0.2(1)

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

ระบบการหาค่าการวางตัวอย่างง่ายโดยใช้ไอเอ็มยูราคาถูกและไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 32 บิต

Simplify Attitude Determination System using Low-Cost IMU and 32bit Microcontroller

พีรวัฒน์ อาทิตย์ตั้ง [1] องอาจ ทับบุรี[2] กันยารัตน์ เอกเอี่ยม[2] และ วีรชัย มาลยเวช [3]

[1]กลุ่มสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

1 หมู่ 20 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี โทรศัพท์ 02-529-3829 E-mail: peerawat@vru.ac.th

[2]นักวิจัยอิสระ E-mail: tubburee.o_ekiam.ku1@gmail.com

[3]ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุมและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

140 ถ.เชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530 โทรศัพท์ 02-9883655 ต่อ 1113 E-mail: veeracha@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการนำอาไอเอ็มยูราคาถูก รุ่น GY-86 ซึ่งประกอบด้วยเซ็นเซอร์ค่าความเร่งแบบ 3 แกน ค่าความเร็วเชิงมุม 3 แกน และค่าสนามแม่เหล็กโลก 3 แกน มาใช้ในการหาค่ามุมการวางตัว ด้วยการทำอัลกอริทึมการรวมสัญญาณเจากเซ็นเซอร์ด้วยตัวกรองคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้นเปรียบเทียบผลกับตัวกรองมาตรฐานแบบไตรแอด ประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต รุ่น STM32F4-discovery ซึ่งสามารถทำการโปรแกรมได้โดยไม่ต้องเขียนโค๊ดภาษาซี แต่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการเขียนโค๊ด และใช้ความสามารถของกล่องเครื่องมือที่เรียกว่า "ไวจัง" ในการจัดการกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลลัพธ์สุดท้ายแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถทำการประมาณค่าการวางตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และยังสามารถตามค่าและทนต่อความไวของสัญญาณได้ดี แม้ในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูง

คำสำคัญ: การหาค่าการวางตัว ไอเอ็มยู ไวจัง MATLAB/Simulink

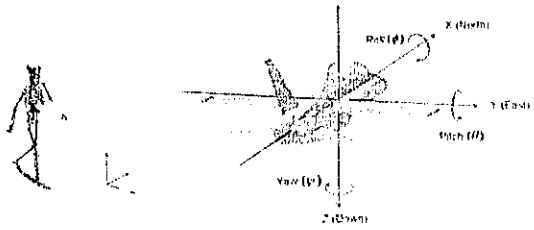
Abstract

This paper presents the simplicity of Attitude Determination System (ADS) by using low-cost IMU named GY-86 which consist of 3-axes accelerometer, 3-axes gyroscope and 3-axes magnetometer. The sensor fusion algorithm implementation is comparing between proposed Nonlinear Complementary Filter and standard TRIAD Filter. The 32bit microcontroller board, STM32F4-discovery used as processing unit. The codeless scheme for microcontroller can be done by the performance of "Waijung" blockset and MATLAB/Simulink environment. The final results show that the proposed method applicable for attitude estimation as correctly and also has good tracking performance and withstand to the sensitivity of signal event in the presence of high changes in velocity.

Keywords: Attitude determination, IMU, Waijung, MATLAB/Simulink

1. บทนำ

ในทางปฏิบัติการหาค่าการวางตัว (Attitude) และการหมุน (Rotation) ของวัตถุรอบแกนอ้างอิงใดๆ ดังรูปที่ 1 จะใช้เซ็นเซอร์ (Sensor) เรียกว่า ไอเอ็มยู (IMU: Inertial Measurement Unit) ซึ่งในตัวไอเอ็มยูจะประกอบด้วยเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดค่าความเร่ง ความเร็ว และบางครั้งรวมการวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก (Earth magnetic field) รวมเป็นโมดูลเดียวกัน เนื่องจากไอเอ็มยูประกอบด้วยเซ็นเซอร์อย่างน้อยสองตัวและต่างชนิดกัน (ตัววัดความเร็ว ตัววัดความเร่ง + ตัววัดสนามแม่เหล็ก) แต่ท้ายที่สุดแล้วสิ่งที่ต้องการทราบคือมุมของการวางตัวที่วัดเทียบกับแกนอ้างอิงหลักแต่ละแกน ด้วยกายภาพแบบนี้ทำให้การนำไอเอ็มยูไปใช้งานไม่ใช่เรื่องงายเลย เพราะต้องรวม (Fusion) เอาค่าดุดจากเซ็นเซอร์ทั้งสอง/สามแบบเพื่อดีความออกมาเป็นค่ามุมให้ได้ และนี่ก็ถือเป็นปัญหาที่ท้าทายอย่างยิ่งที่จะหาวิธีการหรือเทคนิคต่างๆที่เหมาะสมในการวัดและประมาณค่า (Estimate) มุมการวางตัวจากเซ็นเซอร์ประเภทนี้



(ก) การเคลื่อนที่ของคนและกรอบพิกัดอ้างอิง (ข) การกำหนดแกนหมุนอ้างอิงของเครื่องบินรบ

รูปที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนที่/การวางตัวของวัตถุ และการกำหนดแกน (axes) และกรอบพิกัดอ้างอิง

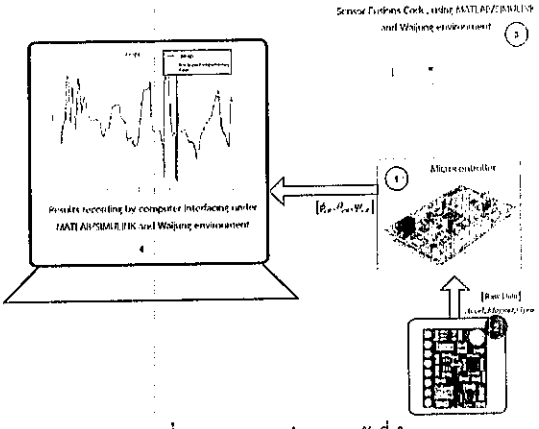
ปัจจุบันเป็นที่รู้กันดีว่าตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) เป็นตัวกรองมาตรฐานที่ทำงานได้ถูกต้องและมีเสถียรภาพที่สุด แต่ตัวกรองคาลมานก็มีข้อเสียตรงที่ต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก เนื่องจากคณิตศาสตร์ของตัวกรองคาลมานค่อนข้างซับซ้อน และเป็นลักษณะแบบเมทริกซ์ ทำให้การสร้างตัวกรองคาลมานต้องใช้เครื่องคำนวณที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ในงานเฉพาะทางบางประเภทที่ถูกจำกัดในเรื่องของพลังงานและทรัพยากรในการประมวลผล เนื่องจากโครงสร้างของระบบเองไม่ใหญ่มากนัก เช่น ในดาวเทียมทรงลูกบาศก์ (Cube satellite) ที่มีขนาดเพียง 10 cm ×10 cm ×10 cm หรือ อากาศยานขนาดจิ๋ว (Micro Arial Vehicles: MVA's) เป็นต้น การใช้ตัวกรองแบบอื่นที่ทำงานได้ดีเหมือนกับตัวกรองคาลมาน แต่ใช้ทรัพยากรน้อยกว่าก็เป็นสิ่งหนึ่งที่กำลังเป็นที่สึกษา วิจัยและพัฒนา ใน [1] ได้นำเสนออัลกอริทึมการประมาณค่าการวางตัว

แนวใหม่ที่เรียกว่า "จีดีซีเอ (GDCA: Gradient Descent based Complementary Algorithm)" และ "อีซีเอ (ECA: Explicit Complementary algorithm)" ซึ่งเป็นชนิดของตัวกรองแบบอนุภาค (Particle filter) เปรียบเทียบกับตัวกรองคาลมานจุดมุ่งหมายก็เพื่อนำเสนอตัวกรองที่สามารถประมาณค่าการวางตัวของระบบได้อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ โดยใช้ทรัพยากรในการคำนวณไม่มาก และสามารถสร้างได้ง่าย ใน [2] ได้นำเสนอการหาค่าการวางตัวของดาวเทียมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC24FJ64GA002 เป็นตัวประมวลผลเซ็นเซอร์สามแม่เหล็กโลก และเซ็นเซอร์แสงอาทิตย์ (Solar sensor) โดยเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่าง ไตรแอด(Triad) คิว-เมทรอด(Q-Method) และ คิวเอสต์ (QUEST) ผลสรุปสุดท้ายพบว่าถึงแม้ตัวประมาณค่าแบบไตรแอดจะทำการตามค่า (Tracking) ได้เร็ว แต่ก็มีความไวต่อสัญญาณรบกวนมากเช่นกัน ถึงนั้น [2] ได้ลงในความเห็นเลือกคิวเอสต์ เป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมในการสร้างด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ เนื่องจากให้ผลการตามค่าที่ดี ทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นๆ ที่กล่าวมา

บทความวิจัยนี้จะนำเสนอการใช้ตัวกรองแบบคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น ที่นำเสนอโดย [3] เพื่อหาค่ามุมการวางตัวโดยประมวลผลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ 32บิต และใช้กล่องเครื่องมือ "ไวจัง" และสภาพแวดล้อมของแม็ทแล็ป/ซิมมูลิ้งในการเขียนโปรแกรมและจัดการกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ในหัวข้อที่ 2 ต่อจากนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ หัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงตัวกรองแบบคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น หัวข้อที่ 4 เป็นผลการทดลอง และหัวข้อที่ 5 กล่าวถึงบทสรุป

2. ส่วนประกอบของระบบ

ส่วนประกอบหลักของระบบมีอยู่ 4 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย 1) บอร์ดประมวลผลแบบเป็นไมโครคอนโรลเลอร์ 32 บิต รุ่น STM32F4-discovery 2)ไอเอ็มยูแบบ 9DOF รุ่น GY-86 3) โปรแกรม MATLAB/Simulink และกล่องเครื่องมือไวจัง (Waijung) สำหรับการโปรแกรมและโค้ดดิ่ง (Coding) และ 4) ส่วนของการเก็บผลและแสดงผลข้อมูล



รูปที่ 2 ระบบการหาค่าการวางตัวที่นำเสนอ

3. การอธิบายการวางตัว (Attitude Representations)

การคำนวณหรือบ่งบอกค่าการวางตัวของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body)ในปริภูมิสามมิติ (3 dimensional space) จะนิยมแทนหรืออธิบายด้วยมุมของออยเลอร์ (Euler's angle) และควอเตอร์เนียน (Quaternion) ซึ่งแต่ละวิธีก็มีวิธีการข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ดังนี้

- มุมออยเลอร์:=โรล (Roll, ϕ) -พิท (Pitch, θ) -ยอ (Yaw, ψ) ใช้บอกว่าวัตถุนั้นทำมุมเท่าใดกับแกนอ้างอิงหลัก X-Y-Z และยังถูกใช้เป็นชุดพารามิเตอร์หลักของเมทริกซ์การหมุน (Rotation matrix, R) เพื่อใช้อธิบายการหมุนจาก (กรอบพิกัด หรือเฟรม) a ไป b เป็นดังต่อไปนี้

$$\mathrm{R}_b^a = \mathrm{R}_{x,y,z(\psi,\theta,\phi)} = \mathrm{R}_z(\psi)\mathrm{R}_y(\theta)\mathrm{R}_x(\phi) \quad (1)$$

ผลลัพธ์สุดท้ายของเมทริกซ์การหมุน เป็นดังนี้

$$\mathrm{R}_{x,y,z(\psi,\theta,\phi)} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi c\phi s\theta + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ $s(\cdot)$ และ $c(\cdot)$ เป็นตัวย่อของตรีโกณมิติไซน์ $(\sin(\cdot))$ และโคไซน์ $(\cos(\cdot))$ ตามลำดับ การอธิบายด้วยมุมของออยเลอร์เป็นสิ่งที่มนุษย์เข้าใจและคุ้นเคยมากที่สุด แต่จะมีปัญหาซิงกูลาริตี้ (Singularity) ในการคำนวณ (ไม่สามารถคำนวณหาเมทริกซ์ผกผันได้) ในกรณีที่มุม θ มีขนาด $\pm(\pi/2)$

- ควอเตอร์เนียน, $\mathrm{q} := [\eta \quad \varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3]$ เป็นวิธีการหนึ่งที่นำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิงกูลาริตี้จากการใช้มุมออยเลอร์ในการคำนวณ ประกอบด้วยพารามิเตอร์สี่ตัวเพื่อใช้แสดงมุมการหมุน ตัวแรกเป็นจำนวนจริง $\eta := \cos(\theta/2)$ และอีกสามตัวที่เหลือเป็นส่วนของจินตภาพ (imaginary), $\varepsilon = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3]^T = \lambda \sin(\theta/2)$ โดยที่ $\lambda = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3]^T$ คือ ไอเกนเวกเตอร์ (Eigenvector) หนึ่งหน่วยใดๆ ในการใช้งานควอเตอร์เนียนต้องรักษาให้ควอเตอร์เนียนมีค่าหนึ่งหน่วย ตามเงื่อนไข $\mathrm{q}^T\mathrm{q} = \eta^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 = 1$

การคำนวณค่าการวางตัวในบทความนี้ใช้ควอเตอร์เนียนและแสดงผลโดยใช้มุมออยเลอร์

4. อัลกอริทึมการหาค่าการวางตัว (Attitude Determination Algorithm)

ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัลกอริทึมตัวกรองคอมพลีเมนทารี่ที่แบบไม่เป็นเชิงเส้น กับอัลกอริทึมไตรแอด และ คณิตศาสตร์ของไตรแอดจะขออนุญาตไม่กล่าวถึงเนื่องจากเป็นขั้นตอนวิธีการที่ใช้กันมานานทั้งงานทางอากาศและอวกาศยาน

- ไตรแอด (TRIAD) อัลกอริทึมถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย ฮาโรล์ด แบล็ค (Harold Black) ในปี พ.ศ. 2507 เป็นที่นิยมใช้ในการประมาณค่าการทรงตัวของดาวเทียม เนื่องจากมีความง่าย การสร้างเมทริกซ์การหมุนสามารถสร้างได้โดยตรงจากค่าเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ในรูปแบบของเวกเตอร์ 2 เวกเตอร์ที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal) แต่หลังจากที่มีคนคิดค้นอัลกอริทึมคิวเอสต์และคาลมานขึ้นมา ไตรแอดก็ลดบทบาทลง

- ตัวกรองคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Complementary Filter) หรืออาจจะเรียกว่าตัวกรองมาโฮนี (Mahony Filter) นำเสนอครั้งแรกโดย มาโฮนี ฮาเมล (Hamel) และ พฟลิมลิน (Pflimlin) ในปี

พ.ศ.2551 ซึ่งโดยหลักการแล้ววิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับไอเอ็มยูราคาถูกเพื่อประมาณค่าการวางตัวได้เป็นอย่างดี โดยปกติแล้วจะใช้กับอากาศยานขนาดจิ๋วและเป็นอัลกอริทึมหนึ่งในปัจจุบันที่กำลังได้รับการพิสูจน์และทดสอบ

$$\omega^b_{mes} = -vex\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{k_i}{2}\left(v_i^b(\hat{v}_i^b)^T - \hat{v}_i^b(v_i^b)^T\right)\right) \quad (5)$$

$$\dot{\hat{b}}^b_{gyro} = -\frac{1}{2}K_i\omega^b_{mes} \quad (6)$$

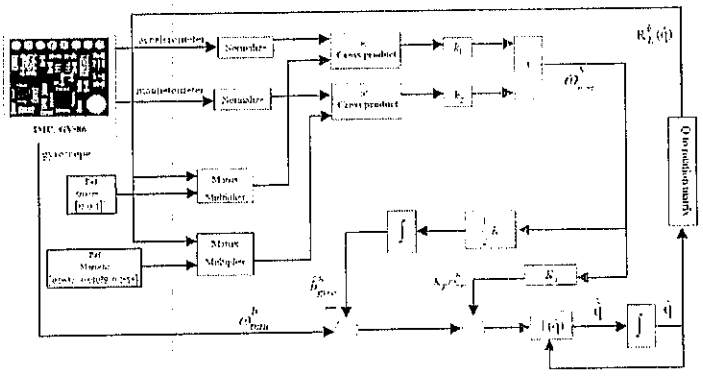
$$\dot{\hat{q}} = T_q(\hat{q})\left[\omega^b_{imu} - \hat{b}^b_{gyro} + K_i\omega^b_{mes}\right] \quad (7)$$

โดยที่ฟังก์ชัน $vex(\cdot)$ เป็นตัวดำเนินการผกผันของการคูณแวกเตอร์ (Inverse cross product operator) เมื่อ $vex\left(S(a)\right) = a$

- v_i^b คือ ค่าจากเซ็นเซอร์ เมื่อ $i = 1, 2$ ในที่นี้คือค่าของตัววัดความเร่ง และตัววัดสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ
- $\hat{v}_i^b$ คือ ค่าประมาณ (Estimate) ของตัววัดความเร่ง และตัววัดสนามแม่เหล็ก ที่พอหราบค่า เมื่อ $\hat{v}_1^b = R_E^b v_{01}^E$ และ $\hat{v}_2^b = R_E^b v_{02}^E$ โดยที่ $v_{01}^E = \begin{bmatrix}0 & 0 & 1\end{bmatrix}^T$, $v_{02}^E = \begin{bmatrix}0.9632 & -0.01039 & 0.2686\end{bmatrix}^T$
- k_1, k_2, K_p และ K_i เป็นอัตราขยายของตัวสังเกตุค่า (Observer gain)
- $T_q(\hat{q})$ เป็นการจัดรูปเพื่อแปลงค่าควอเตอร์เนียน, $\hat{q}$ ที่เป็นค่าประมาณไปเป็นค่าความเร็วเชิงมุม $\dot{\hat{q}}$ [4]

5. การสร้างอัลกอริทึมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ 32บิต

จากสมการที่ (5) ถึง (7) สามารถนำไปเขียนโค้ดและโปรแกรมด้วย MATLAB/SIMULINK และสภาพแวดล้อมของไวจังได้ดังรูปที่ 3

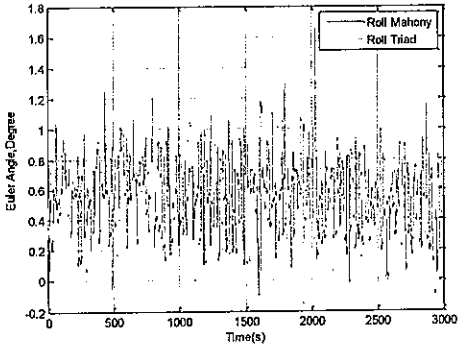


รูปที่ 3 อัลกอริทึมตัวกรองคอมพลีเมนทารี่ที่แบบไม่เป็นเชิงเส้น

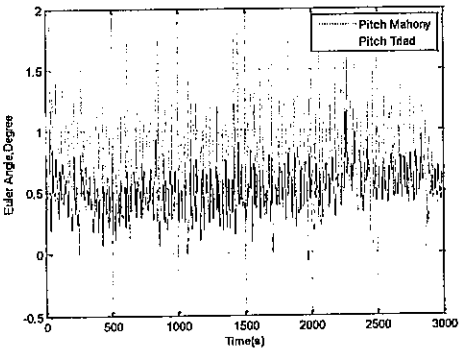
การทำงานของบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3 จะเริ่มจากค่าประมาณของควอเตอร์เนียน $\hat{q}$ ด้วยเงื่อนไขเริ่มต้น $\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$ จากนั้นก็จะส่งค่าเข้าสู่ฟังก์ชัน $vex(\cdot)$ เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าความเร็วและค่าสนามแม่เหล็กโลกที่วัดได้จากไอเอ็มยูกับค่าอ้างอิงที่การวางตัวค่าต่างๆ โดยที่ใช้ $\hat{q}$ สร้างเมทริกซ์การหมุนเพื่อแปลงค่าอ้างอิงจากกรอบพิกัดโลกไปยังกรอบพิกัดลำตัว ($R_E^b(\hat{q})$) ส่วนค่า ω^b_{mes} ที่ได้จากการทำอัลกอริทึม $vex(\cdot)$ จะใช้ไปการปรับค่าความถูกต้องของค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้จากไจโรสโคป (ω^b_{imu}) โดยส่วนแรกจะถูกเกับอัตราขยายแบบพี (K_p) และส่วนที่สองจะถูกกับอัตราขยายไอ ($-K_i$) เพื่อใช้ประมาณค่าไบแอสของไจโรสโคป ซึ่งโดยภาพรวมแล้ววิธีการที่กล่าวมาถึงจะเหมือนเป็นการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอในการประมาณค่าความผิดพลาด และขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นการคำนวณหาค่าการประมาณค่าการวางตัวแบบควอเตอร์เนียนตามสมการที่ (7)

6. ผลลัพธ์

การทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของระบบการหาค่าการวางตัวที่นำเสนอในบทความนี้ จะแสดงให้เห็น 2 แบบ คือ (1) เมื่อจับวางไอเอ็มยูในแนวระนาบขนานกับพื้นโลกไว้นิ่งๆ โดยคาดหวังว่าค่ามุมการวางตัว โรล-พิท-ยอ ในแต่ละแกนมีค่าประมาณศูนย์องศา (2) ติดตั้งไอเอ็มยูกับแขนกลแล้วทำการเคลื่อนที่แขนกลกลับไปกลับมา ผลการทำงานแสดงดังรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 8 ดังต่อไปนี้

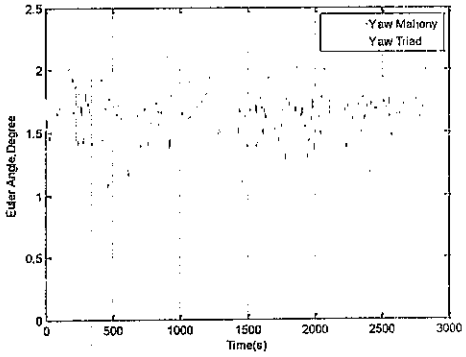


รูปที่ 4 มุมการวางตัวรอบแกนโรล ในการทดสอบแบบที่ (1)

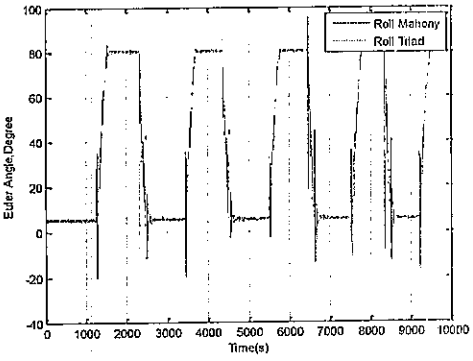


รูปที่ 5 มุมการวางตัวรอบแกนพิท ในการทดสอบแบบที่ (1)

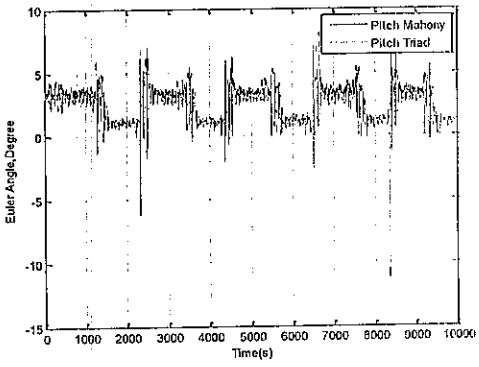
พิจารณาผลการทำงานของตัวกรองในรูปที่ 4 ถึง 8 จะพบว่าระบบสมองกลฝังตัวในการหาค่าการวางตัวด้วยตัวกรองคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่นำเสนอ สามารถทำงานได้แม่นยำเทียบเท่ากับตัวกรองมาตรฐานแบบไดเรแอค และยังทนต่อสัญญาณรบกวนหรือการเคลื่อนที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูง เช่นสถานะตอนเริ่มต้น และตอนที่แขนกลหยุดการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 6 มุมการวางตัวรอบแกนยอ ในการทดสอบแบบที่ (1)



รูปที่ 7 เปรียบเทียบมุมโรลของการวางตัวในการทดสอบแบบที่ (2)



รูปที่ 8 เปรียบเทียบมุมพิทของการวางตัวในการทดสอบแบบที่ (2)

7. สรุป

บทความนี้ได้นำเอาตัวกรองคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่นำเสนอโดย [3] มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าการวางตัว โดยประมวลผลด้วยชิฟไมโครคอนโทรลเลอร์ 32 บิต เบอร์ STM32F4D7 ด้วยการโปรแกรมโดยใช้ MATLAB/Simulink ในการเขียนโค๊ด และใช้กล่องเครื่องมือไจจัง ในการจัดการกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลการทดสอบการทำงานเบื้องต้นแสดงให้เห็นได้ว่า ระบบที่นำเสนอสามารถหาค่ามุมการวางตัวได้อย่างแม่นยำทั้งการเคลื่อนที่แบบสตาติค (Static) และแบบไดนามิก (Dynamic) ซึ่งตัวกรองที่นำเสนอนี้สามารถใช้กับระบบที่มีข้อจำกัดในเรื่องทรัพยากรของตัวประมวลผลได้เป็นอย่างดี ส่วนงานวิจัยต่อไปอาจจะรวมข้อดีของไตรแอดเข้ากับตัวกรองที่นำเสนอนี้ หรือเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวกรองแบบกิวเอสต์

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA) ที่ให้โอกาสและทุนสนับสนุนการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Dung Duong Quoc, Jinwei Sun et al., Sensor Fusion based on Complementary Algorithms using MEMS IMU, International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, Vol. 8, No. 2 (2015), pp. 313-324.

[2] Ricardo O. Duarte, Luiz S. Martins-Filho et al., PERFORMANCE COMPARISON OF ATTITUDE DETERMINATION ALGORITHMS DEVELOPED TO RUN IN A MICROPROCESSOR ENVIRONMENT, Proceedings of COBEM 2009.

[3] Robert Mahony, Tarek Hamel et al., Complementary filter design on the special orthogonal group, 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005.

[4] Fredrik Alvenes, Attitude Controller-Observer Design for the NTNU Test Satellite, Master Thesis, 2013.

วีระชัย มาลยเวช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปริญญาโทและเอก จาก UNSW มีความสนใจด้าน HDD Servo Systems, Robust Control and Filtering, Robotic

พีรวัฒน์ อาทิตย์ตั้ง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (ระบบวัดคุม) และโท วิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจด้านระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติ

องอาจ ทับบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (ค.อ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และปริญญาโท (วศ.ม.)สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กันยารัตน์ เอกเอี่ยม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (ค.อ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และปริญญาโท (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่