

วิธีการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่งชนิดต้นทุนต่ำด้วยเทคนิคกำลังสองสมบูรณ์ที่น้อยที่สุด Calibration Method of Low Cost Accelerometer with Least Mean Squares Technique

ปิจิราวุธ เวียงจันดา^{1,2*}, ไกรสิทธิ์ มหิวรรณ¹, สมศักดิ์ คงโชติ¹ และ ณัฐวุฒิ เดิโปว²

1 กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ ฝายศึกษา โรงเรียนนายเรือ เลขที่ 204 ถนนสุขุมวิท ตำบลปากน้ำ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270

2 สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

*ติดต่อ: pijirawuch.w@navy.mi.th, pijirawuch@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0-2475-3864

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่งชนิดต้นทุนต่ำ (Low-Cost Accelerometer) ในเซนเซอร์ Inertial Measurement Unit (IMU) ด้วยวิธีการกำลังสองสมบูรณ์ที่น้อยที่สุด (Least Mean Squares) โดยไม่ต้องใช้โต๊ะปรับระดับที่มีความละเอียดแม่นยำสูง ตัวรับรู้ความเร่งถูกติดตั้งบนโต๊ะปรับระดับเพื่อปรับตำแหน่ง จำนวน 6 ทิศทางตามแกนของตัวรับรู้ความเร่ง ระบบสมองกลแบบฝังตัวถูกนำมาใช้ในการบันทึกค่าที่วัดได้จากตัวรับรู้ความเร่ง และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิคแบบ Hardware-in-the-Loop (HIL) เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ การเยื้องแนวแกน (Misalignment) สเกลแฟกเตอร์ (Scale Factor) และ ค่าไบแอส (Bias) ด้วยวิธีการแบบกำลังสองสมบูรณ์ที่น้อยที่สุดด้วยโปรแกรมแมทแล็บ (Matlab) หลังจากการปรับเทียบสามารถลดความผิดพลาดของการวัดค่าความเร่งในแต่ละแกนต่างๆ ได้ประมาณ 2 – 10 %

คำหลัก: ตัวรับรู้ความเร่งชนิดต้นทุนต่ำ, Inertial Measurement Unit (IMU), Hardware-in-the-Loop (HIL), วิธีการกำลังสองสมบูรณ์ที่น้อยที่สุด

Abstract

The paper has proposed methods to calibrate low-cost accelerometer which is one of the three main components of inertial measurement unit (IMU) using least mean squares technique. The leveling table which is not required both high accuracy and precision is used to move the sensor on 6 orientations. Embedded system is used to acquire accelerate data and connected with the PC-computer by Hardware-in-the-Loop (HIL) technique. Three parameters of accelerometer as misalignment, scale factor and bias are determined by least mean square method that is programmed by Matlab. Error is reduced around 2 – 10 % in each axis when the parameters of calibration in equation of accelerometer are added.

Keywords: Low-Cost Accelerometer, Inertial Measurement Unit (IMU), Hardware-in-the-Loop (HIL), Least Mean Squares

1. บทนำ

Inertial Measurement Unit (IMU) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญของระบบ Motion Sensing & Control หลากหลาย ทั้งทางทหารและพลเรือน เช่น Robotics, ระบบ Stabilize จานเรดาร์/กล้อง ระบบควบคุมการยิงของปืน ระบบควบคุมอัตโนมัติของยานต่างๆ (เรือ/อากาศยาน/ยานใต้น้ำ) ทั้งที่มีและไม่มีคนบังคับ เป็นต้น

หลักการทำงานของ IMU ในปัจจุบันใช้ค่าที่วัดได้จาก Inertial Sensors 2 ประเภทคือ ตัวรับรู้ความเร่ง (accelerometer) และ ตัวรับรู้การเคลื่อนที่เชิงมุม (gyroscope) สำหรับวัดความเร่งและความเร็วเชิงมุมตามลำดับ มาประมวลผลร่วมกัน

ในหลายๆ ปีที่ผ่านมาเซนเซอร์ IMU แบบ Micro Electro Mechanical System (MEMS) ถูกพัฒนาอย่าง

DRC-01

รวดเร็ว จนมีความสามารถที่สูงขึ้น ราคาถูกลง มีน้ำหนักเบา และใช้พลังงานต่ำ แม้ว่าเซนเซอร์ MEMS มีข้อได้เปรียบดังกล่าวมาในข้างต้น แต่ก็ยังมีความผิดพลาดเนื่องจาก bias ของตัวเซนเซอร์ ความผิดพลาดเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ ความผิดพลาดเนื่องจากการวางตัวเซนเซอร์ที่ไม่ได้ตามแกนตั้งฉาก ความผิดพลาดเนื่องจากผลกระทบของอุณหภูมิ ความผิดพลาดเนื่องจากกระบวนการการผลิต ซึ่งค่าความผิดพลาดเหล่านี้ ทำให้ค่าที่ได้จากการวัดค่าด้วย IMU มีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง

การสอบเทียบเป็นขั้นตอนสำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลอ้างอิงที่ถูกต้อง เกี่ยวกับปริมาณการวัด สำหรับ accelerometer ข้อมูลอ้างอิง มักจะเป็นผลรวมของเวกเตอร์แรงโน้มถ่วง และความเร่งสู่ศูนย์กลางโดยผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ของการปรับเทียบจากสมการจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งที่วัดได้กับความเร่งจริง ซึ่งจะเป็นการแก้ค่าความผิดพลาดที่ได้จากการวัดค่าด้วยเซนเซอร์ให้แสดงค่าที่วัดได้จริง

ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการปรับเทียบตัวรับรู้ความเร่ง (accelerometers) ใน IMU ดันทุนต่ำ ด้วยเทคนิคกำลังสองสมบูรณ์ที่น้อยที่สุด โดยใช้อุปกรณ์ปรับเทียบที่ไม่ต้องการความถูกต้องมากนักแต่ผลการปรับเทียบสามารถที่จะให้ค่าการวัดความเร่งที่มีความถูกต้องได้

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความ

คลาดเคลื่อนของเซนเซอร์

การพัฒนาสมการการปรับเทียบ (Calibration Algorithm) มีเป้าหมายเพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนที่มีอยู่กับเซนเซอร์ตามธรรมชาติของการวัดทุกประเภท ก่อนนำค่าที่วัดได้ไปใช้งานจริง และเป็นสิ่งที่จำเป็นโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับระบบเซนเซอร์ที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ระบบวัดมุมอ้างอิง อย่างไรก็ตาม ก่อนจะพัฒนาสมการการปรับเทียบได้จำเป็นต้องพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ (Sensor Error Model) ที่จะใช้ก่อน

2.1 แบบจำลองความคลาดเคลื่อน (Error Model) ของ Accelerometer

มาตรฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเซนเซอร์ที่ใช้กับ Inertial Measurement Unit (IMU) ไม่ว่าจะเป็น Accelerometer, Rate Gyro และ Magnetometer ประกอบด้วย 3 องค์ประกอบหลัก [1, 2] คือ การเยื้องแนวแกน (Misalignment) สเกลเฟกเตอร์ (Scale Factor) และ ค่าไบแอส (Bias) โดยค่าที่วัดได้จาก Accelerometer เขียนเป็นสมการได้คือ

$$\mathbf{f}^P = \mathbf{f}^{av} + \text{conversion terms} \quad (1)$$

โดยที่

$\mathbf{f}^P$ คือ Specific force ใน platform มีหน่วยเป็น g (m/s^2)

$\mathbf{f}^{av}$ คือ Specific force ใน Accelerometer frame (Sensor frame)

สามารถหาค่า $\mathbf{f}^P$ ได้จากสมการ

$$\mathbf{f}^P = \mathbf{C}_a^P \mathbf{K}_{sf} (\mathbf{f}^{av} - \mathbf{b}) \quad (2)$$

เมื่อ $\mathbf{C}_a^P$, $\mathbf{K}_{sf}$ และ $\mathbf{b}$ คือ ค่าการเยื้องแนวแกน (Misalignment) ค่าสเกลเฟกเตอร์ (Scale Factor) และค่าไบแอส (Bias) ตามลำดับ

โดยที่

$$\mathbf{C}_a^P = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_3 & 1 & -\alpha_4 \\ -\alpha_5 & \alpha_6 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_{sf} = \begin{bmatrix} sf_1 & 0 & 0 \\ 0 & sf_2 & 0 \\ 0 & 0 & sf_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 การพัฒนาสมการปรับเทียบ (Calibration Algorithm)

ตามทฤษฎีแล้วไม่มีเซนเซอร์ใดที่มีความสมบูรณ์ 100% ดังนั้น ค่า Scale Factor คือ ตัวแปรที่นำมาใช้เพื่อค่าความคลาดเคลื่อนของ Sensitivity ของเซนเซอร์ และ Bias คือ ตัวแปรที่นำมาใช้เพื่อค่าความคลาดเคลื่อนของ Bias (Zero-Rate Output) นั้นเอง

DRC-01

Misalignment เป็นตัวแปรที่เพิ่มขึ้นมาโดยเฉพาะสำหรับเซนเซอร์ที่ใช้ใน IMU ในทางทฤษฎีเมื่อต้องการวัดความเร่ง ความเร็วเชิงมุม หรือสนามแม่เหล็กโลกเพื่อคำนวณมุมอ้างอิง จะต้องวัดทั้ง 3 แกน Cartesian (X,Y,Z) ตามสมการที่ 2 สามารถเขียนใหม่ได้คือ

$$\mathbf{f}^{av} = \mathbf{K}_{sf}^{-1} \mathbf{C}_p^a \mathbf{f}^p + \mathbf{b} \quad (6)$$

กำหนดให้

$$\mathbf{f}^{av} = \tilde{\mathbf{f}}^{av} - \mathbf{n}$$

โดยที่

$$\tilde{\mathbf{f}}^{av} \text{ คือ ค่า } \mathbf{f}^{av} \text{ ที่วัดได้}$$

$\mathbf{n}$ คือ สัญญาณรบกวน (noise) ของค่าการวัด

สามารถสมมติให้สัญญาณรบกวน (noise) ของค่าการวัด เป็น zero-mean Gaussian white noise กล่าวคือ $E[\mathbf{n}] = 0$ ดังนั้น

$$E[\mathbf{f}^{av}] = E[\tilde{\mathbf{f}}^{av}] - E[\mathbf{n}] = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \tilde{\mathbf{f}}_i^{av} \quad (7)$$

โดยที่ M คือ จำนวนครั้งที่วัดในแต่ละตำแหน่ง และ นอกจากนี้เราทราบแน่นอนว่าขนาดของ $\mathbf{f}^p$ มีค่าเท่ากับ 1 g

หน้าที่หลักของสมการปรับเทียบ หรือ Calibration Algorithm คือ ประมาณค่า Misalignment ($\mathbf{C}_p^a$), Scale Factor ($\mathbf{K}_{sf}$), และ Bias ($\mathbf{b}$)

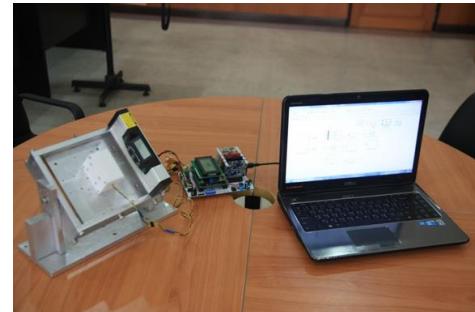
ตามที่กล่าวข้างต้น หน้าที่หลักของ สมการปรับเทียบ หรือ Calibration Algorithm คือ หาค่า Misalignment, Scale Factor, และ Bias ของเซนเซอร์ Accelerometer ซึ่งในทางปฏิบัติสำหรับเซนเซอร์ที่ต้องการความแม่นยำสูงจะต้องใช้อุปกรณ์ เช่น Rate Table ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อสั่งการให้เซนเซอร์เคลื่อนที่ตามที่กำหนดได้อย่างแม่นยำและวัดผลการตอบสนองและคำนวณค่าปรับเทียบออกมา เทคนิคที่นำเสนอในบทความนี้ใช้เทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือปรับเทียบที่มีความแม่นยำสูง แต่สามารถใช้งานได้ ซึ่ง ไม่มีผลต่อการใช้งานเนื่องจากเซนเซอร์ที่ใช้ไม่ใช่เซนเซอร์ระดับ Navigation Grade ที่มีความแม่นยำสูง

3. การทดลอง/การทดสอบ

3.1 อุปกรณ์การทดสอบ

3.1.1 Inertial Measurement Unit (IMU)

ในบทความนี้ได้เลือกทดสอบกับ IMU ของ บริษัท AIMAGIN รุ่น aMG IMU - 9A ซึ่งเป็นเซนเซอร์แบบต้นทุนต่ำ (Low cost IMU) ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์ 3 ชนิด ตามตารางที่ 1



รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ในการทดลอง / ทดสอบ

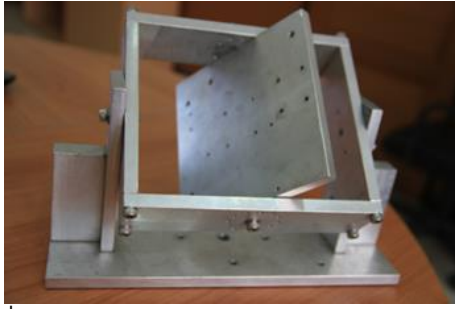
ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลของ IMU ของ บริษัท AIMAGIN รุ่น aMG IMU - 9A

เซนเซอร์	รุ่น	บริษัทผู้ผลิต
3-Axis MEMS Accelerometer	LIS3L06AL	STMicroelectronics
3-Axis MEMS Magnetometer	HMC1043	Honeywell
2-Axis Rate Gyro	IDG-300	Invensense

3.1.2 โต๊ะระดับสำหรับปรับมุมเอียง (Level Table)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับปรับมุมเอียงของการวางระดับของตัว IMU เพื่อใช้สำหรับการปรับเทียบ โดยการวัดระดับมุมเอียงจะใช้เครื่องมือวัดระดับบทความนี้ได้พัฒนาโต๊ะปรับมุมเอียงได้ทั้ง 3 แกนเพื่อใช้ในการปรับเทียบ ปัจจัยสำคัญของการใช้โต๊ะปรับมุมเอียงเพื่อให้ชุดเซนเซอร์อยู่นิ่งที่สุดในขณะทำการวัดค่าความเร่ง เพื่อหลีกเลี่ยงแรง g ที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของชุดเซนเซอร์เพื่อให้ได้ค่าที่แท้จริงที่สุด

DRC-01



รูปที่ 2 โต๊ะระดับสำหรับปรับมุมเอียง (Level Table)

3.1.3 เครื่องมือวัดระดับ

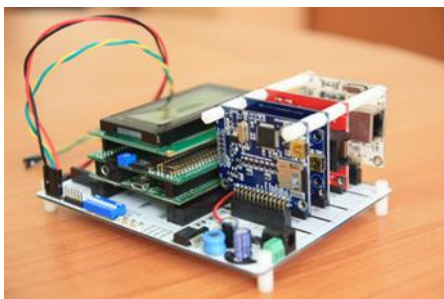
ใช้สำหรับวัดมุมของโต๊ะระดับสำหรับปรับมุมเอียง เพื่อให้ได้มุมตามที่ต้องการ



รูปที่ 3 เครื่องมือวัดระดับ

3.1.4 ตัวควบคุมแบบฝังตัว (Microcontroller)

ใช้สำหรับเก็บข้อมูลและติดต่อกับตัวรับรู้เพื่อส่งข้อมูลไปวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์ โดยใช้ ตัวควบคุมแบบฝังตัว (Microcontroller) ของ STMicromicrocontroller รุ่น STM32F4-Discovery มีความเร็วสัญญาณนาฬิกา 168MHz พร้อมด้วยการเชื่อมต่อแบบ i2c และ USART



รูปที่ 4 ตัวควบคุมแบบฝังตัว (Microcontroller)

3.2 การพัฒนาสมการปรับเทียบ (Calibration Algorithm)

ตามที่กล่าวข้างต้น หน้าหลักของ สมการปรับเทียบ หรือ Calibration Algorithm คือ หาค่า Scale Factor, Misalignment และ Bias ของเซนเซอร์ Accelerometer ซึ่งในทางปฏิบัติสำหรับเซนเซอร์ที่ต้องการความแม่นยำสูงจะต้องใช้อุปกรณ์ เช่น Rate

Table ที่มีความแม่นยำสูง เพื่อสั่งการให้เซนเซอร์เคลื่อนที่ตามที่กำหนดได้อย่างแม่นยำและวัดผลการตอบสนองและคำนวณค่าปรับเทียบออกมา เทคนิคที่นำเสนอในบทความนี้ใช้เทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือปรับเทียบที่มีความแม่นยำสูง แต่สามารถใช้งานได้ ซึ่งไม่มีผลต่อการใช้งานเนื่องจากเซนเซอร์ที่ใช้ไม่ใช่เซนเซอร์ระดับ Navigation Grade ที่มีความแม่นยำสูงโดยการปรับเทียบ Accelerometer มีขั้นตอนดังนี้

1. เก็บค่า $\tilde{f}_i^{av}$ ของ Accelerometer ในตำแหน่งต่าง ๆ (Orientations) ตามสมการที่ (1) ที่ต้องการคำนวณหาค่า ได้แก่

$$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, sf_1, sf_2, sf_3, b_x, b_y, b_z$$

ในบทความนี้ใช้ 6 ตำแหน่ง ตามตารางที่ 2

2. ใช้สมการ (2) เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ย

$$E[\mathbf{f}^{av}] = \hat{\mathbf{f}}^{av} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \tilde{\mathbf{f}}_i^{av}$$

ของการวัดของแต่ละ Orientation

3. กำหนด Cost Function

$$L(\theta) = \sum_{k=0}^{k-1} \left(\|u_k\|^2 - \|h_{(y_k, \theta)}\|^2 \right)^2$$

Cost Function ที่กำหนดจะถูกนำมาใช้แก้สมการเพื่อหาค่า Unknowns ตามข้อ 1 ในที่นี้

$$u_k = [0 \quad 0 \quad 1]^T$$

คือ Ideal Gravitational Force และ

$$h_{(y_k, \theta)} \text{ คือ เวกเตอร์ที่ได้จากการวัดค่าของ}$$

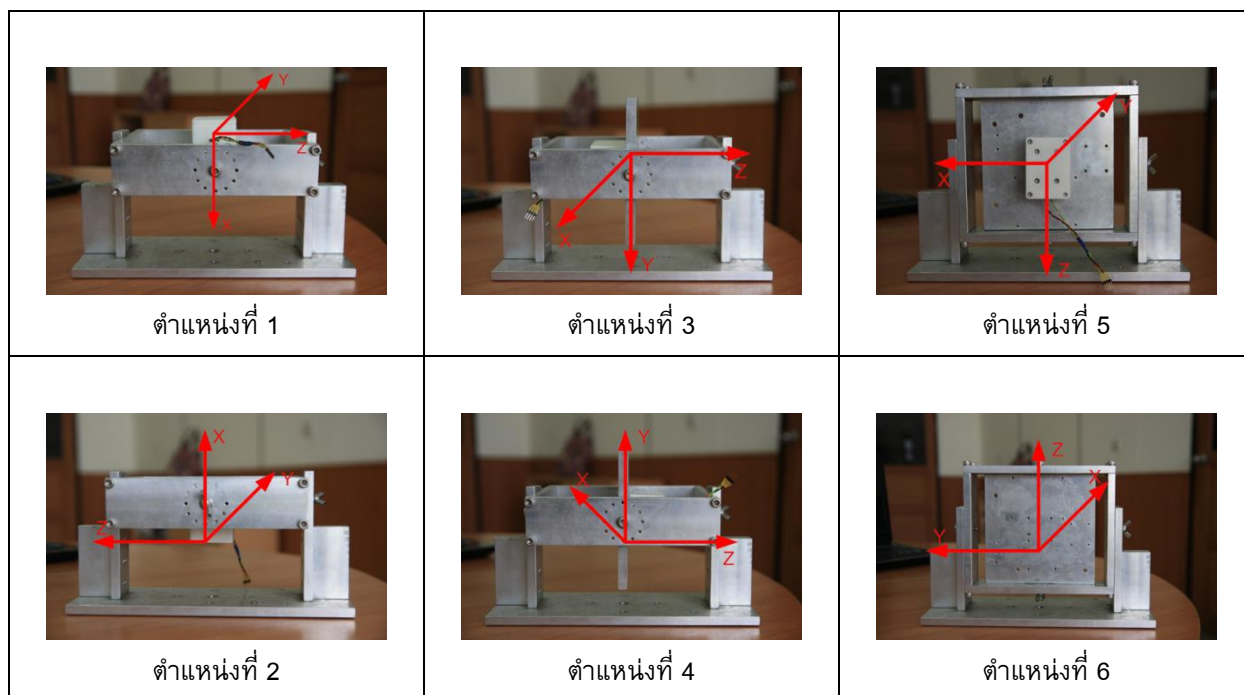
Accelerometer ในแต่ละ Orientation

4. ใช้ Cost Function ประกอบกับสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ (3) เพื่อหาค่า Unknowns ตามข้อ 1 ด้วยเทคนิคทางคณิตศาสตร์แบบกำลังสองสมบูรณ์ที่น้อยที่สุด (Least Squares Technique) จากนั้นแยกสมการในเมตริกเพื่อหาค่า $sf_x, sf_y, sf_z, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, b_x, b_y, b_z$ ตาราง 2 แสดง Orientation ทั้ง 6 Orientation ที่ใช้ในการเก็บค่า Accelerometer การเลือกมุมในแกน x, y และ z ห่างกัน 90 องศา มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิด Observability สูงที่สุดเมื่อทำการแก้สมการหาค่าตัวแปรของการปรับเทียบด้วยเทคนิคกำลังสองที่น้อยที่สุด

DRC-01

ตาราง 2 แสดง Orientation ทั้ง 6 Orientation ที่ใช้ในการเก็บค่า Accelerometer

ตำแหน่งที่	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 5 แสดง Orientation ทั้ง 6 Orientation ที่ใช้ในการเก็บค่า Accelerometer

4. ผลการทดลอง

$$\begin{bmatrix} 0.9662 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9784 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9832 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -0.0003 & -0.0025 \\ -0.0070 & 1 & 0.0081 \\ 0.0258 & -0.0069 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} -0.0146 \\ -0.0402 \\ -0.0193 \end{bmatrix} \quad (9)$$

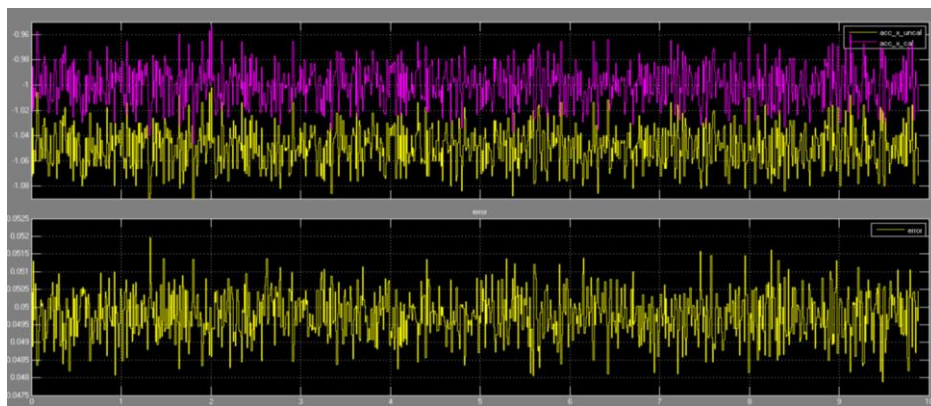
สมการที่ 7, 8 และ 9 แสดงค่า scale factor, misalignment และ bias หลังทำการปรับเทียบตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงความเร่งเปรียบเทียบระหว่างความเร่งที่วัดได้ก่อนการปรับเทียบกับหลังการปรับเทียบตัวรับรู้ จากตารางพบว่า ค่าความเร่งที่วัดได้ในแต่ละแกนก่อนการปรับเทียบตัวรับรู้มีค่าความเร่งที่ผิดพลาดจากค่าที่ความวัดได้ 0.01 – 0.7 g เมื่อทำการปรับเทียบแล้วพบว่าค่าความเร่งที่วัดได้มีค่าความเร่งที่ผิดพลาดลดลงเฉลี่ย 2.5 % - 6.0% โดยแสดงสัญญาณที่วัดได้ ดังแสดงรูปที่ 6 ซึ่งเป็นตัวอย่างของสัญญาณความเร่งที่วัดในแกน -X

DRC-01

ตารางที่ 3 แสดงความเร่งเปรียบเทียบระหว่างความเร่งที่วัดได้ก่อนการปรับเทียบกับหลังการปรับเทียบตัวรับรู้

แกน	ก่อนการปรับเทียบ		หลังการปรับเทียบ		ลดลงเฉลี่ย (%)
	ความเร่ง (g)	เฉลี่ย (g)	ความเร่ง (g)	เฉลี่ย (g)	
+X	1.00 – 1.05	1.025	0.98 – 1.02	1.00	2.5
-X	1.02 – 1.10	1.06	0.98 – 1.02	1.00	6.0
+Y	0.96 – 1.00	0.98	0.98 – 1.02	1.00	2.0
-Y	1.04 – 1.08	1.06	0.98 – 1.02	1.00	6.0
+Z	0.97 – 1.01	0.99	0.97 – 1.01	0.99	0.0
-Z	1.03 – 1.07	1.05	0.97 – 1.03	0.995	5.5



รูปที่ 6 แสดงค่าความเร่งที่วัดได้ในแกน -x เปรียบเทียบระหว่างที่ยังไม่ได้ปรับเทียบกับปรับเทียบแล้ว

5. สรุปผลการทดลอง

ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับเทียบ (Calibration) ของตัวรับรู้ความเร่งอย่างง่าย และประหยัดแต่มีประสิทธิภาพสูง โดยการใช้โต๊ะปรับระดับแบบแมนนวลโดยการวัดองศาด้วย Digital Laser และใช้การประมวลผลและการอ่านข้อมูลจากตัวรับรู้ด้วยสมองกลแบบฝังตัว (Microcontroller) และทำการประมวลผลแบบ Hardware in the Loop ด้วยโปรแกรมแมทแลป เพื่อคำนวณค่าของพารามิเตอร์ในการปรับเทียบ ได้แก่ scale factor, misalignments และ bias โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงตัวรับรู้ความเร่งที่สามารถวัดค่าได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยมีความถูกต้องมากกว่าก่อนการปรับเทียบ 2 – 10 %

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Chatfield A.B. (1997). *Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., New York.

- [2] Rogers R. M. (2003). *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc. 2nd. Ed.
- [3] Titterton D.H. and Weston J.L. (2004). *Strapdown Inertial Navigation Technology*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
- [4] Britting K.R. (1971). *Inertial Navigation Systems Analysis*, John Wiley & Sons Inc.
- [5] Isaac Skog, Peter H"andel, *CALIBRATION OF A MEMS INERTIAL MEASUREMENT UNIT*, XVII IMEKO WORLD CONGRESS, Metrology for a Sustainable Development September, 17–22, 2010 Rio de Janeiro, Brazil
- [6] Brown R. G. and Hwang P.Y.C., *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with MATLAB Exercises and Solutions*, 3rd ed., John Wiley & Sons, 1997