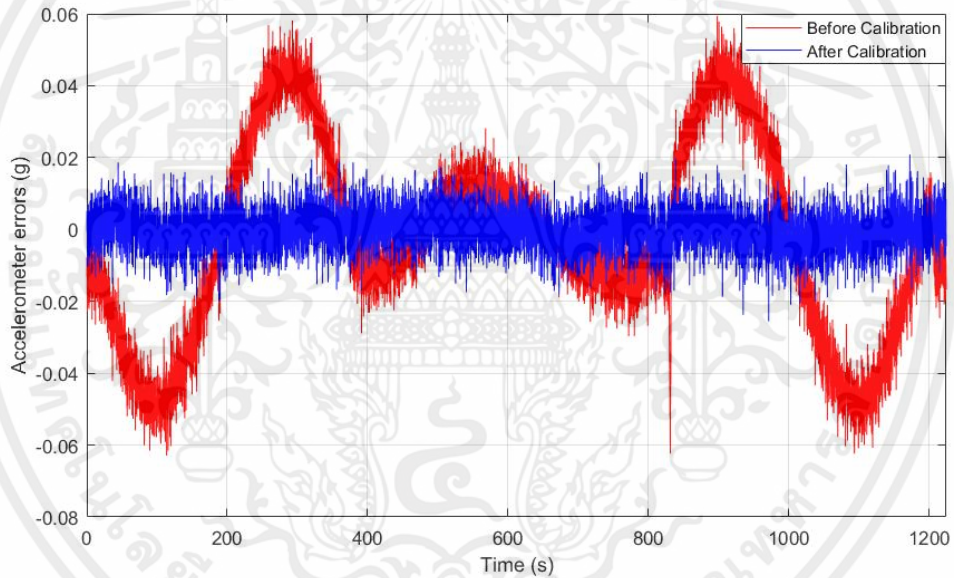


รูปที่ 5.9 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 ก่อนการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 หลังการปรับแก้



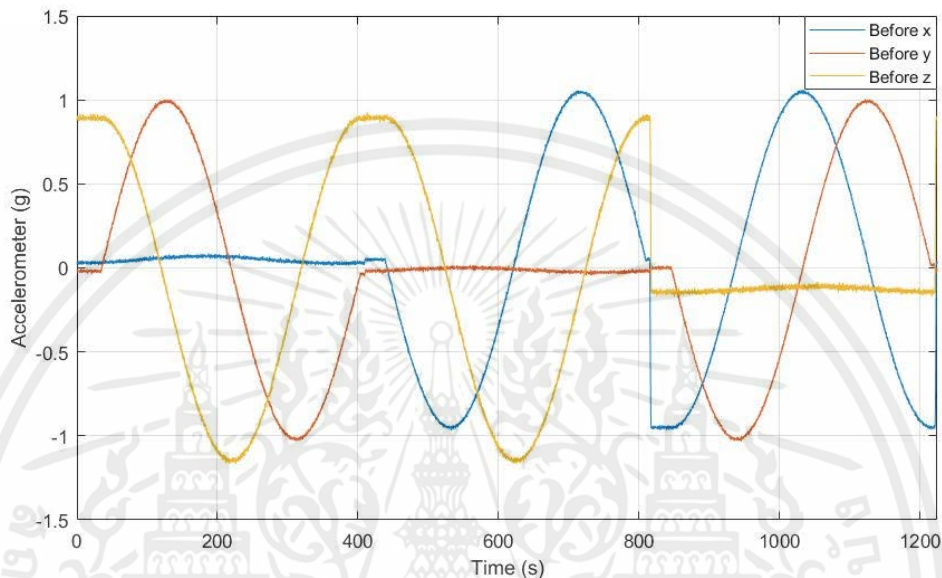
รูปที่ 5.11 ค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น STIM300 ก่อนและหลังการปรับแก้

## 5.2.2 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นที่ได้จากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเอง

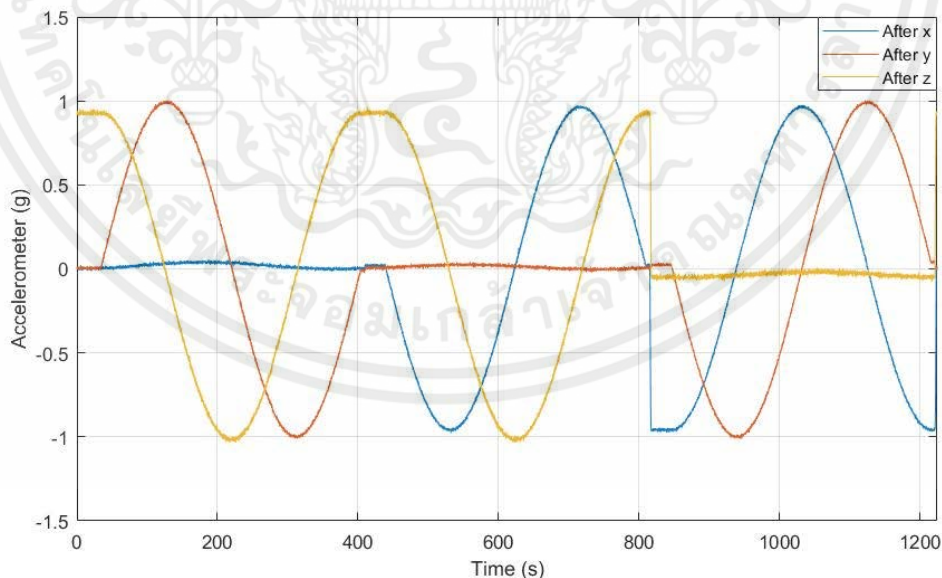
ตารางที่ 5.14 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 (1) ; M2 วิธีการหมุนหยุด

Model	Stop (s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU6050 (1)	1	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.032	53.920
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	707.434	325.985	53.920
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.180	0.044	75.840
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.140	-0.097	30.827

จากตารางผลการทดลองข้างต้น การทดสอบด้วยเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเอง สามารถลดค่าความผิดพลาดได้เพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง อีกทั้งตัวเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเองยังมีข้อจำกัดต่างๆ ทำให้สามารถทดสอบได้เพียงวิธีการเดียว ซึ่งค่าการเคลื่อนที่ก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้ รวมทั้งค่าความผิดพลาดก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้ จะสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปต่อไปนี้

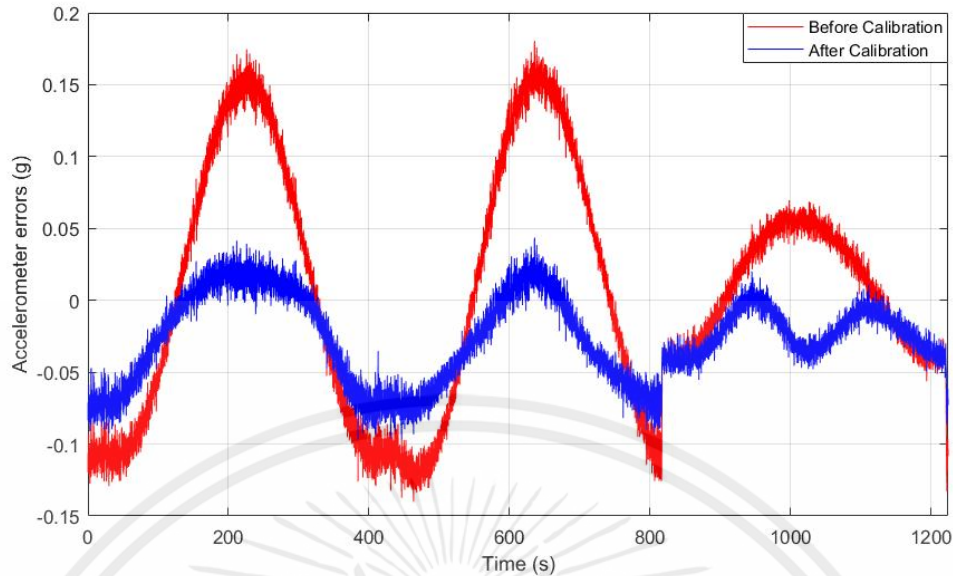


รูปที่ 5.12 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 M2 ก่อนการปรับแก้



รูปที่ 5.13 ค่าการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 M2 หลังการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 ค่าความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น MPU6050 M2 ก่อนและหลังการปรับแก้

### 5.3 ค่าพารามิเตอร์จากการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

หลังการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะได้ค่าพารามิเตอร์ของ สเกลเฟกเตอร์ การเยื้องแนวแกน คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก และค่าไบแอส โดยในการเก็บค่าแต่ละความเร็วรอบจะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้ดังกล่าวจะถูกนำไปปรับปรุงสัญญาณการเคลื่อนที่ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมที่มีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกัน ซึ่งจะทำให้เห็นถึงข้อแตกต่างว่าความเร็วรอบใดเหมาะสมที่จะใช้ในการสอบเทียบมากที่สุด

#### 5.3.1 พารามิเตอร์ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง

ตารางที่ 5.15 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (1)

Model	Speed (deg/s)	Bias (deg/s) ( $b_x, b_y, b_z$ )	Orthogonal & Misalignment ( $M_i$ )	Scale ( $S_x, S_y, S_z$ )
MPU6050 (1)	20	$\begin{bmatrix} -3.837 \\ 0.003 \\ 0.255 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.017 & 0.016 & -0.019 \\ -0.013 & 1.001 & -0.005 \\ 0.014 & 0.005 & 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	60	$\begin{bmatrix} -3.837 \\ 0.003 \\ 0.255 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.017 & 0.016 & -0.019 \\ -0.014 & 1.001 & -0.005 \\ 0.014 & 0.005 & 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อประโยชน์อื่นใดได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Model	Speed (deg/s)	Bias (deg/s) $(b_x, b_y, b_z)$	Orthogonal & Misalignment $(M_i)$	Scale $(S_x, S_y, S_z)$
MPU6050 (1)	80	$\begin{bmatrix} -3.837 \\ 0.003 \\ 0.255 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.018 & 0.016 & -0.019 \\ -0.013 & 1.001 & -0.005 \\ 0.013 & 0.005 & 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	100	$\begin{bmatrix} -3.837 \\ 0.003 \\ 0.255 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.017 & 0.016 & -0.019 \\ -0.014 & 1.000 & -0.004 \\ 0.014 & 0.005 & 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	200	$\begin{bmatrix} -3.837 \\ 0.003 \\ 0.255 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.018 & 0.016 & -0.019 \\ -0.013 & 1.000 & -0.005 \\ 0.014 & 0.005 & 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$

ตารางที่ 5.16 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (2)

Model	Speed (deg/s)	Bias (deg/s) $(b_x, b_y, b_z)$	Orthogonal & Misalignment $(M_i)$	Scale $(S_x, S_y, S_z)$
MPU6050 (2)	20	$\begin{bmatrix} -1.292 \\ -1.973 \\ -0.348 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.997 & 0.004 & 0.002 \\ -0.005 & 0.994 & -0.009 \\ 0.024 & 0.003 & 1.007 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	60	$\begin{bmatrix} -1.292 \\ -1.973 \\ -0.348 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.997 & 0.004 & 0.003 \\ -0.004 & 0.994 & -0.009 \\ 0.024 & 0.002 & 1.007 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	80	$\begin{bmatrix} -1.292 \\ -1.973 \\ -0.348 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.997 & 0.004 & 0.003 \\ -0.004 & 0.993 & -0.008 \\ 0.024 & 0.003 & 1.007 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	100	$\begin{bmatrix} -1.292 \\ -1.973 \\ -0.348 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.998 & 0.004 & 0.003 \\ -0.003 & 0.993 & -0.009 \\ 0.024 & 0.003 & 1.007 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	200	$\begin{bmatrix} -1.292 \\ -1.973 \\ -0.348 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.998 & 0.004 & 0.003 \\ -0.004 & 0.994 & -0.008 \\ 0.024 & 0.002 & 1.007 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$

ตารางที่ 5.17 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม STIM300

Model	Speed (deg/s)	Bias (deg/s) $(b_x, b_y, b_z)$	Orthogonal & Misalignment $(M_i)$	Scale $(S_x, S_y, S_z)$
STIM300	20	$\begin{bmatrix} -0.013 \\ 0.013 \\ -0.044 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.002 & 0.005 & -0.001 \\ -0.005 & 1.000 & 0.000 \\ 0.001 & 0.000 & 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	60	$\begin{bmatrix} -0.013 \\ 0.013 \\ -0.044 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.002 & 0.005 & -0.001 \\ -0.005 & 1.000 & 0.000 \\ 0.001 & 0.000 & 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	80	$\begin{bmatrix} -0.013 \\ 0.013 \\ -0.044 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.001 & 0.005 & -0.001 \\ -0.005 & 1.000 & 0.000 \\ 0.001 & 0.000 & 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	100	$\begin{bmatrix} -0.013 \\ 0.013 \\ -0.044 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.002 & 0.005 & -0.001 \\ -0.005 & 1.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$
	200	$\begin{bmatrix} -0.013 \\ 0.013 \\ -0.044 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.002 & 0.005 & -0.001 \\ -0.005 & 1.000 & 0.000 \\ 0.001 & 0.000 & 0.999 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$

จากตารางการทดลองต่างๆ ข้างต้น เป็นการทดสอบกับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงกับตัวรับรู้ทั้ง 3 ตัว คือรุ่น MPU6050 2 ตัว และรุ่น STIM300 1 ตัว ซึ่งถูกทดสอบด้วยวิธีการหมุนด้วยความเร็วรอบต่างๆ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะถูกนำไปชดเชยให้กับตัวรับรู้ในการจำลองการใช้งาน เพื่อหาข้อสรุปสำหรับวิธีการที่เหมาะสมมากที่สุด โดยการทดสอบตัวรับรู้กับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงจะถูกนำไปใช้ในการสรุปผลการทดลอง เพื่อยืนยันการลดข้อผิดพลาดของวิทยานิพนธ์นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 พารามิเตอร์ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเอง

ตารางที่ 5.18 ค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (1) ; M2

Model	Speed (deg/s)	Bias (deg/s) $(b_x, b_y, b_z)$	Orthogonal & Misalignment $(M_i)$	Scale $(S_x, S_y, S_z)$
MPU6050 (1) ; M2	60	$\begin{bmatrix} -3.837 \\ 0.003 \\ 0.255 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.045 & 0.017 & 0.017 \\ -0.013 & 1.011 & -0.001 \\ -0.025 & 0.012 & 0.996 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 1.000 \end{bmatrix}$

จากตารางการทดลองข้างต้น เป็นการทดสอบกับเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเองกับตัวรับรู้ 1 ตัว คือรุ่น MPU6050 (1) ซึ่งถูกทดสอบด้วยวิธีการหมุนด้วยความเร็วรอบ 60 องศาต่อวินาทีเท่านั้น เนื่องด้วยข้อจำกัดของตัวเครื่องรวมทั้งมอเตอร์ที่ใช้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกนำไปชดเชยให้กับตัวรับรู้ในการจำลองการใช้งาน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเอง ซึ่งการใช้เครื่องสอบเทียบดังกล่าว เป็นเพียงอีกแนวทางหนึ่งที่ถูกเสนอแนะขึ้นมาเท่านั้น ซึ่งจะไม่ถูกใช้ในการยืนยันการลดข้อผิดพลาดของตัวรับรู้ในวิทยานิพนธ์นี้

### 5.4 ผลการปรับแก้ค่าสัญญาณตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมด้วยค่าพารามิเตอร์

ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ซึ่งจะถูกลำถึงโดยค่าความผิดพลาดจะถูกคำนวณเพื่อเปรียบเทียบค่าของผลรวมค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยจะทำการชดเชยค่าพารามิเตอร์ให้กับค่าสัญญาณการทดลองกลาง (การเก็บค่าสัญญาณขณะเคลื่อนที่แบบสุ่ม ณ ช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อเป็นการจำลองการทำงานเสมือนจริง) เพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดหลังการปรับแก้สัญญาณ โดยจะสามารถเขียนได้ว่า

$$Error = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_z^2} - I \quad (5.3)$$

เมื่อกำหนดให้  $I$  คือค่าความเร็วรอบของเครื่องสอบเทียบ มีหน่วยเป็น deg/s ซึ่งค่าผลรวมของค่าความผิดพลาดจะสามารถเขียนได้ว่า

$$SUM\ errors = \sum_{i=1}^n \left| \sqrt{g_{i,x}^2 + g_{i,y}^2 + g_{i,z}^2} - I \right| \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานที่ออก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองต่างๆ ข้างต้นของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมทั้ง 3 ตัว จะสามารถสรุปผลออกมาได้ ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

#### 5.4.1 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมที่ได้จากเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง

ตารางที่ 5.19 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (1)

Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (deg/s)	หลังปรับแก้ (deg/s)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU 6050 (1)	20	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.724	0.083	95.178
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	651.541	31.419	95.178
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	1.040	0.346	66.778
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-4.379	-0.378	91.368
	60	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.724	0.084	95.155
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	651.541	31.565	95.155
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	1.040	0.334	67.897
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-4.379	-0.384	91.242
	80	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.724	0.083	95.171
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	651.541	31.460	95.171
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	1.040	0.341	67.250
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-4.379	-0.381	91.296
	100	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.724	0.083	95.192
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	651.541	31.327	95.192
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	1.040	0.347	66.651
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-4.379	-0.393	91.026
	200	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.724	0.083	95.183
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	651.541	31.382	95.183
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	1.040	0.343	67.041
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-4.379	-0.393	91.035

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.20 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (2)

Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (deg/s)	หลังปรับแก้ (deg/s)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU 6050 (2)	20	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.072	0.071	93.354
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	405.403	26.943	93.354
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	-0.089	0.309	447.080
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-2.088	-0.290	86.121
	60	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.072	0.071	93.367
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	405.403	26.889	93.367
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	-0.089	0.307	444.624
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-2.088	-0.292	86.007
	80	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.072	0.071	93.359
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	405.403	26.923	93.359
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	-0.089	0.302	439.385
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-2.088	-0.297	85.781
	100	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.072	0.071	93.381
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	405.403	26.832	93.381
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	-0.089	0.303	439.666
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-2.088	-0.297	85.792
	200	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.072	0.071	93.367
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	405.403	26.889	93.367
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	-0.089	0.308	445.080
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-2.088	-0.292	86.021

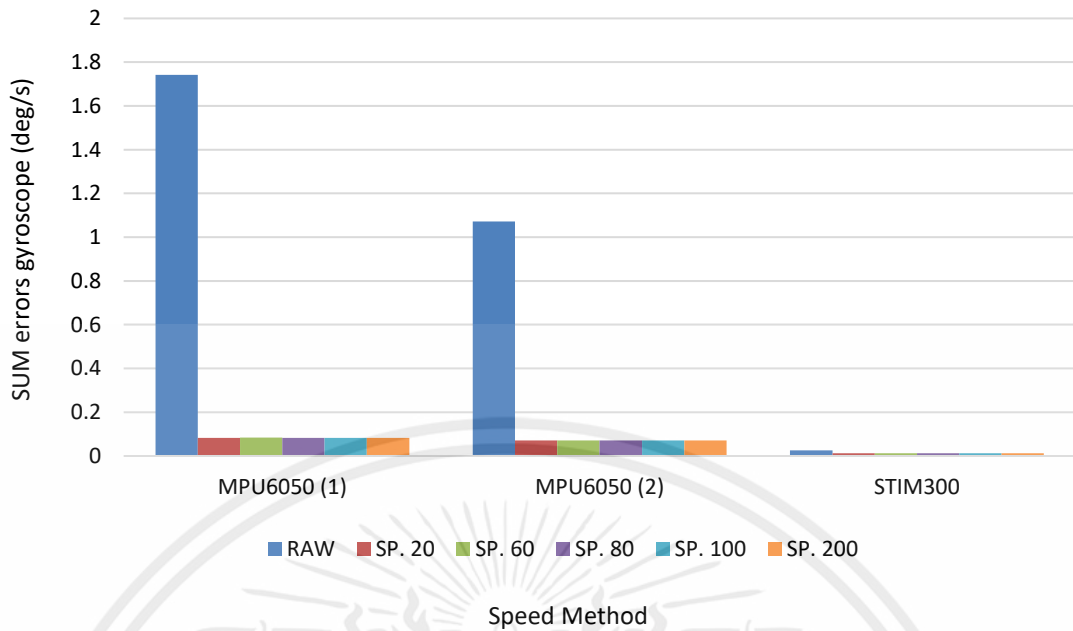
ตารางที่ 5.21 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม STIM300

Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (deg/s)	หลังปรับแก้ (deg/s)	เปลี่ยนแปลง (%)
STIM 300	20	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.026	0.013	50.776
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	9.857	4.852	50.776
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.048	0.045	5.279
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.084	-0.047	44.219

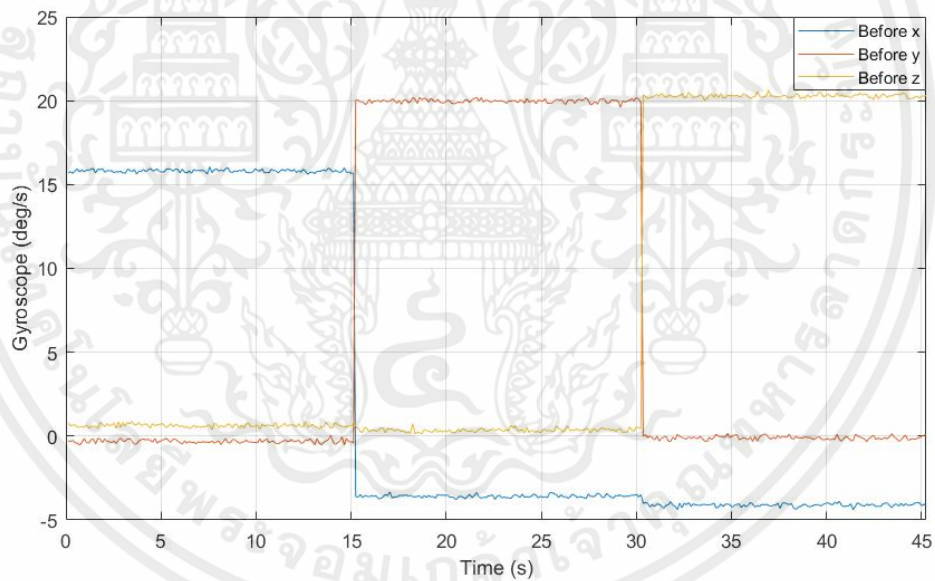
Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (deg/s)	หลังปรับแก้ (deg/s)	เปลี่ยนแปลง (%)
STIM 300	60	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.026	0.013	49.863
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	9.857	4.942	49.863
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.048	0.048	-0.786
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.084	-0.044	47.643
	80	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.026	0.013	49.761
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	9.857	4.952	49.761
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.048	0.047	1.528
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.084	-0.045	46.337
	100	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.026	0.013	49.302
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	9.857	4.997	49.302
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.048	0.049	-1.595
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.084	-0.044	48.100
	200	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.026	0.013	48.984
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	9.857	5.029	48.984
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	0.048	0.049	-2.038
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-0.084	-0.044	48.350

จากตารางผลการทดลองข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบต่างกันสามารถลดค่าความผิดพลาดได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากค่าของตัวรับรู้ทั้ง 3 ตัว ให้ผลออกมาในแนวทางเดียวกัน ดังนั้นจึงเลือกกราฟการเปลี่ยนแปลงของการใช้ความเร็วรอบ 20 องศาต่อวินาที มาแสดง ซึ่งค่าการเคลื่อนที่ก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้ รวมทั้งค่าความผิดพลาดก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้ จะสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

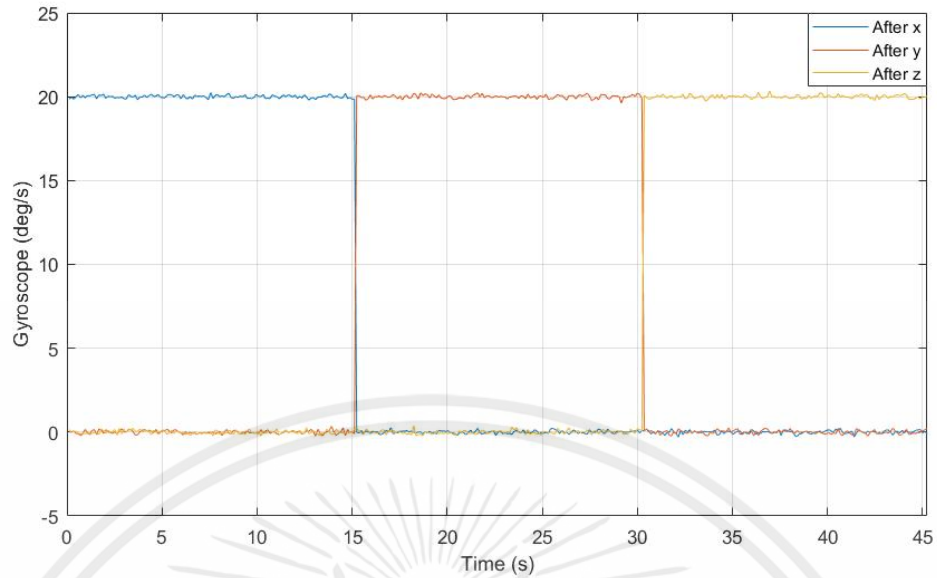


รูปที่ 5.15 ค่าความผิดพลาดหลังการปรับแก้สัญญาณด้วยค่าชดเชยที่ได้การหมุนด้วยความเร็วต่างๆ

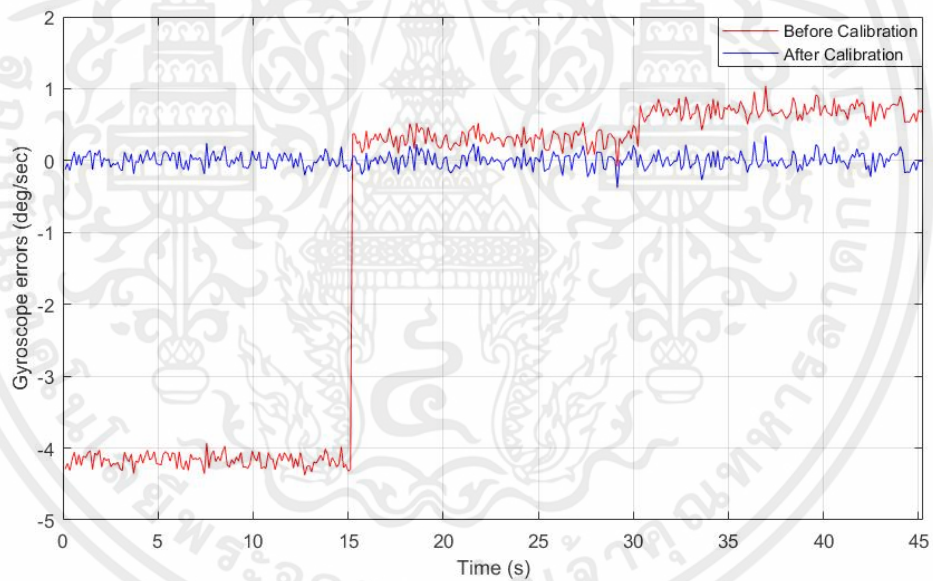


รูปที่ 5.16 ค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (1) ก่อนการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

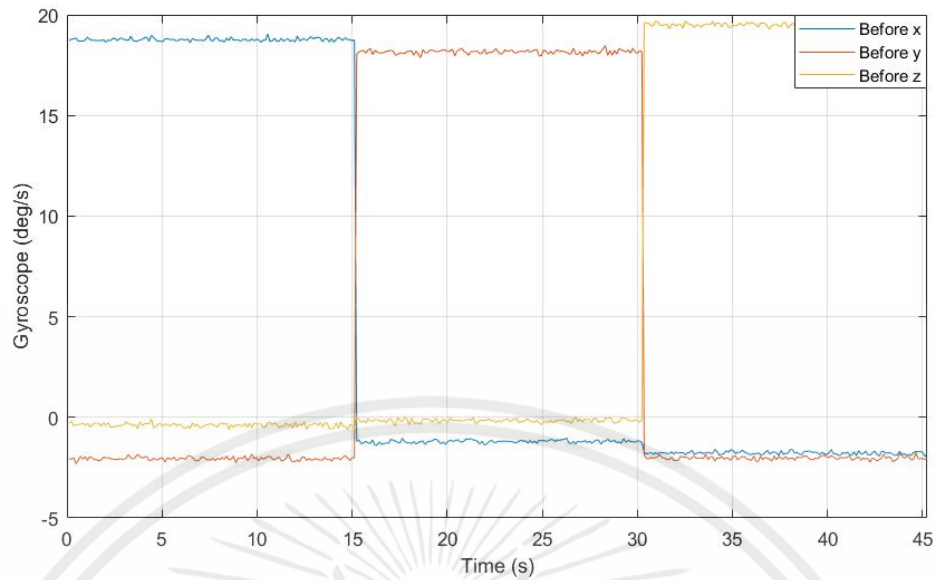


รูปที่ 5.17 ค่าตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (1) หลังการปรับแก้

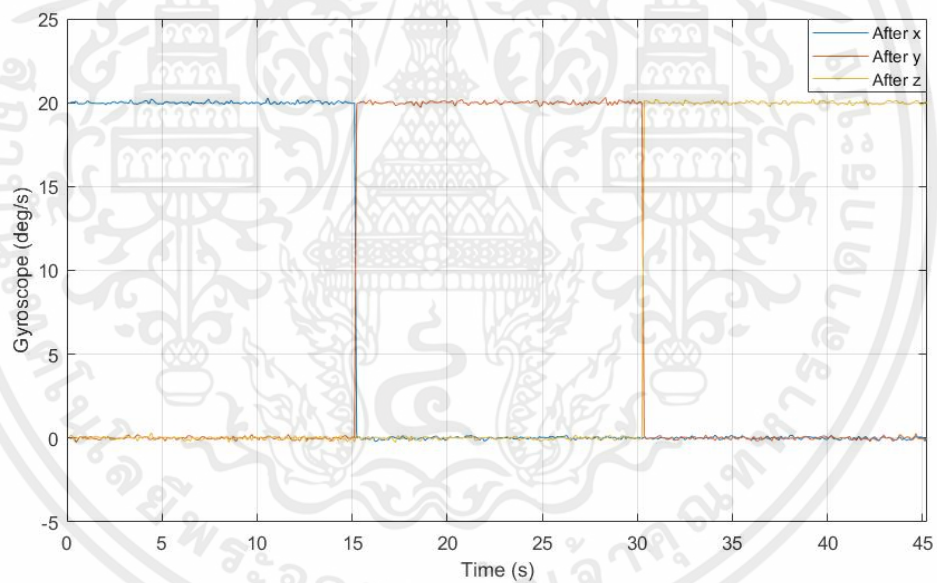


รูปที่ 5.18 ความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (1) จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

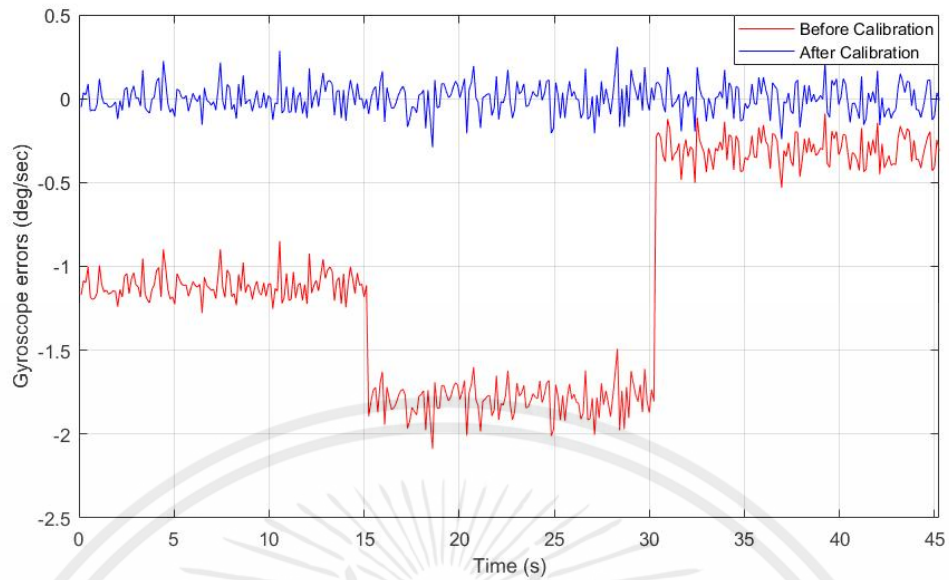


รูปที่ 5.19 ค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (2) ก่อนการปรับแก้

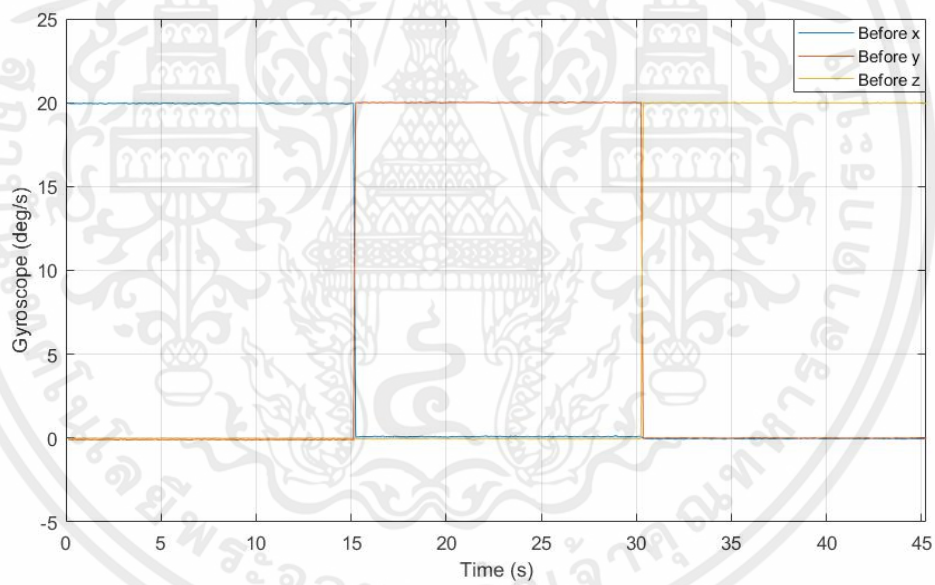


รูปที่ 5.20 ค่าตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (2) หลังการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

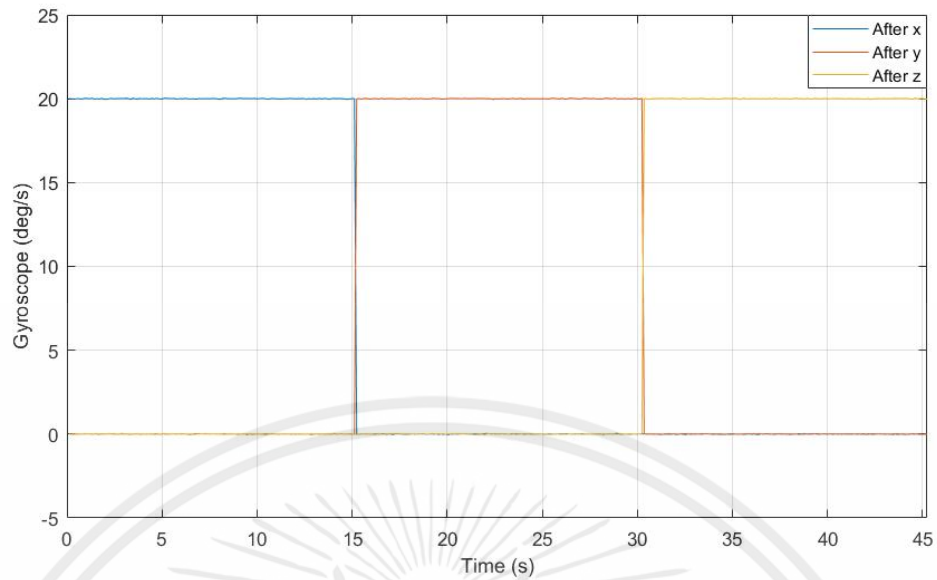


รูปที่ 5.21 ความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (2) จากการทดลอง

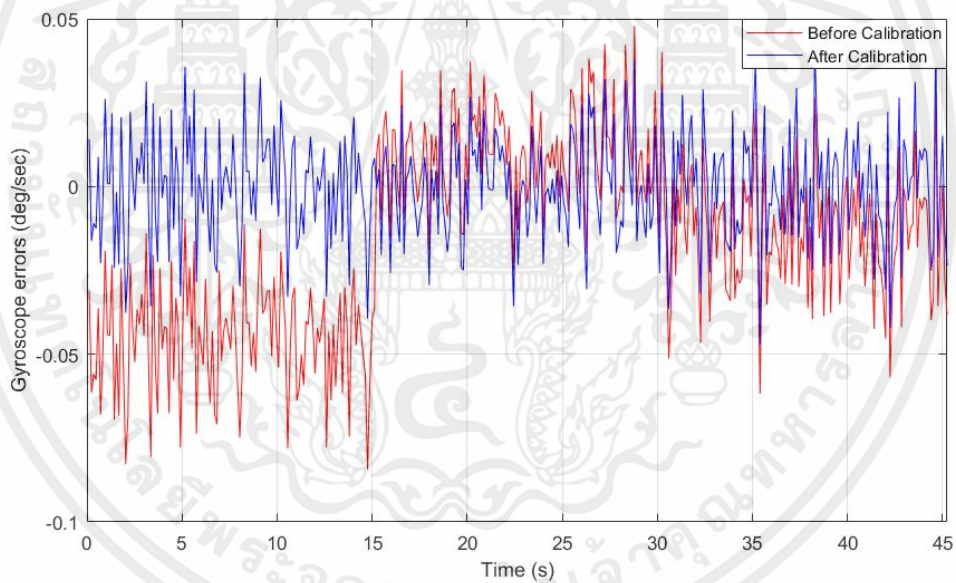


รูปที่ 5.22 ค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม STIM300 ก่อนการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 ค่าตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม STIM300 หลังการปรับแก้



รูปที่ 5.24 ความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม STIM300 จากการทดลอง

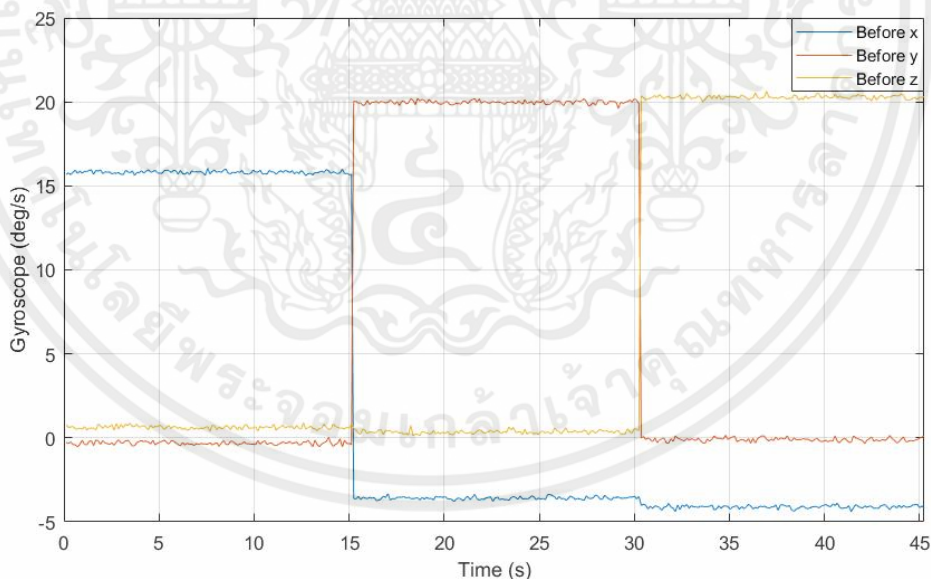
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมที่ได้จากเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเอง

ตารางที่ 5.22 ผลการปรับแก้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 (1) ; M2

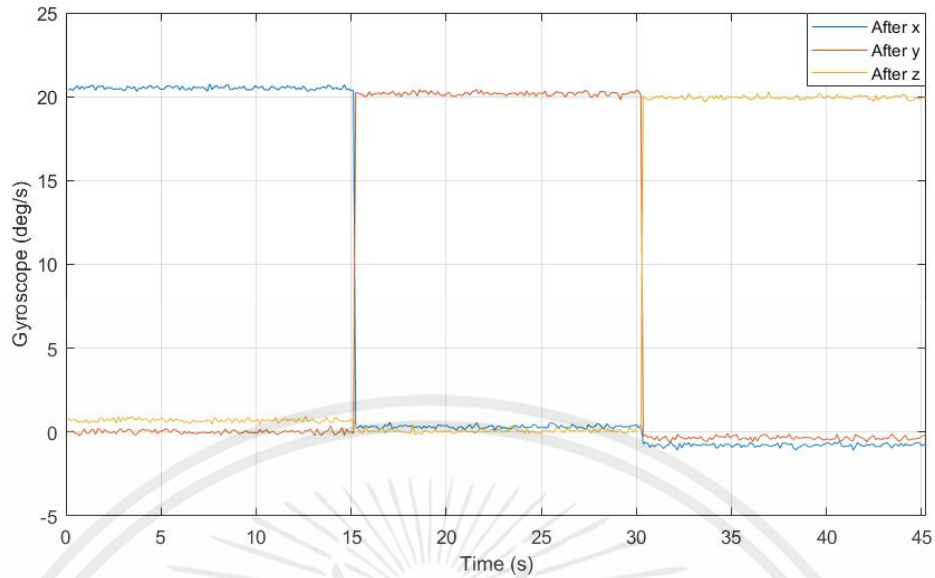
Model	Speed (deg/s)	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (deg/s)	หลังปรับแก้ (deg/s)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU6050 (1)	60	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	1.724	0.271	84.270
		ผลรวมค่าความผิดพลาด	651.541	102.485	84.270
		ค่าความผิดพลาดสูงสุด	1.040	0.781	24.924
		ค่าความผิดพลาดต่ำสุด	-4.379	-0.299	93.172

จากตารางผลการทดลองข้างต้น การทดสอบด้วยเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเองสามารถลดค่าความผิดพลาดได้ค่อนข้างดี เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง อย่างไรก็ตามเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเองยังมีข้อจำกัดต่างๆ ทำให้สามารถทดสอบได้เพียงความเร็วรอบเดียวเท่านั้น ซึ่งค่าการเคลื่อนที่ก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้ รวมทั้งค่าความผิดพลาดก่อนการปรับแก้ และหลังการปรับแก้ จะสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปต่อไปนี้

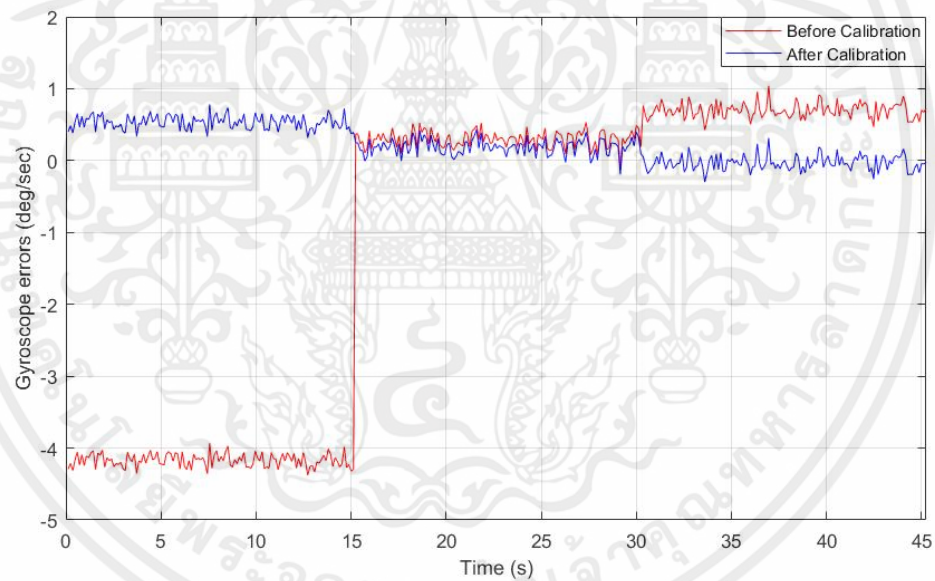


รูปที่ 5.25 ค่าของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 ; M2 ก่อนการปรับแก้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.26 ค่าตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 ; M2 หลังการปรับแก้



รูปที่ 5.27 ความผิดพลาดตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม MPU6050 ; M2 จากการทดลอง

## 5.5 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของวิทยานิพนธ์กับวิธีการทั่วไป

จากผลการทดลองตัวรับรู้รุ่น MPU6050 2 ตัว และรุ่น STIM300 1 ตัว ด้วยวิธีการต่างๆ ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าสัญญาณของตัวรับรู้ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการต่างๆ ที่ได้มานั้น จะทำการเปรียบเทียบกับวิธีการทั่วไปที่ได้รับความนิยม หรือใช้กันทั่วไปในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ คือวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Nonlinear Least-Squares) ในกรณีของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และวิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization ในกรณีของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม โดยใช้

ฟังก์ชัน Optimization Toolbox ของโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจากค่าสัญญาณดิบเดียวกัน

**5.5.1 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น**

จากค่ากล่าวข้างต้นในกรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น จะเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับการเปรียบเทียบมาจากวิธีการหมุน 1 องศา หด 1 วินาที เพื่อใช้เป็นค่าสัญญาณดิบในการหาค่าพารามิเตอร์ และเปรียบเทียบกันระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการหาตามวิธีการของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Non-linear Least squares) ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป จากสมการที่ 3.2 จะได้ว่า

$$M_a O_a S_a = R_a \tag{5.5}$$

จะได้ว่า

$$a_i = R_a (a_r - b_a) \tag{5.6}$$

เมื่อกำหนดให้  $R_a$  คือผลรวมของค่าการเอียงแนวแกน คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก และค่าสเกลเฟกเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

**ตารางที่ 5.23 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น**

Model	Method	Sensor error models $R_a (a_r - b_a)$
MPU6050 (1)	Presented method	$\begin{bmatrix} 0.994 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.993 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.949 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_{r,x} \\ a_{r,y} \\ a_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 0.049 \\ -0.013 \\ -0.127 \end{bmatrix}$
	Least squares	$\begin{bmatrix} 1.001 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.994 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.980 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_{r,x} \\ a_{r,y} \\ a_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 0.048 \\ -0.013 \\ -0.128 \end{bmatrix}$
MPU6050 (2)	Presented method	$\begin{bmatrix} 0.992 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.997 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.954 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_{r,x} \\ a_{r,y} \\ a_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.016 \\ 0.000 \end{bmatrix}$

Model	Method	Sensor error models	
		$R_a(a_r - b_a)$	
MPU6050 (2)	Least squares	$\begin{bmatrix} 0.993 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.996 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.986 \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} a_{r,x} \\ a_{r,y} \\ a_{r,z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0.041 \\ -0.017 \\ 0.000 \end{bmatrix} \end{pmatrix}$
STIM300	Presented method	$\begin{bmatrix} 1.001 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.015 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.963 \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} a_{r,x} \\ a_{r,y} \\ a_{r,z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.007 \\ -0.044 \\ -0.009 \end{bmatrix} \end{pmatrix}$
	Least squares	$\begin{bmatrix} 1.002 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 1.003 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.998 \end{bmatrix}$	$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} a_{r,x} \\ a_{r,y} \\ a_{r,z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.009 \\ -0.045 \\ -0.009 \end{bmatrix} \end{pmatrix}$

จากตารางที่ 5.23 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น การเปรียบเทียบกันระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชดเชยค่าสัญญาณให้กับตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เปรียบเทียบกับวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยใช้ค่าสัญญาณดิบในการเริ่มต้นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์เดียวกัน จากตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์มีความใกล้เคียงกัน

### 5.5.2 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

หลังกระบวนการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้น เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการชดเชยค่าสัญญาณของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาทำการชดเชยให้กับค่าสัญญาณการทดลองกลางเพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 5.24

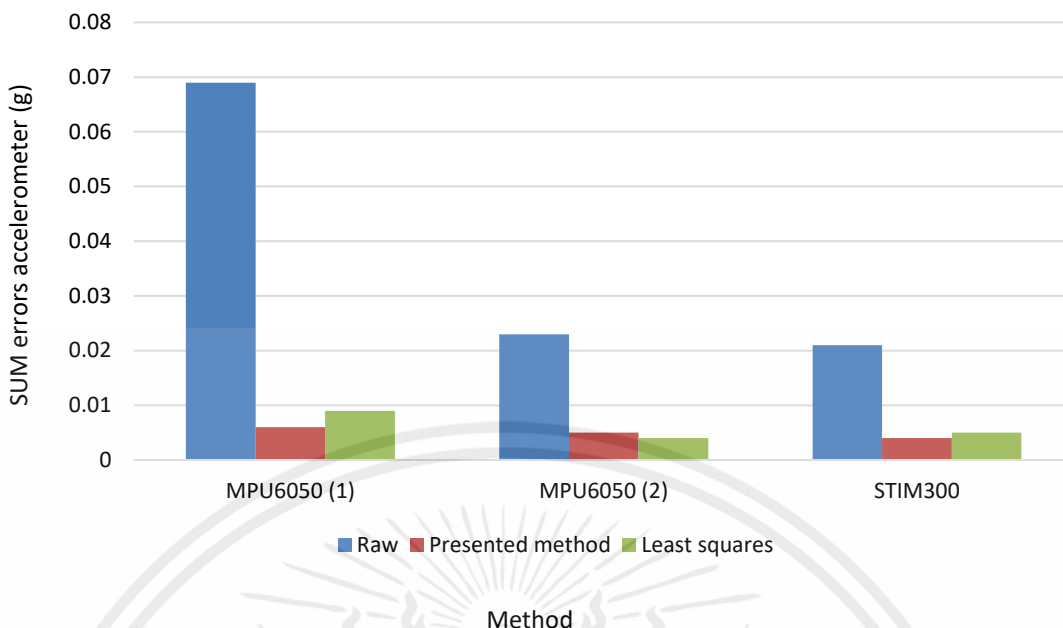
ตารางที่ 5.24 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น

Model	Method	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU6050 (1)	Presented method	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.006	91.285
	Least squares	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	0.069	0.009	86.968

Model	Method	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (g)	หลังปรับแก้ (g)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU6050 (2)	Presented method	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.005	80.613
	Least squares	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	0.023	0.004	82.620
STIM300	Presented method	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.005	77.271
	Least squares	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	0.021	0.005	76.976

จากตารางที่ 5.24 ผลการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น การเปรียบเทียบกันระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชดเชยค่าสัญญาณให้กับตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เปรียบเทียบกับวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยใช้ค่าสัญญาณดิบในการเริ่มต้นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์เดียวกัน จากตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์มีความใกล้เคียงกัน และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปชดเชยให้กับตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น ทั้งสองวิธีการสามารถปรับปรุงค่าสัญญาณการทดลองกลางให้มีค่าความผิดพลาดลดลงใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบด้วยวิธีการตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรงที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.28 ผลการปรับแก้สัญญาณด้วยวิธีการของวิทยานิพนธ์กับวิธีการที่ใช้ทั่วไป

### 5.5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

จากค่ากล่าวข้างต้นในกรณีค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม จะเลือกค่าพารามิเตอร์สำหรับการเปรียบเทียบมาจากวิธีการหมุนด้วยความเร็ว 20 องศาต่อวินาที เพื่อใช้เป็นค่าสัญญาณดิบในการหาค่าพารามิเตอร์ และเปรียบเทียบกันระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกระบวนการหา ตามวิธีการของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป จากสมการที่ 3.45 จะได้ว่า

$$M_g S_g = R_g \tag{5.7}$$

จะได้ว่า

$$g_i = R_g (g_r - b_g) \tag{5.8}$$

เมื่อกำหนดให้  $R_g$  คือผลรวมของค่าการเอียงแนวแกน คุณสมบัติเชิงตั้งฉาก และค่าสเกลเฟกเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.25 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

Model	Method	Sensor error models $R_g(g_r - b_g)$
MPU6050 (1)	Presented method	$\begin{bmatrix} 1.017 & 0.016 & -0.019 \\ -0.013 & 1.001 & -0.005 \\ 0.014 & 0.005 & 0.998 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} g_{r,x} \\ g_{r,y} \\ g_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -3.837 \\ 0.003 \\ 0.255 \end{pmatrix}$
	Cholesky & LU	$\begin{bmatrix} 0.984 & -0.016 & 0.019 \\ 0.013 & 1.000 & 0.005 \\ -0.014 & -0.005 & 1.003 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} g_{r,x} \\ g_{r,y} \\ g_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -3.837 \\ 0.003 \\ 0.255 \end{pmatrix}$
MPU6050 (2)	Presented method	$\begin{bmatrix} 0.997 & 0.004 & 0.002 \\ -0.005 & 0.994 & -0.005 \\ 0.024 & 0.003 & 1.998 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} g_{r,x} \\ g_{r,y} \\ g_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1.292 \\ -1.973 \\ -0.348 \end{pmatrix}$
	Cholesky & LU	$\begin{bmatrix} 1.004 & -0.004 & -0.002 \\ 0.004 & 1.008 & 0.009 \\ -0.024 & -0.002 & 0.994 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} g_{r,x} \\ g_{r,y} \\ g_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1.292 \\ -1.973 \\ -0.348 \end{pmatrix}$
STIM300	Presented method	$\begin{bmatrix} 1.002 & 0.005 & -0.001 \\ -0.005 & 1.000 & 0.000 \\ 0.001 & 0.000 & 0.999 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} g_{r,x} \\ g_{r,y} \\ g_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -0.013 \\ 0.013 \\ -0.044 \end{pmatrix}$
	Cholesky & LU	$\begin{bmatrix} 1.000 & -0.005 & 0.001 \\ 0.005 & 1.001 & 0.000 \\ -0.001 & -0.001 & 1.003 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} g_{r,x} \\ g_{r,y} \\ g_{r,z} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -0.013 \\ 0.013 \\ -0.044 \end{pmatrix}$

จากตารางที่ 5.25 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม การเปรียบเทียบกันระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชดเชยค่าสัญญาณให้กับตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เปรียบเทียบกับวิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization โดยใช้ค่าสัญญาณดิบในการเริ่มต้นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์เดียวกัน จากตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์มีความใกล้เคียงกัน และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปชดเชยให้กับตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ทั้งสองวิธีการสามารถปรับปรุงค่าสัญญาณให้มีค่าความผิดพลาดลดลงใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบด้วยวิธีการตามวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป

#### 5.5.4 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

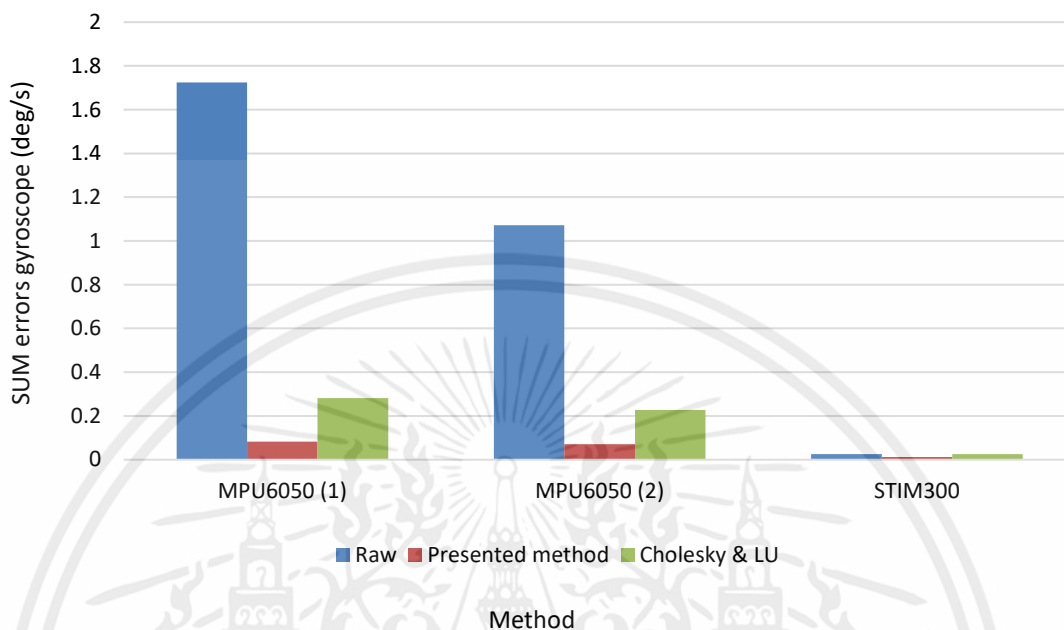
หลังกระบวนการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้น เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการชดเชยค่าสัญญาณของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาทำการชดเชยให้กับค่าสัญญาณการทดลองกลางเพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่ได้จากวิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 5.26

ตารางที่ 5.26 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

Model	Method	หัวข้อ	ก่อนปรับแก้ (deg/s)	หลังปรับแก้ (deg/s)	เปลี่ยนแปลง (%)
MPU6050 (1)	Presented method	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	1.724	0.083	95.178
	Cholesky & LU	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	1.724	0.282	83.615
MPU6050 (2)	Presented method	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	1.072	0.071	93.354
	Cholesky & LU	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	1.072	0.227	78.859
STIM300	Presented method	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	0.026	0.013	50.776
	Cholesky & LU	ค่าความ ผิดพลาดเฉลี่ย	0.026	0.025	5.276

จากตารางที่ 5.26 ผลการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม การเปรียบเทียบกันระหว่างค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการชดเชยค่าสัญญาณให้กับตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เปรียบเทียบกับวิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization โดยใช้ค่าสัญญาณดิบในการเริ่มต้นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์เดียวกัน จากตารางข้างต้นแสดงให้เห็นว่าค่าพารามิเตอร์มีความใกล้เคียงกัน และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปชดเชยให้กับตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ทั้งสองวิธีการสามารถปรับปรุงค่าสัญญาณการทดลองกลางให้มีค่าความผิดพลาดลดลงใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบด้วยวิธีการตาม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป



รูปที่ 5.29 ผลการปรับแก้สัญญาณด้วยวิธีการของวิทยานิพนธ์กับวิธีการที่ใช้ทั่วไป

## 5.6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองตัวรับรู้รุ่น MPU6050 2 ตัว และรุ่น STIM300 1 ตัว ด้วยวิธีการหมุนหยุดและวิธีการหมุนต่อเนื่อง ทำให้เห็นว่าในตัวรับรู้รุ่นเดียวกัน สามารถให้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการทดลอง ถึงแม้ว่าจะเป็นตัวรับรู้รุ่นเดียวกัน และใช้วิธีการทดลองเดียวกัน ก็ยังให้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน และให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งการสอบเทียบก่อนการใช้งานจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง รวมทั้งวิธีการสอบเทียบก็เช่นเดียวกัน ซึ่งกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นเพียงทางเลือกหนึ่งเท่านั้น ที่จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้กับตัวรับรู้ที่มีราคาถูก จะเห็นได้ว่าจากผลการทดลองอัลกอริทึมที่ถูกออกแบบมายังสามารถใช้ได้กับตัวรับรู้ที่มีราคาสูงได้เช่นกัน อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวรับรู้ที่มีราคาสูงได้อีกด้วย

ในส่วนของการทดลอง เมื่อทำการสอบเทียบร่วมกับเครื่องสอบเทียบที่สร้างขึ้นเอง จะเห็นได้ว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวรับรู้ได้ แต่เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบของตัวรับรู้กับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงจะเห็นได้ว่าค่าผลลัพธ์ที่ได้ยังคงค่อนข้างแตกต่างกัน ซึ่งการสอบเทียบตัวรับรู้กับเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเองนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานได้น้อยกว่า แต่ถึงอย่างไรก็ตามเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นเองเป็นเพียงเครื่องต้นแบบเท่านั้น ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนั้น ดังนั้นจะสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ การออกแบบอัลกอริทึม และเครื่องสอบเทียบ มีความสำคัญอย่างมากในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับตัวรับรู้ ทั้งตัวรับรู้

ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ซึ่งในกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง จะเห็นได้ว่าความผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อยของการเคลื่อนที่ของเครื่องสอบเทียบ สามารถส่งผลกระทบต่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จะได้มาจากการทดลอง และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปทดสอบกับการใช้งานจริงของตัวรับรู้ จะเห็นได้ว่าทำให้ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมลดน้อยลง แต่เมื่อใดก็ตามที่การทดลองต่างๆ เป็นไปด้วยความแม่นยำก็จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องมากที่สุดออกมา และเมื่อนำค่าดังกล่าวไปทดสอบใช้จริงก็จะทำให้เห็นถึงความสามารถของอัลกอริทึมที่แสดงออกมาในรูปแบบของการผลค่าความผิดพลาด และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับตัวรับรู้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

# สรุปผล และข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น 3 แกน และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม 3 แกน ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัย และขั้นตอนการศึกษาได้ดังแสดงต่อไปนี้

1. อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น สามารถให้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีได้เมื่อถูกสอบเทียบด้วยเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง โดยในส่วนของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น วิธีการทดลองที่ให้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดคือ วิธีการทดสอบแบบหมุนหยุด โดยจะหมุน 1 องศา และหยุดนิ่ง 10 วินาที จนครบ 360 องศา แต่ถึงอย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวการเก็บข้อมูลจำเป็นต้องใช้เวลาในการเก็บสูงมาก และเมื่อพิจารณา วิธีการทดสอบแบบหมุนหยุด โดยจะหมุน 1 องศา และหยุดนิ่ง 1 วินาที จนครบ 360 องศา กับวิธีการทดสอบแบบหมุนต่อเนื่องที่ความเร็วรอบ 1 องศาต่อวินาที ซึ่งทั้ง 2 วิธี ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลเท่ากัน ผลปรากฏว่าวิธีการทดลองแบบหมุนต่อเนื่องให้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีกว่า ทำให้เมื่อนำไปทดสอบกับการใช้งานจริง จะช่วยลดค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นได้ดีกว่า ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงวิธีการทดสอบแบบหมุนต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบอื่นๆ ที่ไวมากขึ้น ก็ยังให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ ซึ่งวิธีการทดสอบแบบหมุนต่อเนื่องจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการใช้เก็บข้อมูลของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น เพราะทำให้ประหยัดเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบได้เป็นอย่างดี อีกทั้งผลดังกล่าวยังสามารถตอบได้ว่าในปัจจุบันเทคโนโลยีในการสร้างตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นพัฒนามากยิ่งขึ้น และให้ผลที่แม่นยำมากขึ้น จากอดีตที่ตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นมีลักษณะทางกายภาพเป็นก้อนมวลยึดติดกับสปริง จึงทำให้ในอดีตการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นจำเป็นต้องเก็บข้อมูลที่ใช้สำหรับการสอบเทียบโดยวิธีการหยุดนิ่ง เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสอบเทียบที่แม่นยำมากที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาวิธีการทดสอบแบบหมุนต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มความเร็วรอบมากขึ้นจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีความถูกต้องลดน้อยลง จึงเป็นอีกหนึ่งสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการเลือกใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสอบเทียบ

2. อัลกอริทึมที่ใช้สำหรับสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม สามารถให้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีได้เมื่อถูกสอบเทียบด้วยเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง โดยในส่วนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม วิธีการทดลองที่ความเร็วรอบต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งผลออกมาใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านั้น เมื่อนำไปใช้ในการทดลองการใช้งานจริงก็สามารถช่วยลดค่าความผิดพลาดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมได้ใกล้เคียงกัน ต่างกันเพียงจุดทศนิยมเท่านั้น ซึ่งวิธีการทดสอบที่ให้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดคือการหมุนด้วยความเร็วรอบ 100 องศาต่อวินาที จนครบ 360 องศา แต่ถึงอย่างไรก็ตามยังมีจุดที่น่าสนใจคือ ในการเก็บข้อมูลที่มีความเร็วรอบต่างกัน จะใช้เวลาในการเก็บ

ข้อมูลไม่เท่ากัน และจำนวนข้อมูลที่ได้ไม่เท่ากัน ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการหาค่าพารามิเตอร์เป็นอย่างมาก

3. เครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงที่ถูกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นเครื่องสอบเทียบที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงมาก ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ได้อย่างแม่นยำ และสามารถให้ความเร็วรอบได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างนุ่มนวล เมื่อตรวจสอบไปยังตัวรับรู้ จึงพบว่าในระหว่างการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ไม่ทำให้เกิดผลกระทบเนื่องจากการสั่นสะเทือน ซึ่งความแม่นยำของเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูงดังกล่าว เมื่อถูกนำมาใช้ในการเก็บข้อมูลสำหรับหาค่าพารามิเตอร์ สามารถช่วยให้อัลกอริทึมทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด

4. เครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเอง ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบการทำงานและความพร้อมของอัลกอริทึมของวิทยานิพนธ์นี้ จากผลการทดลองเมื่อถูกเปรียบเทียบในการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกันกับเครื่องสอบเทียบแบบมาตรฐานสูง ทำให้พบว่าเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเองในการเคลื่อนที่จะเกิดการสั่นสะเทือนจนตัวรับรู้สามารถรับรู้ได้ถึงค่าการสั่นสะเทือนดังกล่าว เนื่องจากตัวเครื่องถูกสร้างขึ้นจากพลาสติก และมอเตอร์ราคาถูกที่ใช้ ทำให้เครื่องเกิดการสั่นสะเทือนเป็นอย่างมากจนเกิดผลกระทบในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวรับรู้ และอีกหนึ่งส่วนที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องสอบเทียบแบบสร้างขึ้นมาเองลดลง คือในการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบต่างๆ เกิดความผิดพลาดจากจุดหมุน อีกทั้งตำแหน่งในการติดตั้งมอเตอร์ทำให้มอเตอร์แต่ละตัวรับภาระไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความไม่สมดุลของตัวเครื่อง จึงทำให้ความเร็วรอบ หรือตำแหน่งในการเคลื่อนที่เกิดการคลาดเคลื่อน และส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องสอบเทียบชนิดนี้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ในส่วนของวิธีการทดสอบแบบหมุนต่อเนื่อง ควรเพิ่มช่วงของความเร็วรอบที่ใช้ในการในการทดสอบ เพื่อศึกษาผลกระทบของการใช้ความเร็วรอบในช่วงต่างๆ ว่าที่ความเร็วรอบเท่าใดสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ และสามารถประหยัดเวลาที่ใช้ในการสอบเทียบมากที่สุด

2. ในการสอบเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ใช้การหมุนที่ความเร็วรอบต่างๆ จนครบ 360 องศา ซึ่งวิธีการดังกล่าวทำให้ที่ความเร็วรอบต่างกัน จะได้จำนวนข้อมูลที่ไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญอย่างมากในการหาค่าพารามิเตอร์ จึงควรเพิ่มการทดสอบด้วยการใช้ความเร็วรอบต่างๆ โดยใช้เวลาในการเก็บข้อมูลที่เท่ากัน และในแต่ละความเร็วรอบให้แบ่งช่วงเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูล เพื่อทดลองว่าที่ความเร็วรอบต่างกัน ความเร็วรอบใดสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดได้ และควรใช้เวลาในการเก็บข้อมูลนานเท่าใดจึงเหมาะสมที่สุด

3. ในส่วนของการรับส่งข้อมูลวิทยานิพนธ์นี้ใช้การรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย แล้วบันทึกข้อมูลไปยัง SD Card (Secure Digital Card) ทำให้ต้องกำหนด Sampling time ไว้ที่ 0.12 วินาที ซึ่งเป็นช่วง

การเก็บข้อมูลที่รวดเร็วที่สุดที่ระบบของวิทยานิพนธ์นี้ทำได้ จากกรณีดังกล่าวทำให้ช่วงของข้อมูลขาดหายไป และส่งผลอย่างมากในกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ จึงควรใช้วิธีการอื่นในการบันทึกข้อมูล เพื่อให้ได้ช่วงข้อมูลที่ละเอียดมากที่สุด ซึ่งจะหาค่าพารามิเตอร์มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

4. วิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการประมวลผลหาค่าพารามิเตอร์ และจำลองการใช้งานจริงของตัวรับรู้ ด้วยวิธีการเก็บข้อมูลแบบออฟไลน์ ซึ่งแนวทางในการพัฒนาต่อยอดของอัลกอริทึมนี้ คือการนำไปใช้คำนวณการสอบเทียบแบบเรียลไทม์ และทำการรวมสัญญาณของตัวรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมเข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการหามุมอ้างอิงของวัตถุ และสามารถพัฒนาต่อยอดโดยการบูรณาการตัวรับรู้เข้ากับระบบนำทาง เพื่อใช้ในการประมวลผลร่วมกัน

5. การพัฒนาเครื่องสอบเทียบแบบสร้างชิ้นเอง ส่วนที่สำคัญที่ควรแก้ไขปรับปรุง คือตัวเครื่องที่มีน้ำหนักเบาเกินไป ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้ง่าย และจุดหมุนที่มีความฝืดทำให้การเคลื่อนที่ขาดความแม่นยำ อีกทั้งตำแหน่งในการติดตั้งมอเตอร์ยังขาดความสมดุล ซึ่งจุดต่างๆ ดังกล่าวถ้ามีการปรับปรุงแก้ไขจะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้กับเครื่องสอบเทียบแบบสร้างชิ้นเองได้เป็นอย่างมาก

6. ในกระบวนการสอบเทียบที่ถูกนำเสนอมาแล้วนั้น ค่าผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไม่ได้ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นการศึกษาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการใช้งานร่วมกับการหาค่าพารามิเตอร์ จะช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวรับรู้ได้มากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] W T Fong, S K Ong and A Y C Nee. “Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment.” Meas. Sci. Technol 19. 2008. pp. 11-22.
- [2] Benjamin Peter. “Development of an Automatic IMU Calibration System.” ETH Zurich. 2011.
- [3] Kian Sek Tee. “Triaxial Accelerometer Static Calibration.” Proceedings of the World Congress on Engineering, 2011.
- [4] Bin Fang, Wusheng Chou and Li Ding. “An Optimal Calibration Method for a MEMS Inertial Measurement Unit.” International Journal of Advanced Robotic Systems. 2014.
- [5] ชามา สารพร. “การสอบเทียบอัตโนมัติของไจโรสโคปราคาถูก 2 แกน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2013.
- [6] ธราพงษ์ ตาลพันธุ์, อธิวรรณ์ อ่อนจงไกร และ ดวงดาว บุญสุข. “วงจรรองผ่านความถี่ต่ำ 120 MHz.” วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2013.
- [7] David Tedaldi, Alberto Pretto and Emanuele Menegatti. “A Robust and Easy to Implement Method for IMU Calibration without External Equipments.” Department of Information Engineering, University of Padova. 2013.
- [8] Alberto Pretto and Giorgio Grisetti. “Calibration and performance evaluation of low-cost IMUs.” International Workshop on ADC Modelling and Testing 18. 2014.
- [9] Jeff Ferguson. “Calibration of Deterministic IMU Errors.” Prescott, Arizona Campus Department of Electrical and Computer Engineering. 2015.
- [10] Jan Rohac, Martin Sipos, and Jakub Simanek. “Calibration of Low-cost Triaxial Inertial Sensors.” IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. 2015
- [11] Yuanxin Wu, and Ling Pei. “Gyroscope Calibration via Magnetometer.” National Natural Science Foundation of China. 2015.

เอกสารนี้เป็น [12] ปิจิราวุช เวียงจันดา, ไกรสิทธิ์ มหิวรรณ, สมศักดิ์ คงโชติ และ ณัฐวุฒิ เตไปวา. “วิธีการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่งชนิดต้นทุนต่ำด้วยเทคนิคกำลังสองสมบูรณที่น้อยที่สุด.” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 29. 2015.

- [13] Jixin Lv, Ankit A. Ravankar, Yukinori Kobayashi and Takanori Emaru. “ **A Method of Low-Cost IMU Calibration and Alignment.**” IEEE/SICE International Symposium on System Integration. 2016.
- [14] V Avrutov, P Aksonenko, P Henaff and Laurent Ciarletta. “ **3D-Calibration of the IMU.**” IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology. 2017.
- [15] ปิจิราวุธ เวียงจันทา, และ ณัฐวุฒิ เตไปวา. “ **การใช้ตัวกรองคาลมานแบบ Unscented KF ในการประมาณมุมเอียงของระบบวัดมุมอ้างอิง.**” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31. 2017.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.

ข้อมูลทางเทคนิคของตัวรับรู้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p><b>InvenSense Inc.</b>  1197 Borregas Ave, Sunnyvale, CA 94089 U.S.A.  Tel: +1 (408) 988-7339 Fax: +1 (408) 988-8104  Website: www.invensense.com</p>	<p>Document Number: PS-MPU-6000A-00  Revision: 3.4  Release Date: 08/19/2013</p>
---	--	--



**MPU-6000 and MPU-6050  
Product Specification  
Revision 3.4**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<b>MPU-6000/MPU-6050 Product Specification</b>	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	--	---

## 6 Electrical Characteristics

### 6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>GYROSCOPE SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	FS_SEL=0		±250		°/s	
	FS_SEL=1		±500		°/s	
	FS_SEL=2		±1000		°/s	
	FS_SEL=3		±2000		°/s	
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(°/s)	
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(°/s)	
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C	-3		+3	%	
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature			±2		%	
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		0.2		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
<b>GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)</b>						
Initial ZRO Tolerance	25°C		±20		°/s	
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		±20		°/s	
Power-Supply Sensitivity (1-10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		°/s	
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		°/s	
Linear Acceleration Sensitivity	Static		0.1		°/s/g	
<b>SELF-TEST RESPONSE</b>						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	1
<b>GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE</b>						
Total RMS Noise	FS_SEL=0 DLPFCFG=2 (100Hz)		0.05		°/s-rms	
Low-frequency RMS noise	Bandwidth 1Hz to 10Hz		0.033		°/s-rms	
Rate Noise Spectral Density	At 10Hz		0.005		°/s/√Hz	
<b>GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES</b>						
X-Axis		30	33	36	kHz	
Y-Axis		27	30	33	kHz	
Z-Axis		24	27	30	kHz	
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>						
	Programmable Range	5		256	Hz	
<b>OUTPUT DATA RATE</b>						
	Programmable	4		8,000	Hz	
<b>GYROSCOPE START-UP TIME</b>						
ZRO Settling (from power-on)	DLPFCFG=0 to ±1°/s of Final		30		ms	

1. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<b>MPU-6000/MPU-6050 Product Specification</b>	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	--	---

## 6.2 Accelerometer Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>ACCELEROMETER SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0		±2		g	
	AFS_SEL=1		±4		g	
	AFS_SEL=2		±8		g	
	AFS_SEL=3		±16		g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0		16,384		LSB/g	
	AFS_SEL=1		8,192		LSB/g	
	AFS_SEL=2		4,096		LSB/g	
	AFS_SEL=3		2,048		LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
<b>ZERO-G OUTPUT</b>						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes		±50		mg	1
	Z axis		±80		mg	
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C		±35		mg	
	Z axis, 0°C to +70°C		±60		mg	
<b>SELF TEST RESPONSE</b>						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
<b>NOISE PERFORMANCE</b>						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		μg/√Hz	
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>						
	Programmable Range	5		260	Hz	
<b>OUTPUT DATA RATE</b>						
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
<b>INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT</b>						
			32		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning
2. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1 FEATURES

- Miniature package
- Low noise
- Low bias instability
- Excellent performance in vibration and shock environments
- 6 axes offered in same package
  - Electronically calibrated axis alignment
- Gyros based on Sensoror ButterflyGyro™
  - Single-crystal silicon technology
  - No intrinsic wear-out effects
- High stability accelerometers and inclinometers
- Separate "AUX" input for 24 bit ADC
- Insensitive to magnetic fields
- Full EMI compliance
- Digital interface, RS422
- Fully configurable
- Continuous self-diagnostics



(38.6mm x 44.8mm x 21.5mm)

## 2 GENERAL DESCRIPTION

STIM300 is an IMU consisting of 3 high accuracy MEMS-based gyros, 3 high stability accelerometers and 3 high stability inclinometers in a miniature package. Each axis is factory-calibrated for bias, sensitivity and compensated for temperature effects to provide high-accuracy measurements in the temperature range  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+85^{\circ}\text{C}$ . The unit runs off a single  $+5\text{V}$  supply.

STIM300 communicates via a standard high-level RS422 interface. The use of a 32-bit RISC ARM microcontroller provides flexibility in the configuration, like choice of output unit, sample rate, low pass filter  $-3\text{dB}$  frequency and RS422 bit-rate and protocol parameters. All configurable parameters can be defined when ordering or set by customer.

When STIM300 is powered up, it will perform an internal system check and synchronise the sensor channels. As an acknowledgement of the complete power-up sequence, it will provide special datagrams containing part number, serial number and configuration data. STIM300 will then automatically proceed to provide measurement data. Connect power and STIM300 will provide accurate measurements over the RS422 interface.

The measurement data is transmitted as packages of data on a fixed format (datagram) at intervals given by the sample rate together with a synchronization signal (TOV). The datagram is in binary coded format in order to have an efficient transfer of data. In addition to the measurement data itself, the datagram contains an identifier, status bytes and a 32 bit CRC (Cyclic Redundancy Check) to provide high degree of fault detection in the transmissions. The status bytes will flag any detected errors in the system. STIM300 can also be configured to transmit data only when triggered by a separate digital input signal (ExtTrig).

For more advanced users, the gyro may be put in Service Mode. In this mode all the configuration parameters can be intermediately or permanently changed by overwriting the current settings in the flash memory. In Service Mode the commands and responses are in a human readable format (ASCII); to enable the use of terminal-type software during typical product integration. Service Mode also provides the ability to perform single measurements, perform diagnostics and obtain a higher detail level of detected errors reported in the status bytes.

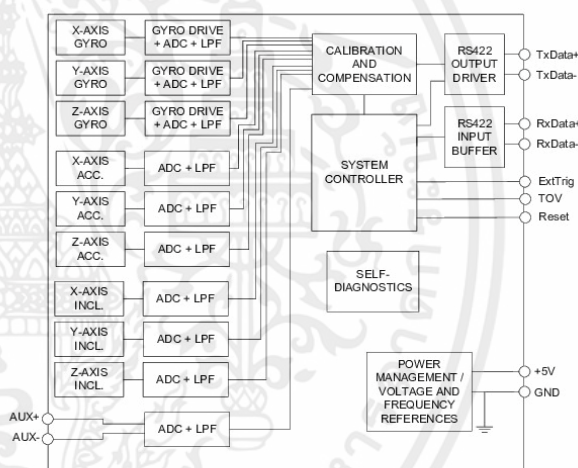


Figure 2-1: STIM300 FUNCTION BLOCK DIAGRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# DATASHEET

# ButterflyGyro™

## STIM300 Inertia Measurement Unit

TIME OF VALIDITY (TOV PIN)				
Output configuration		Open drain		
Internal Pull-Up Resistor to Vsup		10		kΩ
Sink capability			50	mA
TOV active level		Active "low"		
Minimum time of TOV, $t_{TOV\_min}$	50			μs
Delay from internal time-tick to TOV active, $t_{TOV\_dl}$		0.5	6	μs
Delay from TOV active (to start of transmission, $t_{tx\_dl}$ )			80	μs
CHASSIS				
Isolation resistance chassis to GND (pin 15)	500V	100		MΩ

Note 1: Time from Power-On to start of datagram transmissions (starting with part-number datagram)

Note 2: Time from Reset release to start of datagram transmissions (starting with part-number datagram)

Note 3: Time from Power-On or Reset to the reset of the Start-Up bit (Bit 6 in the STATUS byte ref. Table 6-16). During this period the output data should be regarded as non-valid.

Note 4: If a user-defined bit-rate larger than 1.5Mbit/s is used, the deviation may exceed the specification due to the resolution of the bit-rate generator, ref. section 10.5.1

Note 5: Other values can be configured, ref. Table 6-8

Note 6: If time between triggers is longer, the latency will over-run. The sample counter will over-run after 127ms.

Note 7: If time between triggers is longer, the accuracy of average rate may also be reduced. Similar for accelerometer and inclinometer outputs

Note 8: If time between triggers is longer, the integrated angle may have wrapped several times and hence the change in angle from last sample will not be possible to calculate. Similar for accelerometer and inclinometer outputs

Note 9: For definition, ref. Figure 8-3

Note 10: For definition, ref. Figure 8-4 and Figure 8-5

**Table 6-3: Functional specifications, gyros**

Parameter	Conditions	Min	Nom	Max	Unit	Note
<b>GYRO</b>						
Full Scale (FS)			±400		°/s	1
Resolution			24		bits	
			0.22		°/h	
Scale Factor Accuracy			±500		ppm	
Non-Linearity	±200°/s		25		ppm	2
	±400°/s		50		ppm	2
Bandwidth (-3dB)			262		Hz	3
Sample Rate				2000	samples/s	4
Group Delay	LP-filter -3dB = 262Hz		1.5		ms	5
	LP-filter -3dB = 131Hz		3.0		ms	5
	LP-filter -3dB = 66Hz		6.0		ms	5
	LP-filter -3dB = 33Hz		12		ms	5
	LP-filter -3dB = 16Hz		24		ms	5
Bias Range		-250	0	+250	°/h	
Bias error over temperature	Static temperatures		5		°/h	6
Bias error over temperature gradients	$\Delta T \leq \pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$		10		°/h	7
Bias Instability	Allan Variance @25°C		0.5		°/h	
Angular Random Walk	Allan Variance @25°C		0.15		°/√hr	
Linear Acceleration Effect						
Bias	With g-compensation		1		°/h /g	8
	No g-compensation			15	°/h /g	8
Scale Factor	With g-compensation		30		ppm/g	8
	No g-compensation		400		ppm/g	8
Vibration Rectification Coefficient			Ref. Figure 6-1		°/h /g <sub>rms</sub>	
Misalignment			1		mrad	9

Note 1: Output is monotonous and will saturate at ±480°/s

Note 2: Largest deviation from BSL (Best Straight Line) over the range specified

Note 3: Low-pass filter -3dB frequency can be configured, ref. Table 6-8 and section 6.1.1.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6-4: Functional specifications, accelerometers

Parameter	Conditions	Min	Nom	Max	Unit	Note
<b>ACCELEROMETER</b>						
Full Scale (FS)			±10		g	1
Resolution			24		bits	
			1.9		µg	
Scale Factor Accuracy			±300		ppm	
Non-Linearity	±10g		100		ppm	2
Bandwidth (-3dB)	LP-filter -3dB = 262Hz	90	214		Hz	3
Sample Rate				2000	samples/s	4
Group Delay	LP-filter -3dB = 262Hz		6.5		ms	5
	LP-filter -3dB = 131Hz		8.0		ms	5
	LP-filter -3dB = 66Hz		11		ms	5
	LP-filter -3dB = 33Hz		17		ms	5
	LP-filter -3dB = 16Hz		29		ms	5
Bias switch on/off repeatability		-0.75	0	+0.75	mg	6
Bias error over temperature	$\Delta T \leq \pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$		±2		mg rms	6
Bias Instability	Allan Variance @25°C		0.05		mg	6
Velocity Random Walk	Allan Variance @25°C		0.06		m/s/hr	6
Vibration Rectification Coefficient			Ref. Figure 6-3		$\text{mg/g}^2_{\text{rms}}$	
Misalignment			1		mrad	7

Note 1: Other ranges possible (±2g, ±5g, ±30g, ±100g)

Note 2: Largest deviation from BSL (Best Straight Line) over the range specified

Note 3: Other values can be configured, ref. Table 6-8 and section 6.1.2.3

Note 4: Other values can be configured, ref. Table 6-8. Sample rate will be same for gyros, accelerometers, inclinometers, AUX and temperature

Note 5: Total delay to start of datagram transmission = group delay + 0.5ms +  $t_{\text{lovd,dl}}$  +  $t_{\text{x,dl}}$

Note 6: Valid for ±10g range. Specification scale with range for other ranges

Note 7: Ref. Figure 6-2 for definition of reference points used in axes alignment

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 6-5: Functional specifications, inclinometers

Parameter	Conditions	Min	Nom	Max	Unit	Note
<b>INCLINOMETER</b>						
Full Scale (FS)			±1.7		g	
Resolution			24		bits	
Scale Factor Accuracy	±1g		0.2		µg	
Non-Linearity	±1g		±500		ppm	1
Bandwidth (-3dB)			500		ppm	2
Sample Rate			17	2000	Hz	3
Group Delay	LP-filter -3dB = 262Hz		15		samples/s	4
	LP-filter -3dB = 131Hz		17		ms	4
	LP-filter -3dB = 66Hz		20		ms	4
	LP-filter -3dB = 33Hz		26		ms	4
	LP-filter -3dB = 16Hz		38		ms	4
Bias switch on/off repeatability		-0.75	0	+0.75	mg	
Bias error over temperature	$\Delta T \leq \pm 1^\circ\text{C}/\text{min}$		±2		mg rms	
Bias Instability	Allan Variance @25°C		0.06		mg	
Velocity Random Walk	Allan Variance @25°C		0.08		m/s/hr	5
Misalignment			1		mrad	6

Note 1: Largest deviation from BSL (Best Straight Line) over the range specified

Note 2: Other values can be configured, ref. Table 6-8 and section 6.1.3.3

Note 3: Other values can be configured, ref. Table 6-8. Sample rate will be same for gyros, accelerometers, inclinometers, AUX and temperature

Note 4: Total delay to start of datagram transmission = group delay + 0.5ms +  $t_{\text{bv\_dl}}$  +  $t_{\text{tx\_dl}}$

Note 5: At 0g. Velocity Random Walk increases by typically 15% at ±1g given by the chosen technology for the inclinometers

Note 6: Ref. Figure 6-2 for definition of reference points used in axes alignment

Table 6-6: Functional specifications, AUXiliary input

Parameter	Conditions	Min	Nom	Max	Unit	Note
Full Scale (FS)			±2.5		V	1
Resolution			24		bits	
Gain error	@25°C		0.30		µV	2
Gain drift			±0.1		%	
Non-Linearity			1.3		ppm/°C	3
Bandwidth (-3dB)			300		ppm	4
Sample Rate			262	2000	Hz	5
Group Delay	LP-filter -3dB = 262Hz		6.1		samples/s	6
	LP-filter -3dB = 131Hz		7.6		ms	6
	LP-filter -3dB = 66Hz		11		ms	6
	LP-filter -3dB = 33Hz		17		ms	6
	LP-filter -3dB = 16Hz		29		ms	6
Offset error	@25°C		±0.75		mV	2
Offset drift			±2.8		µV/°C	
Noise			8		µV rms	
Input impedance			Ref. Figure 6-4			

Note 1: Full-scale input voltage (FS):  $V_{\text{IN}} = (\text{AUX}+) - (\text{AUX}-)$

Note 2: Gain and offset error can be calibrated by changing the calibration coefficients, ref. 8.4 and 10.10

Note 3: Largest deviation from BSL (Best Straight Line) over the range specified

Note 4: Other values can be configured, ref. Table 6-8 and section 6.1.4.1

Note 5: Other values can be configured, ref. Table 6-8. Sample rate will be same for gyros, accelerometers, inclinometers, AUX and temperature

Note 6: Total delay to start of datagram transmission = group delay + 0.5ms +  $t_{\text{bv\_dl}}$  +  $t_{\text{tx\_dl}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ACUTRONIC

The Driving Force in Motion Simulation



## Multi Axis Digital Motion Control System **ACUTROL® 3000e Controller**

ACUTROL®3000e is an evolution of the ACUTROL®3000, the leading motion control system for high precision single and multi-axis Inertial Guidance, Electro-Optics Test Systems and Hardware in the Loop (HWIL) simulation platforms. A modular architecture both improves adaptability to various applications and facilitates obsolescence handling. The controller is backward compatible with the well-proven and established ACUTROL® Control Language (ACL). ACUTROL®3000e offers unparalleled flexibility, reliability, versatility and performance.



### Flexibility

- Adaptable servo topology, including configurable digital filters, allows customized control strategies
- Configurable events based on limit tests of system variables
- Data Logging and Data Playback at the ACUTROL®3000e frame rate make accurate reproduction of motion profiles possible
- Even without a real-time interface, a customizable freeze pulse can trigger a motion data snapshot

### Reliability

- Digital pressure and torque loops reduce motion simulator hardware complexity
- Only one encoder for both position detection and motor commutation improves MTBFs
- Global ACUTROL® user community of over one thousand ACUTROL® systems

### Versatility

- An integrated Ethernet router allows for easy integration of simulators with facility networks
- Example code, simulation utilities, and demo kits enable application development before delivery of the actual motion system
- Built-in capability to use a wide range of encoder types, including absolute optical encoders
- Remote control of simulators, including Power On / Off is possible

### Performance

- Compensation of deterministic cogging and position errors resulting in high position accuracy and smooth rate performance
- Advanced vector processing algorithms provide asynchronous, multi-rate, real time communication, ensuring high fidelity motion simulation

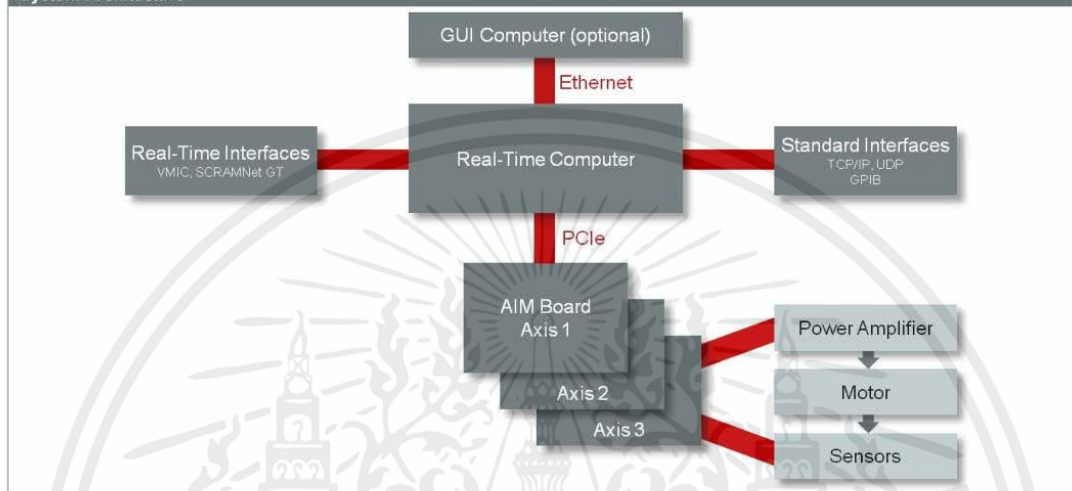
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ACUTRONIC

The Driving Force in Motion Simulation



## System Architecture



## Interfaces

- Remote ON/OFF control through Ethernet Interface
- Graphical User Interface (GUI): selection of modes of operation, motion demands, configuration parameters and monitoring of system variables and system states
- Native Remote Computer Interfaces
  - Non real-time: Ethernet TCP/IP, GPIB (IEEE-488)
  - Real-time Interface: VMIC, SCRAMNet GT, Ethernet UDP
- IRIG Timing card

## Performance Features (instrumentation)

Position Accuracy	< 0.05 arc sec
Position Stability	< 0.02 arc sec
Position Resolution	0.017 arc sec
Position Sensitivity to Rate	< 0.1 arc sec / rad/sec

## Measurement Features

Number of axes	1 – 3 axes
Display Format	Full Scale User Units (bi-polar or uni-polar)
Data Format	Float or 32 bit binary
Analog I/O	± 10 V (16 bit)
Axis Synchronization	All axes synchronized simultaneously
Position Event Pulses	2 events/axis, N/revolution; 32 nsec resolution
Motion snapshot	Position, rate and acceleration data with an aperture of 32 nsec
Encoder Interfaces	Analog, SSI, EnDat, BiSS

## Servo Features

Digital Control	classical or hybrid architecture
Frame Rate	up to 10 kHz
Estimated Motion States	Position, rate, and acceleration
Motion State Limits	± position,  rate , and  acceleration
Motion Profile Playback	at ACUTROL frame rate or slower

## Mechanical Features

Chassis	19 in Rack mount; 10.5 in height (removable front panel)
Display	12 in LCD w. touch (version without display available) Removable Front Panel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACUTRONIC



The Driving Force in Motion Simulation



## Three-Axis Motion Simulator 33-Series

Inertial Guidance Test and Calibration System



The 33-Series Motion Simulators are a range of three-axis position and rate tables for the development, manufacturing, testing and calibration of inertial sensors and systems, which require movements around three axis. They are particularly suited for the testing of tactical grade and high precision navigation sensors including Inertial Measurement Units (IMU) and Inertial Navigation Systems (INS). The high precision position accuracy and rate stability makes them ideal for inertial test requirements in all civilian and military applications. Independent motion simulation in three axes makes them very versatile:

### Features

Single family range with various configuration options depending on customer test requirements.

Three-axis unlimited rotation equipped with direct drive brushless motors and position transducers.

Large choice of standard and custom slip-ring capsules.

Controlled by the industry standard ACUTROL 3000e real-time digital controller.

Temperature chamber options:

- Cooling by Liquid Nitrogen LN2 (TCN) or
- Cooling by Carbon Dioxide CO2 (TCC) or
- Cooling by a water or air-cooled free-standing electromechanical refrigeration system (TCM)

Optional electrical expansion valve to provide a very smooth and linear slope in comparison with the solenoid valve.

### Benefits

Single solution for all testing including development, integration, production, calibration and maintenance.

Large Table Top for testing multiple UUT's up to 890 mm.

Excellent precision and absolute positioning.

Excellent rate stability.

Large user community of thousands of IGTS systems and ACUTROL® digital motion controllers.

Characteristics may be adapted to fit customer requirements with customized options of motors, slip-rings and table tops.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ACUTRONIC



The Driving Force in Motion Simulation



AC3347-TC

AC3367-TC

Unit Under Test (UUT) Mechanical Interface	
Load Capacity nominal/maximal/option	20 kg/ 30 kg/ 40 kg*
Table Top Diameter, including connectors	ø450, up to ø500
Hole Pattern	50 mm or 2" grid
Offset to Elevation Axis	75 mm

Load Capacity nominal/maximal/option	40 kg/ 60 kg/ 100 kg*
Table Top Diameter, including connectors	ø660, up to ø740
Hole Pattern	50 mm or 2" grid
Offset to Elevation Axis	0 mm

\* Heavy payloads may require modifications to counteract sagging effects.

Specifications	Inner Axis	Middle Axis	Outer Axis	Inner Axis	Middle Axis	Outer Axis
Angular Freedom	continuous	continuous	continuous	continuous	continuous	continuous
Position Accuracy arc sec RSS	<1	<1.5	<1	<1	<1.5	<1
Command resolution		0.00001 deg			0.00001 deg	
Repeatability		<1 arc sec			<1 arc sec	
Rate Range standard/option	1'500 / 2'000	400 / 500	400 / 500	1'500 / 2'000	400 / 500	400 / 500
Stability – over 360 deg		0.0005%			0.0005%	
– over 10 deg		0.005%			0.005%	
– over 1 deg		0.05%			0.05%	
Command resolution		0.00001 deg/sec			0.00001 deg/sec	
Maximum Acceleration** standard/option	4'000 / 8'000	400 / 800	400 / 500	4'000 / 6'000	500 / 800	500 / 800
Bandwidth** at -3dB	80 Hz	15 Hz	15 Hz	80 Hz	15 Hz	15 Hz
Mechanical Wobble standard/option	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 3sec	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 3sec	< 5sec/ < 1sec
Orthogonality standard/option		< 3sec/ < 1sec			< 3sec/ < 1sec	
Command and Control	Multi-axis digital motion controller ACUTROL® 3000e					
Communication Interfaces	Ethernet TCP/IP, Real-Time expansion card optional					

\*\* Values are UUT dependent and can be provided upon request if UUT characteristics are available.

Dimensions and Weight	
Table (L x W x H) incl. rotational clearance	3'000 mm x 2'350 mm x 2'700 mm
Weight	min. 1'800 kg
Height of Table Top (from floor)	1'280 mm
Electrical Cabinet (L x W x H), Weight	600 x 820 x 2'200 mm; 320 kg
Mechanical Cooling Unit	Dual-stage unit: 800 kg

Temperature Chamber (TC) with TCM, TCC (CO2) or TCN (LN2) Cooling System	
Working volume	ø450 up to 360mm height
Temperature Range of TCM ***	ø660 up to 540mm height
Temperature Range of TCC or TCN	-55 °C to +100 °C
Thermal Gradients (peak) of TCM ***	-55 / +100 °C
Thermal Gradients (peak) of TCC or TCN	-2 °C/min (cooling) / +4 °C/min (heating) according to standard IEC 60068
Stability	-4 °C/min (cooling) / +4 °C/min (heating) according to standard IEC 60068
	± 1 °C

\*\*\* Water cooled refrigeration system requires chiller unit and chiller adaptation kit depending on site installation.

Slipping Standard Options to UUT	
Lines	Connectors
52 lines rated 2A, 150VDC	2x37pin D-Sub
28 lines rated 2A, 150VDC +10 lines rated 5A, 150VAC	1x 50pin D-Sub 1x 15pin D-Sub
28 lines rated 2A, 150VDC +4 lines rated 20A, 400VDC	1x 50pin D-Sub 1x 5pin D-Sub (5W5)

- Options:**
- Customized table top, slipping and connector configurations
  - Electromechanical brakes (for "noiseless" bias stability tests)
  - Contactless Ethernet slipping for 1 Gbit/s
  - RF (up to 18GHz) rotary joints for GPS signals up to 2 channels
  - Fiber optic rotary joints for highest data rates up to 32 channels
  - E2V electronic expansion valve for TCM dual-stage refrigeration (proportional valve: decreased noise level during operation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ACUTRONIC



The Driving Force in Motion Simulation



AC3347

AC3367

Unit Under Test (UUT) Mechanical Interface		
Load Capacity nominal/maximal/option	20 kg/ 30 kg/ 40 kg*	40 kg/ 60 kg/ 100 kg*
Table Top Diameter, including connectors	Standard ø450, up to ø650	Standard ø660, up to ø890
Hole Pattern	50 mm or 2" grid	50 mm or 2" grid
Offset to Elevation Axis	150 mm	0 mm

\* Heavy payloads may require modifications to counteract sagging effects.

Specifications	Inner Axis	Middle Axis	Outer Axis	Inner Axis	Middle Axis	Outer Axis
Angular Freedom		continuous			continuous	
Position Accuracy arc sec RSS	<1	<1.5	<1	<1	<1.5	<1
Command resolution		0.00001 deg			0.00001 deg	
Repeatability		< 1 arc sec			< 1 arc sec	
Rate Range standard/option	1500 / 2000	400 / 500	400 / 500	1500 / 2000	400 / 500	400 / 500
Stability – over 360 deg		0.0005%			0.0005%	
– over 10 deg		0.005%			0.005%	
– over 1 deg		0.05%			0.05%	
Command resolution		0.00001 deg/sec			0.00001 deg/sec	
Maximum Acceleration** standard/option	4000 / 8000	400 / 800	400 / 500	4000 / 6000	500 / 800	500 / 800
Bandwidth** at -3dB	80 Hz	15 Hz	15 Hz	80 Hz	15 Hz	15 Hz
Mechanical Wobble standard/option	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 3sec	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 3sec	< 5sec/ < 1sec
Orthogonality standard/option		< 3sec/ < 1sec			< 3sec/ < 1sec	
Command and Control	Multi-axis digital motion controller ACUTROL® 3000e					
Communication Interfaces	Ethernet TCP/IP, Real-Time expansion card optional					

\*\* Values are UUT dependent and can be provided upon request if UUT characteristics are available.

Dimensions and Weight		
Table (L x W x H) incl. rotational clearance	2050 mm x 2050 mm x 2000 mm	2600 mm x 2600 mm x 2600 mm
Weight	min. 1400 kg	min. 2900 kg
Height of Table Top (from floor)	1190 mm	1550 mm
Electrical Cabinet (L x W x H); Weight		600 x 820 x 2200 mm; 320 kg

Slipping Standard Options	
Lines	Connectors
70 lines rated 2A, 150VDC	2x37pin D-Sub
45 lines rated 2A, 150VDC +10 lines rated 5A, 150VAC	1x 50pin D-Sub
	1x 15pin D-Sub
45 lines rated 2A, 150VDC +4 lines rated 20A, 400VDC	1x 50pin D-Sub
	1x 5pin D-Sub (5W5)

## Options:

- Customized table top, slipping and connector configurations (dynamic specification subject to change)
- Electromechanical brakes (for "noiseless" bias stability tests)
- Contactless Ethernet slipping for 1 Gbit/s
- RF (up to 18 GHz) rotary joints for GPS signals up to 2 channels
- Fiber optic rotary joints for highest data rates up to 32 channels
- Gas/fluid rotary joints
- Installation support, training, and verification

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ACUTRONIC



The Driving Force in Motion Simulation



AC3327

AC3327-TC

Unit Under Test (UUT) Mechanical Interface	
Load Capacity nominal/maximal/option	5 kg/ 10 kg/ 15 kg*
Table Top Diameter, including connectors	Standard ø300, up to ø450
Hole Pattern	Standard 50mm or 2" grid
Offset to Elevation Axis	90 mm

\* Heavy payloads may require modifications to counteract sagging effects.

Specifications	Inner Axis	Middle Axis	Outer Axis	Inner Axis	Middle Axis	Outer Axis
Angular Freedom		continuous			continuous	
Position Accuracy arc sec RSS	<1	<1.5	<1	<1	<1.5	<1
Command resolution		0.00001 deg			0.00001 deg	
Repeatability		< 1 arc sec			< 1 arc sec	
Rate Range standard/option	1'500 / 2'000	400 / 500	400 / 500	1'500 / 2'000	400 / 500	400 / 500
Stability – over 360 deg		0.0005%			0.0005%	
– over 10 deg		0.005%			0.005%	
– over 1 deg		0.05%			0.05%	
Command resolution		0.00001 deg/sec			0.00001 deg/sec	
Maximum Acceleration** standard/option	10'000 / 20'000	300 / 1'000	300 / 400	10'000 / 20'000	300 / 1'000	300 / 400
Bandwidth** at -3dB	80 Hz	15 Hz	15 Hz	80 Hz	15 Hz	15 Hz
Mechanical Wobble standard/option	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 3sec	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 1sec	< 5sec/ < 3sec	< 5sec/ < 1sec
Orthogonality standard/option		< 3sec/ < 1sec			< 3sec/ < 1sec	
Command and Control	Multi-axis digital motion controller ACUTROL® 3000e					
Communication Interfaces	Ethernet TCP/IP, Real-Time expansion card optional					

\*\* Values are UUT dependent and can be provided upon request if UUT characteristics are available.

Dimensions and Weight	
Table (L x W x H) incl. rotational clearance	1'700 mm x 1'700 mm x 2'100 mm
Weight	min. 700 kg
Height of Table Top (from floor)	1'575 mm
Electrical Cabinet (L x W x H), Weight	600 x 820 x 2'200 mm; 320 kg

Temperature Chamber (TC), TCC (CO2) or TCN (LN2) Cooling System	
Working volume	ø300 up to 240mm height
Temperature Range of TCC or TCN	-55 / +100 °C
Thermal Gradients (peak) of TCC or TCN	-4 °C/min / +2 °C/min according to standard IEC 60068
Stability	± 1 °C

Slipping Standard Options to UUT	
Lines	Connectors
52 lines rated 2A, 150VDC	2x37pin D-Sub
28 lines rated 2A, 150VDC +10 lines rated 5A, 150VAC	1x 50pin D-Sub 1x 15pin D-Sub
28 lines rated 2A, 150VDC +4 lines rated 20A, 400VDC	1x 50pin D-Sub 1x 5pin D-Sub (5W5)

**Options:**

- Customized table top, slirling and connector configurations
- Electromechanical brakes (for "noiseless" bias stability tests)
- Contactless Ethernet slirling for 1 Gbit/s
- RF (up to 18GHz) rotary joints for GPS signals up to 2 channels
- Fiber optic rotary joints for highest data rates up to 32 channels

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**ติดต่อสอบถาม**

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา  
744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000  
โทรศัพท์: 044-233-073 ต่อ 3410 โทรสาร: 044-233-074  
หัวหน้าสาขาวิชา 097-3348815  
ผู้ประสานงาน 084-0307600, 080-0274156  
อีเมล : [menett2018@gmail.com](mailto:menett2018@gmail.com)  
Facebook : [www.facebook.com/menett2018](http://www.facebook.com/menett2018)  
เว็บไซต์ : <http://mit.ec.rmutt.ac.th/menett2018>

**การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล  
แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32**  
The 32<sup>nd</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand

**นวัตกรรมพื้นบ้านสู่งานวิจัยวิศวกรรมเครื่องกล**  
Local Innovations toward Mechanical Engineering Research

วันที่ 3-6 กรกฎาคม 2561  
ณ โรงแรม มุกดาหาร แกรนด์ อ.เมือง จ.มุกดาหาร




สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## การปรับเทียบ IMU ชนิดต้นทุนต่ำด้วยวิธีการที่มีประสิทธิภาพและง่ายต่อการใช้งาน Robust and Easy Methods to Implement for Low-cost IMU Calibration

อานันท์ สุดสงวน<sup>1</sup>, ปิจิราวุธ เวียงจันทา<sup>2</sup> และ ณัฐวุฒิ เตไปวา<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

<sup>2</sup> กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ เลขที่ 204 ถนนสุขุมวิท ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270

\*ติดต่อ: 59601105@kmitl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 095-464-0719

### บทคัดย่อ

บทความนี้จะนำเสนอวิธีการปรับเทียบ IMU ชนิดต้นทุนต่ำ (Low-cost Inertial Measurement Unit) ซึ่งประกอบด้วยตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ชนิดสามแกน ซึ่งจะทำการปรับเทียบโดยไม่ต้องใช้โต๊ะปรับระดับที่มีความแม่นยำสูง โดยจะใช้ระบบสมองกลแบบฝังตัว (Microcontroller) ในการบันทึกค่าที่วัดได้ และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ Sensor Error Model (SEM) ได้แก่ สเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) การเยื้องแนวแกน (Misalignment) หรือคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (orthogonality) และค่าไบแอส (Bias) โดยในส่วนของตัวรับรู้ความเร่งจะใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Nonlinear Least-Squares) และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจะใช้วิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization โดยใช้โปรแกรม MATLAB หลังจากการปรับเทียบสามารถลดความผิดพลาดของการวัดค่าเซนเซอร์ IMU ได้ประมาณ 2-10%

**คำหลัก:** ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม, ตัวรับรู้ความเร่ง, วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง, Inertial Measurement Unit, Cholesky decomposition, LU factorization

### Abstract

This document instructs proper methods of low-cost IMU calibration, which includes accelerometers and gyroscopes triad. The high-accuracy leveling table will not be required to collect value of attitude, with a micro-controller, and connected to computers then calculate parameter values of SEM, which are scale factors, misalignment or orthogonality, and bias. Accelerometer calibration will be applied 'Nonlinear Least-Squares' in calculating, and gyroscope calibration will be using Cholesky decomposition and LU Factorization methods by MATLAB. The errors of IMU can be decreased 2-10% after the calibration.

**Keywords:** Accelerometer, Gyroscope, Nonlinear Least-Squares, Inertial Measurement Unit, Cholesky decomposition, LU factorization



### 1. บทนำ

ระบบ IMU (Inertial Measurement Unit) เป็นระบบหนึ่ง ซึ่งบรรจุในระบบนำร่องด้วยแรงเฉื่อย (Inertial Navigation System : INS) มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ตัวรับรู้ความเร่ง และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม [8] ซึ่งเป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่สำคัญของระบบ Motion Sensing และระบบ Control มีความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในสาขาต่างๆ ทั้งทางทหารและพลเรือน เช่น Robotics ระบบควบคุมการยิง หรือแม้กระทั่งระบบควบคุมอัตโนมัติของยานต่างๆ (เรือ อากาศยาน ยานใต้น้ำ) เป็นต้น หลักการทำงานของ IMU (Inertial Measurement Unit) ใช้ค่าที่วัดได้จาก Inertial Sensors ประกอบไปด้วยเซนเซอร์ 2 ประเภท คือ ตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) และ ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) มาประมวลผลรวมกัน

ในปัจจุบัน IMU แบบ Micro Electro Mechanical System (MEMS) ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนมีความสามารถที่สูงขึ้น ราคาถูกลง ใช้พลังงานต่ำ และมีน้ำหนักเบา ถึงแม้ว่า MEMS จะมีข้อได้เปรียบดังกล่าวมาในข้างต้น แต่ก็ยังมีความผิดพลาดเนื่องจากค่าไบแอส (Bias) ของตัวเซนเซอร์ ค่าความผิดพลาดเนื่องจากการวางตัวของเซนเซอร์ที่ไม่เป็นไปตามแกนตั้งฉาก ค่าความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิ รวมทั้งความผิดพลาดจากกระบวนการผลิต ซึ่งจากความผิดพลาดต่างๆ ดังที่กล่าวมานั้น ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดด้วย IMU มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง ดังนั้นก่อนที่จะนำ IMU ไปใช้จึงควรปรับเทียบเสียก่อน [9] เพื่อให้เกิดความถูกต้องในการอ่านค่ามากที่สุด

วัตถุประสงค์ของบทความฉบับนี้ จะทำการนำเสนอวิธีการปรับเทียบ IMU อย่างละเอียดทีละขั้นตอน เพื่อให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงขั้นตอนและแนวคิดที่ใช้ในการปรับเทียบ เนื่องจากในปัจจุบันมีวิธีการปรับเทียบต่างๆ มากมาย ทั้งแบบที่ต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำและราคาสูง [4] ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมสำหรับทุกคน เราจึงนำเสนอแนวทาง

ที่ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนต่ำ [1,3] ซึ่งมีความเหมาะสมกับเซนเซอร์ IMU แบบ MEMS ถึงแม้จะใช้อุปกรณ์ในการปรับเทียบที่มีความแม่นยำไม่สูง แต่ผลของการปรับเทียบทั้ง ตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) และ ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) สามารถที่จะให้ค่าที่มีความถูกต้องแม่นยำได้

### 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความ

#### คลาดเคลื่อนของเซนเซอร์

การพัฒนาสมการปรับเทียบ มีเป้าหมายเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่มีอยู่กับเซนเซอร์ตามธรรมชาติของการวัดทุกประเภท ก่อนนำค่าที่วัดได้ไปใช้จริง และเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะเซนเซอร์ที่ต้องการความแม่นยำสูง ถึงอย่างไรก็ตามก่อนที่จะพัฒนาสมการปรับเทียบได้นั้น จำเป็นจะต้องพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ (Sensor Error Model : SEM) ที่จะใช้ก่อน ซึ่งปัจจุบันรูปแบบของสมการที่จะมีความคล้ายคลึงกัน [11] ซึ่งจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับขั้นตอนและวิธีการการปรับเทียบที่เลือกใช้

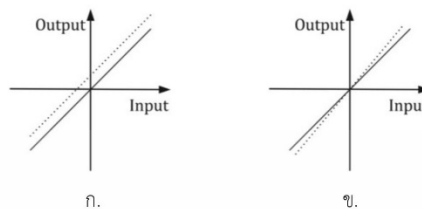
#### 2.1 แบบจำลองความคลาดเคลื่อนของตัวรับรู้ความเร่ง

มาตรฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ที่ใช้กับ IMU (Inertial Measurement Unit) ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลักคือ สเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) การเอียงแนวแกน (Misalignment) หรือคุณสมบัติเชิงตั้งฉาก (orthogonality) และค่าไบแอส (Bias) ซึ่งค่า SME ของตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) [10,12] ถูกกำหนดไว้ดังนี้

$$u_a = T_a S_a (y_a - b_a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{ax} & 1 & 0 \\ \alpha_{ay} & \alpha_{ax} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{ax} & 0 & 0 \\ 0 & S_{ay} & 0 \\ 0 & 0 & S_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{ax} \\ y_{ay} \\ y_{az} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{ax} \\ b_{ay} \\ b_{az} \end{bmatrix} \quad (1)$$



จากสมการข้างต้น  $u_a$  คือค่าเวกเตอร์ของตัวรับรู้ความเร่งขดเชย ที่สอดคล้องกับการประมาณค่าความเร่งที่ใช้ ขนาดของความเร่ง  $1g$  มีค่าเท่ากับความเร่งโน้มถ่วงวัดบนผิวโลก (มีค่าเท่ากับ  $9.80665 \text{ m/s}^2$ ),  $T_a$  คือการแปลงเวกเตอร์จากระบบพิกัดที่ไม่เป็นมุมฉาก (non-orthogonal) ให้เป็นมุมฉาก (orthogonal),  $S_a$  คือค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor),  $y_a$  คือค่าเวกเตอร์ของการเร่งความเร็วที่วัดได้ และ  $b_a$  คือค่าไบแอส (Bias)



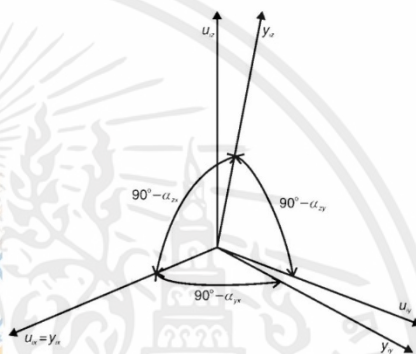
รูปที่ 1 (ก) ไบแอส และ (ข) สเกลแฟกเตอร์

**2.2 แบบจำลองความคลาดเคลื่อนของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม**

ในกรณีของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) [2] ค่า SEM กำหนดไว้ดังนี้

$$y_g - b_g = S_g T_g M_g u_g = \begin{bmatrix} S_{g_x} & 0 & 0 \\ 0 & S_{g_y} & 0 \\ 0 & 0 & S_{g_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{yx} & 1 & 0 \\ \alpha_{zx} & \alpha_{zy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{gx} \\ u_{gy} \\ u_{gz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดยที่  $y_g$  เป็นเวกเตอร์ของอัตราเชิงมุมที่วัดได้โดยระบบที่ถูกปรับเทียบ,  $b_g$  คือค่าขดเชยที่กำหนดคอนการปรับเทียบ (Bias),  $S_g$  คือค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor),  $T_g$  คือแปลงเวกเตอร์จากระบบพิกัดที่ไม่เป็นมุมฉาก (non-orthogonal) ให้เป็นมุมฉาก (orthogonal),  $M_g$  คือค่าการเอียงแนวแกน (Misalignment) ซึ่งอธิบายถึงการ Direction Cosine Matrix (DCM) ของการเปลี่ยนเวกเตอร์จากแกนอ้างอิงบนยานพาหนะ b-frame ไปยังแกนอ้างอิงที่ i-frame,  $u_g$  คือเวกเตอร์อัตราเชิงมุมอ้างอิง และ  $\varphi, \theta, \psi$  คือ roll, pitch และ yaw แทนมุมออยเลอร์ตามลำดับ โดยที่  $c_\varphi = \cos\theta$  และ  $s_\varphi = \sin\theta$  เป็นต้น



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแกน  $y_i$  ที่ไม่เป็นมุมฉาก และแกน  $u_i$  ที่เป็นมุมฉาก

**2.3 การพัฒนาสมการปรับเทียบ**

การพัฒนาสมการปรับเทียบ (Calibration Algorithm) ตามทฤษฎีแล้วไม่มีเซ็นเซอร์ใดที่มีความสมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ค่าสเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) คือตัวแปรที่นำมาใช้ในการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ output เมื่อเทียบกับ input (Sensitivity) ของเซ็นเซอร์ และค่าไบแอส (Bias) คือตัวแปรที่นำมาใช้ในการเผื่อความคลาดเคลื่อนของ Bias (Zero-Rate Output) และการเอียงแนวแกน (Misalignment) เป็นตัวแปรที่เพิ่มเข้ามา โดยเฉพาะ สำหรับเซ็นเซอร์ที่ใช้ใน IMU ในทางทฤษฎีเมื่อต้องการวัดค่าความเร่ง ความเร็วเชิงมุม หรือสนามแม่เหล็กโลก เพื่อคำนวณหาหม้ออ้างอิง (Attitude) จะต้องวัดแกนคาร์ทีเซียน (Cartesian) ทั้ง 3 แกน (x, y, z) ในบทความฉบับนี้ได้ทำการสมมติให้สัญญาณรบกวน



(noise) ของค่าการวัด เป็น zero-mean Gaussian white noise [8] กล่าวคือ  $E[n] = 0$  ดังนั้นจะเขียนได้ว่า

$$E[y_i] = E[\tilde{y}_i] - E[n] = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{y}_i \quad (3)$$

โดยที่  $\tilde{y}_i$  คือค่าของ  $y_i$  ที่วัดได้ ( $y_i = \tilde{y}_i - n$ ),  $n$  คือสัญญาณรบกวนของค่าการวัด และ  $m$  คือจำนวนครั้งที่วัดในแต่ละตำแหน่ง

หลักของสมการปรับเทียบ (Calibration Algorithm) คือการประมาณค่าสเกลเพกเตอร์ (Scale Factor) การเอียงแนวแกน (Misalignment) หรือคุณสมบัติตั้งฉาก (orthogonality) และค่าไบแอส (Bias) ซึ่งในทางปฏิบัติสำหรับเซ็นเซอร์ที่ต้องการความแม่นยำสูงจะต้องใช้อุปกรณ์ เช่น โต๊ะปรับระดับที่มีความแม่นยำสูง เพื่อสั่งการให้เซ็นเซอร์เคลื่อนที่ไปตามที่ๆ กำหนดไว้ได้อย่างแม่นยำ เพื่อวัดผลการตอบสนอง และคำนวณค่าปรับเทียบ

เทคนิคที่นำเสนอในบทความฉบับนี้ ใช้เทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือปรับเทียบที่มีความแม่นยำสูง แต่สามารถใช้งานได้ ซึ่งไม่มีผลต่อการใช้งาน เนื่องจากเซ็นเซอร์ที่ใช้ไม่ใช่เซ็นเซอร์ระดับ Navigation Grade ที่มีความแม่นยำสูง

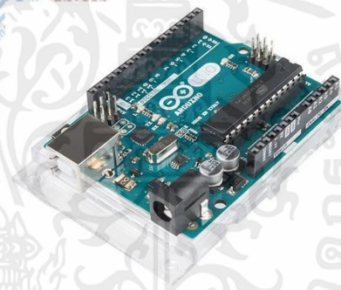
### 3. ขั้นตอนและวิธีการปรับเทียบเซ็นเซอร์ IMU

บทความฉบับนี้ได้เลือกทดสอบกับ IMU ยี่ห้อ Shenzhen รุ่น GY-521 ราคา 110 บาท เป็นเซ็นเซอร์แบบต้นทุนต่ำ (Low-cost IMU) ซึ่งในรุ่น GY-521 นั้นเป็นโมดูล ตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในตัวเดียวกัน บนโมดูลประกอบด้วยชิป MPU6050 ส่งข้อมูลผ่าน Bus I2C ใช้ในการหาค่าของการเคลื่อนไหวทั้ง 3 แกน และทิศทางของการเคลื่อนที่



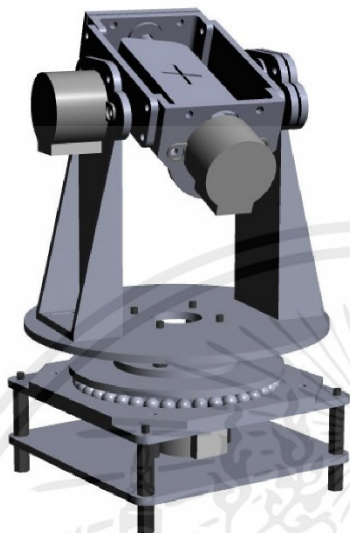
รูปที่ 3 IMU รุ่น GY-521 (MPU6050)

โดยจะทำการเก็บข้อมูล และติดต่อกับตัวรับรู้ เพื่อส่งข้อมูลไปวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์ โดยใช้ Arduino Uno R3 ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source (คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา) ซึ่งทำการรับส่งข้อมูลระหว่าง Arduino Uno R3 ทั้งสองตัวผ่าน XBee (2mW Wire Antenna - Series 2 ZB)



รูปที่ 4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

และได้ทำการออกแบบเครื่องทดสอบเซ็นเซอร์ขึ้นใหม่เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งสร้างขึ้นจากอะคริลิกและชิ้นส่วนโมเดล 3D ปริ้นเตอร์ พร้อมทั้งใช้มอเตอร์ (RoHS Step Motor 28BYJ-48 12V DC) ในการควบคุมรอบและตำแหน่งในการหมุน และใช้ดิจิตอลเซ็นเซอร์ (Digital Level 150 mm WEN-150 : ความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง) ในการวัดมุมเอียง ซึ่งมอเตอร์ทั้งสามตัวของเครื่องทดสอบเซ็นเซอร์จะถูกเขียนโปรแกรมควบคุมรอบและองศาในการหมุนด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบเซนเซอร์ IMU : 6dof

บทความฉบับนี้จะทำการแบ่งการปรับเทียบออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) และการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) โดยตัวรับรู้ทั้งสองจะถูกเก็บค่า แล้วนำมาทำการประมวลผลแบบออฟไลน์ ด้วยโปรแกรม MATLAB

**3.1 การปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง**

การปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) ในการปรับเทียบจะต้องทำการเก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ ในตำแหน่งทิศทางต่างๆ (Orientations) ภายใต้สภาวะคงที่ เพราะแรงโน้มถ่วงมีผลกระทบต่อระบบ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการมีทั้งสิ้นจำนวน 9 ตัว จึงควรที่จะเก็บค่ามากกว่า 9 ตำแหน่ง และจากการศึกษา [7] ค่าที่เก็บไม่ควรน้อยกว่า 21 ตำแหน่ง เพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด และไม่เสียเวลาในการเก็บค่ามากเกินไป

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการเก็บค่า (Orientations) ทั้งสิ้น 24 ตำแหน่ง จากรูปที่ 6 ได้

นำเสนอวิธีการเก็บข้อมูลของตัวรับรู้ความเร่ง ในตำแหน่งทิศทางต่างๆ (Orientations) หมุนรอบแกน z ซึ่งจะได้ทั้งสิ้น 8 ตำแหน่ง และทำซ้ำวิธีการดังกล่าวในการเก็บค่ารอบแกน x และแกน y ทำให้สามารถเก็บข้อมูลได้ทั้งสิ้น 24 ตำแหน่ง ซึ่งข้อได้เปรียบของวิธีการนี้คือไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับทิศทาง ซึ่งทำให้ผู้ที่เริ่มต้นศึกษาสามารถเก็บข้อมูลได้ง่าย และไม่สับสนในการวางตำแหน่งทิศทางของตัวรับรู้ความเร่ง

นอกจากนี้เมื่อทำการเก็บข้อมูลของตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) ในแต่ละตำแหน่ง ควรหยุดนิ่งให้อยู่ภายใต้สภาวะคงที่ เพื่อช่วยให้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีความถูกต้อง และลดอิทธิพลของสัญญาณรบกวน (noise) อีกทั้งยังควรที่จะอุ่นเครื่องตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) ก่อนที่จะทำการปรับเทียบ เพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิ



รูปที่ 6 ตำแหน่งต่างๆ ในการเก็บข้อมูลที่แนะนำสำหรับการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง (หมุนรอบแกน z)

**3.1.1 ขั้นตอนการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง**

สำหรับขั้นตอนการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) เมื่อทำการเก็บข้อมูลของตัวรับรู้ความเร่งในตำแหน่งทิศทางต่างๆ ข้อมูลดิบเหล่านั้นจะถูกคำนวณหาค่าเฉลี่ยของการวัดแต่ละ Orientations ซึ่งมีหลายวิธีการ (algorithm) ที่สามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ 9 ตัว ของ SEM ยกตัวอย่างเช่น วิธีการ Gauss-Newton algorithm [4] หรือ Quasi-Newton factorization algorithm [13] เป็นต้น ซึ่งบทความฉบับนี้ขอเสนอวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Nonlinear Least-Squares) โดยใช้ฟังก์ชัน



Optimization Toolbox ของโปรแกรม MATLAB ซึ่งขั้นตอนการปรับเทียบและวิธีการสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เปิดการทำงานตัวรับรู้ความเร่ง เพื่ออุ่นเครื่องตัวรับรู้ก่อนที่จะทำการปรับเทียบ เพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิและรักษาสภาพการทำงาน
2. เก็บข้อมูลของเซ็นเซอร์ ในตำแหน่งทิศทางต่างๆ (Orientations) ภายใต้อุณหภูมิที่ 24 ตำแหน่ง
3. คำนวณค่าการวัดเฉลี่ยในตำแหน่งทิศทางต่างๆ เพื่อลดอิทธิพลของสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม และใช้ผลลัพธ์เป็นอินพุตสำหรับวิธีการประมาณค่า
4. ประมาณค่า SEM โดยใช้อัลกอริทึมจากฟังก์ชันการลดขนาด (lsqnonlin) เป็นฟังก์ชันเกณฑ์สำหรับ Root Mean Square Error (RMSE) ถูกใช้ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการประมาณค่าที่กำหนดไว้

$$RMSE(x, G) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (a_i(x) - G)^2}{m}} \quad (4)$$

เมื่อ  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$  คือตัวแปรไม่ทราบค่าของ SEM ทั้ง 9 ตัว,  $G$  คือขนาดของเวกเตอร์แรงโน้มถ่วงมีค่าเท่ากับ  $1g$ ,  $|a_i(x)|$  คือขนาดของเวกเตอร์การเร่งความเร็วที่ชัดเจนในแต่ละขั้นตอน และ  $m$  คือตำแหน่งทิศทางในการวัดทั้ง 24 ตำแหน่ง

5. เมื่อทำการประมาณค่า SEM เรียบร้อยแล้ว ค่าข้อมูลดิบของ RMSE จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าประมาณของ SEM เพื่อยืนยันความถูกต้องของค่าที่ประมาณไว้

### 3.2 การปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

การปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในการปรับเทียบจะมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความละเอียด และประสิทธิภาพของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมนั้นๆ ซึ่งในที่นี่เราสมมติให้อัตราเชิงมุมของโลกมีค่าใกล้เคียงกับค่าความละเอียดของตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ดังนั้นจึงไม่สามารรถใช้สำหรับการปรับเทียบได้ ในกรณีนี้การปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมจึงจำเป็นต้องมีการ

หมุนรอบแกนทั้งสามเพื่อทำการเก็บข้อมูล และใช้ในการประมาณค่ามุมอ้างอิง

ในการปรับเทียบจะทำการเก็บค่าข้อมูลจากการหมุนรอบแกนทั้งสาม โดยจะทำการหมุนรอบแกนทีละแกนเพื่อทำการเก็บข้อมูล ซึ่งการเก็บข้อมูลในแต่ละแกนควรที่จะใช้เวลาให้น้อยที่สุด เพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน (angle random walk) ซึ่งข้อผิดพลาดที่เกิดจาก ARW นั้น ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการปรับเทียบ โดยทั่วไปแล้วค่าของ IMU ชนิด MEMS จะอยู่ที่ประมาณ  $2^\circ / h^{1/2}$  ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดอยู่ที่ประมาณ  $0.2^\circ / 30s$  ซึ่งในการเก็บข้อมูลรอบแกนในแต่ละแกนจะใช้เวลาไม่เกิน 20 วินาที ซึ่งทำให้ค่า stochastic errors ไม่จำเป็นต้องนำมาคิด

ก่อนที่จะทำการปรับเทียบ จะต้องทำการกำหนดแนวแกนเฉพาะของ IMU ด้วยแกนหมุนแพลตฟอร์ม โดยทำให้ค่ามีความถูกต้อง  $\pm 1^\circ$  ซึ่งค่าดังกล่าวอาจจะส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดต่ออัตราเชิงมุมอยู่ที่ประมาณ  $0.02\%$  ซึ่งจะถือว่าความผิดพลาดดังกล่าวไม่มีความสำคัญในการเก็บข้อมูล ซึ่งถ้าหากไม่มีการกำหนดแนวแกนการหมุนอาจทำให้เกิดความผิดพลาดของมุมในการหมุนที่ได้ทำการกำหนดไว้

#### 3.2.1 ขั้นตอนการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

สำหรับขั้นตอนการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) มีวิธีที่สามารถประยุกต์ใช้ในการปรับเทียบได้หลายวิธีการ (algorithm) ซึ่งวิธีการบางอย่างจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์พิเศษที่มีราคาแพง หรือบางวิธีมีวิธีการที่ซับซ้อน และต้องใช้ระยะเวลาในการ [5,6] ดังนั้นในบทความฉบับนี้จึงเสนอวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการปรับเทียบ IMU ชนิดต้นทุนต่ำ โดยจะทำการปรับเทียบโดยไม่ต้องใช้วิธีการที่มีราคาแพง หรืออุปกรณ์พิเศษ ซึ่งจะใช้วิธีการที่ง่ายและไม่ซับซ้อน แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการใช้งาน ซึ่งเหมาะสำหรับบุคคลทั่วไปที่ให้ความสนใจ



วิธีการที่ใช้ในบทความฉบับนี้จะใช้วิธีการของ Cholesky decomposition และ LU factorization ในการจัดรูปแบบเมทริกซ์ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณการหมุน 3 มิติ โดยอัตราความเร็วเชิงมุมจะถูกขจัดเซยเพื่อแก้ค่าความคลาดเคลื่อน โดยการประมาณค่าเฉลี่ยของค่าเอาต์พุตตามช่วงเวลาในขณะหยุดนิ่ง โดยใช้  $(y_g - b_g)$  และจะได้ค่า  $u_g$  และเมื่อนำค่ามาอินทิเกรตจะได้ค่ามุมในเมทริกซ์  $Y_g$  และ  $U_g$  ที่บอกมุมอ้างอิงสำหรับการหมุน จะได้ว่า

$$Y_g = S_g T_g M_g U_g \quad (5)$$

กระบวนการดังกล่าวสามารถแก้ใน angle domain โดยที่อัลกอริทึมนี้จะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่  $S_g$  เป็น diagonal matrix และ  $T_g$  เป็น lower triangular matrix และ  $M_g$  เป็น orthonormal matrix ซึ่งปรับสมการโดยให้ด้านซ้ายมือเป็นค่าที่ได้จากการวัด และด้านขวามือเป็นค่าที่ต้องการหา

$$(Y_g U_g^{-1}) = S_g T_g M_g \quad (6)$$

มีค่าเท่ากับ

$$(Y_g U_g^{-1})(Y_g U_g^{-1})^T = (S_g T_g M_g)(S_g T_g M_g)^T \quad (7)$$

สามารถจัดรูปได้เป็น

$$(Y_g U_g^{-1})(Y_g U_g^{-1})^T = (S_g T_g)(S_g T_g)^T \quad (8)$$

แก้เมทริกซ์โดยใช้ Cholesky decomposition โดยใส่เมทริกซ์  $(Y_g U_g^{-1})(Y_g U_g^{-1})^T$  เพื่อให้ได้ lower triangular matrix  $(S_g T_g)$  โดย

$$(S_g T_g) = \text{chol}[(Y_g U_g^{-1})(Y_g U_g^{-1})^T] \quad (10)$$

ทำการหาค่า  $S_g$  และ  $T_g$  โดยใช้ LU factorization ในเมทริกซ์  $(S_g T_g)$  และจะได้ alignment matrix  $M_g$  โดย

$$[S_g T_g] = LU(S_g T_g) \quad (11)$$

$$M_g = T_g^{-1} S_g^{-1} Y_g U_g^{-1} \quad (12)$$

ซึ่งขั้นตอนการปรับเทียบ และวิธีการสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เปิดการทำงานตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม เพื่ออุ่นเครื่องตัวรับรู้ก่อนที่จะทำการปรับเทียบ เพื่อป้องกันผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิและรักษาสภาพการทำงาน (Sampling time = 0.12 s)
2. ทำการจัดแนวแกน z กับแกนหมุนของแพลตฟอร์ม
3. วัดค่าตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมภายใต้สภาวะหยุดนิ่งเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที จากนั้นให้ทำการหมุน (20 deg/s) เพื่อวัดผลลัพธ์ และประมาณค่ามุมอ้างอิงของการหมุน
4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 และ 3 โดยหมุนรอบแกน x และแกน y โดยจะต้องทำการจัดแนวแกนในการหมุนก่อนเสมอ
5. เลือกช่วงข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูล เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยเพื่อประมาณค่าไบแอส จากนั้นทำการแยกข้อมูลออกจากข้อมูลที่วัดได้
6. เลือกช่วงเวลาและทำการอินทิเกรตเพื่อหาค่า  $Y_g$  และ  $U_g$  ช่วงเวลาของการเคลื่อนที่อาจถูกตรวจพบได้ โดยการตั้งค่าเกณฑ์ที่เหมาะสม ซึ่งจะแยกการเคลื่อนที่เฉพาะออกจากสภาวะหยุดนิ่ง
7. ทำการประมาณค่า SEM โดยใช้วิธีการปรับเทียบของ Cholesky decomposition และ LU factorization

#### 4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองหลังจากการปรับเทียบ IMU รุ่น GY-521 จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง (Accelerometer) และผลการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) โดยจะมีการอธิบายผลที่ได้จากการปรับเทียบ พร้อมทั้งแนวทางการนำไปใช้งานซึ่งจะแสดงดังต่อไปนี้



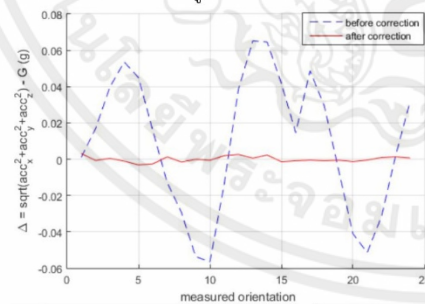
**4.1 ผลการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง**

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง

IMU ยี่ห้อ Shenzhen รุ่น GY-521		
$S_a$	$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ (deg)	$b_a$ (g)
1.0013	-0.0006	0.0497
0.9946	-0.0048	-0.0145
0.9844	0.0050	-0.0369
ผลรวม RMSE ก่อนการปรับเทียบ		0.038606
ผลรวม RMSE หลังการปรับเทียบ		0.001548

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของค่า RMSE ก่อนและหลังการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง ซึ่งมีค่าผลรวม RMSE ก่อนการปรับเทียบอยู่ที่ 0.038606 g และหลังการปรับเทียบมีค่าอยู่ที่ 0.001548 g ซึ่งหลังจากใช้วิธีการปรับเทียบดังกล่าวทำให้ตัวรับรู้ความเร่งมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น 92.29 %

หลังการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่งโดยใช้ค่าจากการเก็บข้อมูลทั้ง 24 ตำแหน่ง ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 9 ตัว ดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อทำให้ผู้ศึกษาเข้าใจถึงวิธีการนำไปใช้ และเพื่อทำให้การอ่านค่าสามารถสังเกตได้ง่าย จึงทดสอบโดยการเก็บข้อมูลทั้ง 6 ตำแหน่ง ตามตารางที่สอง เพื่อทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์เสมือนการใช้งานจริงว่ามีความถูกต้องมากเพียงใด



รูปที่ 7 แผนภาพแสดงค่าความคลาดเคลื่อนก่อนและหลังการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง

ตารางที่ 2 แสดงค่าข้อมูลทั้ง 6 ตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบค่าที่ได้จากพารามิเตอร์หลังการปรับเทียบ

ตำแหน่ง	x-axis (g)	y-axis (g)	z-axis (g)
1	1	0	0
2	-1	0	0
3	0	1	0
4	0	-1	0
5	0	0	1
6	0	0	-1

รูปที่ 8 แสดงให้เห็นการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้ในแกน x พบว่าก่อนการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.049 g และหลังการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.000 g

รูปที่ 9 แสดงให้เห็นการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้ในแกน -x พบว่าก่อนการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ -0.948 g และหลังการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ -0.999 g

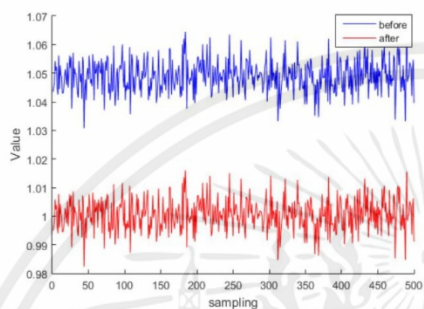
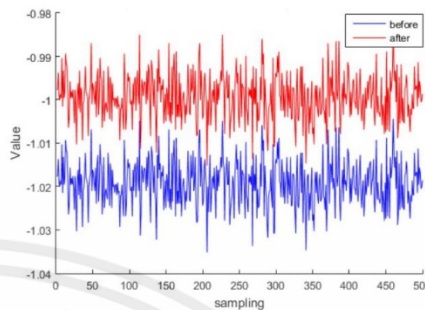
รูปที่ 10 แสดงให้เห็นการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้ในแกน y พบว่าก่อนการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.992 g และหลังการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.001 g

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้ในแกน -y พบว่าก่อนการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ -1.019 g และหลังการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ -0.999 g

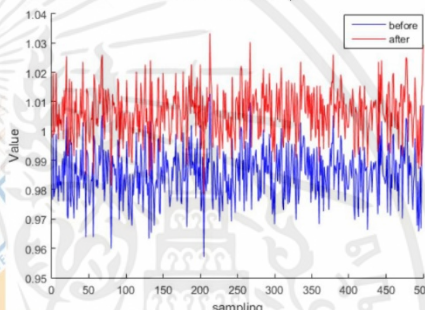
รูปที่ 12 แสดงให้เห็นการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้ในแกน z พบว่าก่อนการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.985 g และหลังการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.006 g



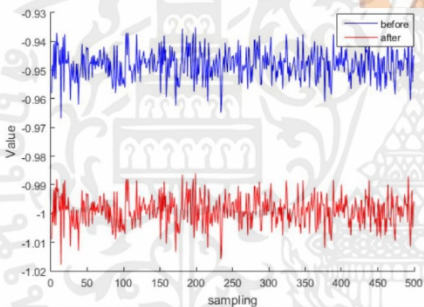
รูปที่ 13 แสดงให้เห็นการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้ในแกน -z พบว่าก่อนการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ -1.054 g และหลังการปรับเทียบค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยประมาณ -1.001 g



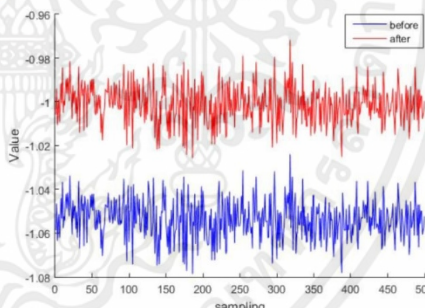
รูปที่ 11 แผนภาพแสดงค่าข้อมูลก่อนและหลังการปรับเทียบในแกน -y



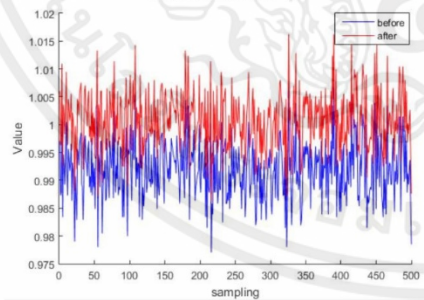
รูปที่ 8 แผนภาพแสดงค่าข้อมูลก่อนและหลังการปรับเทียบในแกน x



รูปที่ 12 แผนภาพแสดงค่าข้อมูลก่อนและหลังการปรับเทียบในแกน z



รูปที่ 9 แผนภาพแสดงค่าข้อมูลก่อนและหลังการปรับเทียบในแกน -x



รูปที่ 13 แผนภาพแสดงค่าข้อมูลก่อนและหลังการปรับเทียบในแกน -z

รูปที่ 10 แผนภาพแสดงค่าข้อมูลก่อนและหลังการปรับเทียบในแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**4.2 ผลการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม**

ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

IMU ยี่ห้อ Shenzhen รุ่น GY-521					
$S_g$	$\alpha_{xy}, \alpha_{xz}, \alpha_{yz}$	$M_g$			
1.0007	0.0267	0.9967	0.0812	0.0033	
1.0079	-0.0141	-0.0813	0.9965	-0.0216	
1.0074	0.0303	-0.0050	0.0213	0.9998	

จากตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ทั้ง 15 ตัว ที่ได้จากการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ซึ่งค่าความเร็วเชิงมุมก่อนปรับเทียบรอบแกน x, y, z ถูกแสดงในรูปที่ 14, 16, 18 ตามลำดับ และค่าความเร็วเชิงมุมหลังปรับเทียบรอบแกน x, y, z ถูกแสดงในรูปที่ 15, 17, 19 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าความเร็วเชิงมุมก่อนทำการปรับเทียบพบว่าค่าในแนวแกน x มีความคลาดเคลื่อนอย่างชัดเจนในสภาวะหยุดนิ่ง และค่าความเร็วเชิงมุมหลังทำการปรับเทียบแนวแกน x ถูกปรับให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยในส่วนของสภาวะเคลื่อนที่ในแนวแกนที่ไม่ได้ทำการหมุน แต่ผลกราฟแสดงการสั่นเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเทียบมีน้ำหนักเบาทำให้เครื่องเกิดการสั่นเนื่องจากแรงของมอเตอร์ และส่งผลให้แนวแกนเกิดความคลาดเคลื่อน

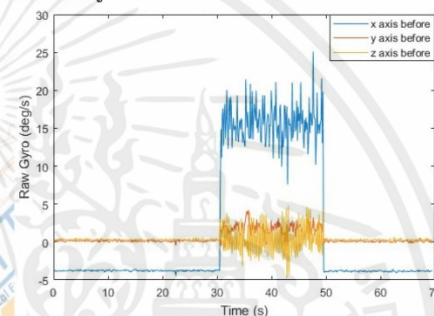
ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่า RMSE ก่อนและหลังทำการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม

IMU ยี่ห้อ Shenzhen รุ่น GY-521					
ก่อนปรับเทียบ (deg)			หลังปรับเทียบ (deg)		
5.3104	3.7551	3.7641	0.0296	0.0777	0.0235
3.7551	0.1058	0.2621	0.0777	0.0326	0.0756
3.7641	0.2621	0.3692	0.0235	0.0756	0.0151

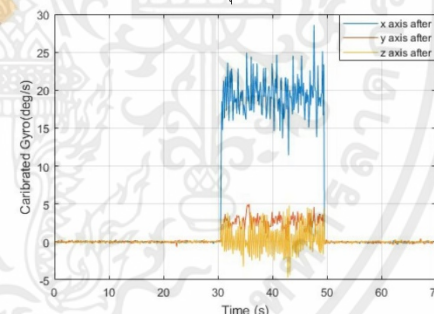
จากตารางการเปรียบเทียบค่า RMSE ระหว่างก่อนและหลังทำการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมข้างต้น

พบว่าหลังจากใช้วิธีการปรับเทียบดังกล่าวทำให้ตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุมในแนวแกน x มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น 98.89 % ในแนวแกน y มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น 52.89 % ในแนวแกน z มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น 92.14 %

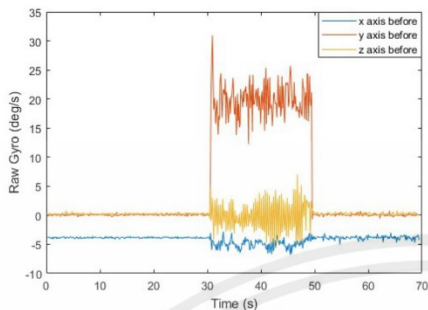
อย่างไรก็ตามในเซนเซอร์แบบเดียวกัน แต่ละตัวอาจให้ผลที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความผิดพลาดของเซนเซอร์ตัวนั้นๆ การปรับเทียบเซนเซอร์ก่อนนำไปใช้งานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง



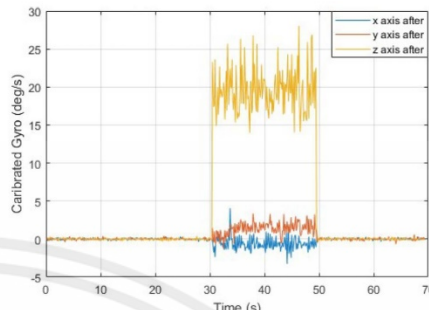
รูปที่ 14 แผนภาพแสดงค่าความเร็วเชิงมุมก่อนการปรับเทียบหมุนรอบแกน x



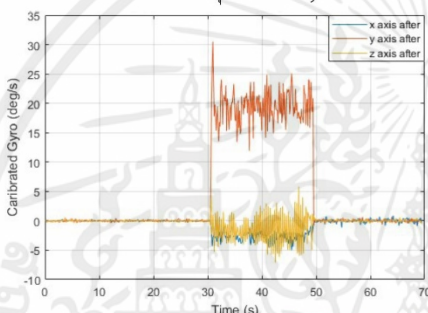
รูปที่ 15 แผนภาพแสดงค่าความเร็วเชิงมุมหลังการปรับเทียบหมุนรอบแกน x



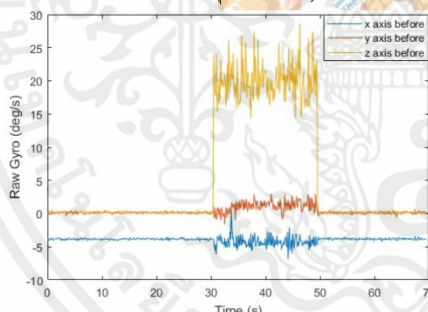
รูปที่ 16 แผนภาพแสดงค่าความเร็วเชิงมุมก่อนการปรับเทียบหมุนรอบแกน y



รูปที่ 19 แผนภาพแสดงค่าความเร็วเชิงมุมหลังการปรับเทียบหมุนรอบแกน z



รูปที่ 17 แผนภาพแสดงค่าความเร็วเชิงมุมหลังการปรับเทียบหมุนรอบแกน y



รูปที่ 18 แผนภาพแสดงค่าความเร็วเชิงมุมก่อนการปรับเทียบหมุนรอบแกน z

**5. สรุปผลการทดลอง**

ในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม ด้วยวิธีการที่ง่ายและประหยัด แต่ยังคงมีประสิทธิภาพสูง โดยการใช้โต๊ะปรับระดับที่ถูกออกแบบขึ้นใหม่ให้มีต้นทุนต่ำ และวัดองค์ศาด้วย Digital Laser พร้อมทั้งใช้การประมวลผลและการอ่านข้อมูลจากตัวรับรู้ด้วยสมองกลแบบฝังตัว (Microcontroller) และทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่าของพารามิเตอร์ในการปรับเทียบ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงตัวรับรู้ความเร่ง และตัวรับรู้ความเร็วเชิงมุม สามารถวัดค่าได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยมีความถูกต้องมากกว่า ค่าก่อนการปรับเทียบ 2 - 10 %

**6. กิตติกรรมประกาศ**

ขอขอบพระคุณ โรงเรียนนายเรือ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ นาวาตรีปิจิราวุธ เวียงจันทา ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตากรุณา พร้อมทั้งให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Ren, Q. Liu, and T. Fu. A Novel Self-Calibration Method for MIMU. IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 10, Oct. 2015.
- [2] D. Jurman, M. Jankovec, R. Kamnik and M. Topic, Calibration and data fusion solution for the miniature attitude and heading reference system, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 138, no. 2, pp. 411-420, 2007.
- [3] D. Tedaldi, A. Pretto, and E. Menegatti. A Robust and Easy to Implement Method for IMU Calibration without External Equipments. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014.
- [4] I. Skog and P. Händel. Calibration of a MEMS inertial measurement unit. Proceeding of XVII IMEKO World Congress, Sep.17-22, 2006
- [5] J. K. Bekkeng, Calibration of a novel MEMS inertial reference unit, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 6, pp. 1967-1974, 2009.
- [6] M. S. Grewal, V. D. Henderson and R. S. Miyasako, Application of Kalman filtering to the calibration and alignment of inertial navigation systems, IEEE Trans. Automatic Control, vol. 36, no. 1, pp. 3-13, 1991.
- [7] M. Sipos, J. Rohac and P. Novacek, Improvement of electronic compass accuracy based on magnetometer and accelerometer calibration, Acta Physica Polonica A, vol. 121, no. 4, pp. 945-949, 2012.
- [8] O. J. Woodman. An introduction to inertial navigation. Technical report, published by the University of Cambridge Computer Laboratory, 2007.
- [9] P. Aggarwal, Z. Syed, X. Niu, and N. El-Sheimy. A Standard Testing and Calibration Procedure for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units. The Journal of Navigation, 61, pp. 323-336, (2008)
- [10] P. Won and F. Golnaraghi, A triaxial accelerometer calibration method using a mathematical model, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 59, no. 8, pp. 2144-2153, 2010.
- [11] W. T. Fong, S. K. Ong and A. Y. C. Nee. Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment. Meas. Sci. Technol, 19, 2008
- [12] Z. Syed, P. Aggarwal, C. Goodall, X. Niu and N. El-Sheimy, A new multi-position calibration method for MEMS inertial navigation systems, Meas. Sci. and Technology, vol. 18, no. 7, pp. 1897-1907, 2007.
- [13] S. Bonnet, C. Bassompierre, C. Godin, S. Lesecq and A. Barraud, Calibration methods for inertial and magnetic sensors, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 156, no. 2, pp. 302-311, Dec. 2009.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายอานันท์ สุตสงวน  
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 7 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2535  
 ที่อยู่ 79 หมู่ 11 ตำบลบางนา อำเภอบาง่าง จังหวัดลพบุรี  
 1191/147 เดอะพาร์คแลนด์คอนโด แขวงบางนา เขตบางนา จังหวัดกรุงเทพฯ  
 ประวัติการศึกษา 2555 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้