0.2(2)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 39
The 39th Electrical Engineering Conference (EECON-39)
วันที่ 2-4 พฤศจิกายน 2559 ณ โรงแรมเดอะรีเจ้นท์ ชะอำบีช รีสอร์ท หัวหิน จ.เพชรบุรี

Menu
- Home
- Personal Information
- Paper Submission
- Paper Lists
- Camera Ready Submission
- Logout

## Camera Ready Submission

| Code | Title | Status | Camera Ready |
|---|---|---|---|
| 0110 | A Novel Approach to Attitude Determination by vector measurement and the Nonlinear Complementary Filter<br>Topics : ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT) | Accepted | Last Updated : 9-09-2016 20:52:56 +0700<br>Update File |

EECON-39 : The 39th Electrical Engineering Conferences
Phetchaburi, Thailand, November 2-4, 2016
Copyright©2015-2016 EEAAT, All Rights Reserved ®Design Provided by EEAAT Team.

# แนวทางใหม่ในการหาค่าการวางตัวโดยใช้ค่าการวัดแบบเวกเตอร์และตัวกรองคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น

# A Novel Approach to Attitude Determination by vector measurement and the Nonlinear Complementary Filter

กฤษฎา กันทะวงก์[1] พีรวัฒน์ อาทิตย์ตั้ง[2] และ วีระชัย มาลยเวช[3]

[1]สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ และบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

[2]กลุ่มสาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ peerawat@vru.ac.th

[3]ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุมและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร veeracha@mut.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการใหม่ในการประมาณค่าการวางตัวโดยใช้ไอเอ็มยูราคาถูก อัลกอริทึมของการรวมค่าจากเซ็นเซอร์ได้รวมตัวกรองแบบไดรแอดและมาโฮนีเข้าด้วยกัน ที่ซึ่งรู้จักกันดีว่าเป็นการใช้ค่าการวัดแบบเวกเตอร์และเป็นตัวกรองแบบคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้นตามลำดับ ความง่ายและการตามค่าที่เร็วของไดรแอดถูกใช้เป็นช่วงเริ่มต้นการทำงานของตัวกรอง ข้อด้อยของไดรแอดที่ไวต่อสัญญาณรบกวนสามารถปรับปรุงได้โดยเพิ่มข้อมูลจากไจโรรวมกับค่าความเร่งและสนามแม่เหล็กที่มีในตอนแรก เพื่อทำการประมาณค่าการเคลื่อนที่ด้วยตัวกรองมาโฮนี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอให้ผลที่ดีกว่าตัวกรองไดรแอดและมาโฮนีแบบดั้งเดิม ทั้งด้านการประมาณค่า และตามค่าของการเคลื่อนที่แบบสถาติคและแบบไดนามิก

คำสำคัญ: การประมาณค่าการวางตัวและควบคุม ไอเอ็มยู

## Abstract

This paper proposed a new approach to estimation of the attitude using low cost IMU (Inertial Measurement Unit). The sensor fusion algorithm is based on the combination of TRIAD and Mahony filter which are known as vector measurement and nonlinear complementary filter, respectively. The simple and fast tracking of TRIAD is used to be initial phase of filter. The lag of TRIAD in the sensitivity to noise and disturbance can be improved by add the gyroscope data, fused together with the primary magnetic field and accelerometer to perform the estimation of orientation using Mahony filter. The experimental shown that the proposed method outperforms than the original TRIAD and Mahony Filter on both estimate and tracking for static and dynamic movement.

**Keywords:** Attitude estimation and Control, IMU

## 1. บทนำ

การหาค่าการวางตัวและการควบคุม (Attitude Determination and Control, ADC) เป็นส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่ทำให้ อากาศ-อวกาศยาน (aero-space vehicle) สามารถสื่อสารกับสถานีภาคพื้นดินหรือถ่ายภาพวัตถุที่อยู่บนพื้นโลกในตำแหน่งต่างๆได้อย่างถูกต้องแม่นยำ โดยเป็นการควบคุมมุมการวางตัวของวัตถุเมื่อเทียบกับกรอบพิกัดอ้างอิงเริ่มต้นใดๆที่กำหนด (Inertial frame of reference) และซึ่งบางครั้งก็เพื่อรักษามุมการทรงตัวให้อยู่ ณ ตำแหน่งสมดุล การควบคุมจะมีประสิทธิผลได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการนั้น การวัดค่ามุมเพื่อป้อนกลับไปในระบบการควบคุมก็จะต้องมีความถูกต้องแม่นยำ ในบทความนี้จะสนใจเฉพาะส่วนของการวัดเพื่อประมาณค่า (Estimate) การวางตัว ตัวรับรู้ (Sensor) ที่ใช้วัดและรายงานค่าความเร่ง (Acceleration) 3 แกน ความเร็ว (Angular rate) หรือที่เรียกว่าไจโร 3 แกน และสนามแม่เหล็กโลก (Earth magnetic field) 3 แกน รวมอยู่ในโมดูลหน่วยการวัดค่าเริ่มต้น ที่เรียกว่า ไอเอ็มยู (IMU: Inertial Measurement Unit) ดังนั้นการประมาณค่ามุมการวางตัวโดยการรวม (Fusion) เอาต์พุตจากเซ็นเซอร์ต่างชนิดกันเพื่อตีความออกมาเป็นค่ามุมถือว่าเป็นปัญหาที่ท้าทายอย่างยิ่ง ตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) เป็นตัวกรองมาตรฐานที่ทำงานได้ดีมีเสถียรภาพ แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณมาก ทั้งในเรื่องของพลังงานไฟฟ้าและความเร็วของตัวประมวลผล เนื่องจากคณิตศาสตร์ของตัวกรองคาลมานเอง แต่ในงานเฉพาะทางบางประเภทมีข้อจำกัดในเรื่องดังกล่าว เช่น ยูเอวีขนาดจิ๋ว (micro UAV) ดาวเทียมทรงลูกบาศก์ (cube satellite) ที่มีขนาดเพียง 10 cm ×10 cm ×10 cm เป็นต้น ซึ่งการที่มีตัวกรองแบบอื่นที่สามารถทำงานได้ดีเหมือนกับตัวกรองคาลมาน แต่ใช้ทรัพยากรน้อยกว่าก็เป็นสิ่งหนึ่งที่กำลังเป็นที่ศึกษา วิจัยและพัฒนา โดยใน [1] ได้นำเสนอการสร้างและทดสอบตัวกรองคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Complementary Filter) หรือที่เรียกว่า ตัวกรองมาโฮนี ที่คิดค้นโดย [2] เปรียบเทียบผลกับตัวกรองไดรแอด (TRIAD) [3] ผลลัพธ์สุดท้ายแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีผลตอบสนองในการตามค่าที่ดีเช่นเดียวกับไดรแอด แต่ทนต่อสัญญาณรบกวนและมีถูกต้องแม่นยำกว่า

บทความวิจัยนี้จะพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยใน [1] ซึ่งมีความยุ่งยากในการปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวกรองมาโฮนีเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีกว่าไดรแอด ซึ่งบางครั้งถ้าปรับแต่งค่าอัตราขยายไม่ดีพอ ก็อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่แย่กว่าไดรแอด (ที่ใช้ทรัพยากรน้อยกว่า) โดยนำเสนอตัวกรองแนวใหม่ที่รวมไดรแอดและตัวกรองมาโฮนีเข้าด้วยกัน ในหัวข้อที่ 2 ต่อจากนี้จะกล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆของระบบ หัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงผลลัพธ์และการวิเคราะห์ผล และหัวข้อที่ 4 กล่าวถึงบทสรุป

## 2. ส่วนประกอบของระบบ

### 2.1 การอธิบายการวางตัว (Attitude Representations)

- มุมออยเลอร์:=โรล (Roll, $\phi$) -พิท (Pitch, $\theta$) -ยอ (Yaw, $\psi$) ใช้บอกว่าวัตถุนั้นทำมุมเท่าใดกับแกนอ้างอิงหลัก X-Y-Z และยังถูกใช้เป็น

ชุดพารามิเตอร์หลักของเมทริกซ์การหมุน (Rotation matrix, R ) เพื่อใช้อธิบายการหมุนจากกรอบพิกัดหรือเฟรม $a$ ไป $b$ เป็นดังต่อไปนี้

$$R_b^n = R_{x,y,z(\psi,\theta,\phi)} = R_z(\psi) R_y(\theta) R_x(\phi) \quad (1)$$

ผลลัพธ์สุดท้ายของเมทริกซ์การหมุน เป็นดังนี้

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

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

- ควอเตอร์เนียน, $q:=\begin{bmatrix}\eta & \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z\end{bmatrix}$ เป็นวิธีการหนึ่งที่นำมาใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดซิงกูลาริตี้จากการใช้มุมออยเลอร์ในการคำนวณ ประกอบด้วยพารามิเตอร์สี่ตัวเพื่อใช้แสดงมุมการหมุน ตัวแรกเป็นจำนวนจริง $\eta := \cos(\theta/2)$ และอีกสามตัวที่เหลือเป็นส่วนของจินตภาพ (imaginary), $\varepsilon = \begin{bmatrix}\varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z\end{bmatrix}^T = \lambda \sin(\theta/2)$ โดยที่ $\lambda = \begin{bmatrix}\lambda_x & \lambda_y & \lambda_z\end{bmatrix}^T$ คือ ไอเกนเวกเตอร์ (Eigenvector) หนึ่งหน่วยใดๆ ในการใช้งานควอเตอร์เนียนต้องรักษาให้ควอเตอร์เนียนมีค่าหนึ่งหน่วย ตามเงื่อนไข $q^T q = \eta^2 + \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 = 1$ ดังนั้นต้องทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalized, $q_{normalized}$) จากขนาดหรือนอร์มของควอเตอร์เนียน, $N(q)$ ดังนี้

$$N(q) = \sqrt{q * q^*} = \sqrt{\eta^2 + \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2} \quad (3)$$

$$q_{normalized} = \frac{q}{N(q)} \quad (4)$$

โดยที่ $q^*$ คือคอนจูเกท (Conjugate) ของ $q$ ; $q^* = \begin{bmatrix}\eta & -\varepsilon_x & -\varepsilon_y & -\varepsilon_z\end{bmatrix}$

การคำนวณค่าการวางตัวในบทความนี้ใช้ควอเตอร์เนียนและแสดงผลโดยใช้มุมออยเลอร์

## 2.2 อัลกอริทึมการหาค่าการวางตัว (Attitude Determination Algorithm)

- ไตรแอด (TRIAD) นำเสนอเป็นครั้งแรกโดย ฮาโรล์ด แบล็ค (Harold Black) ในปี พ.ศ. 2507 [3] เป็นที่นิยมใช้ในการประมาณค่าการทรงตัวของดาวเทียม เนื่องจากมีความง่าย สามารถประมาณค่าการวางตัวโดยสร้างเมทริกซ์การหมุนโดยตรงจากค่าเอาต์พุตการวัดของเซ็นเซอร์เพียงสองชนิดในรูปแบบของเวกเตอร์ 2 เวกเตอร์ที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal) ในที่นี้เลือกใช้ค่าจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง และสนามแม่เหล็กโลก ที่อยู่ในชุดโมดูลไอเอ็มยูเดียวกัน

$$\left[a'' : m'' : \left(a'' \times m''\right)\right] = R_b^n \left[a^b : m^b : \left(a^b \times m^b\right)\right]$$

เมื่อ $a^b, m^b$ คือ ค่าความเร่งและสนามแม่เหล็กโลกบนกรอบพิกัด ลำตัว

$a'', m''$ คือ ค่าความเร่งและสนามแม่เหล็กโลกบนกรอบพิกัดเนื้อด (NED, North-East-Down)

- **ตัวกรองคอมพลีเมนทารี่แบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Complementary Filter)** หรืออาจจะเรียกว่าตัวกรองมาโฮนี (Mahony Filter) นำเสนอครั้งแรกโดย มาโฮนี ฮาเมล (Hamel) และพฟลิมลิน (Pflimlin) ในปี พ.ศ.2551 ซึ่งโดยหลักการแล้ววิธีนี้สามารถประยุกต์ใช้กับไอเอ็มยูราคาถูกเพื่อประมาณค่าการวางตัวได้เป็นอย่างดี โดยปกติแล้วจะใช้กับอากาศยานขนาดจิ๋ว และเป็นอัลกอริทึมหนึ่งในปัจจุบันที่กำลังได้รับการพิสูจน์และทดสอบ

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

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

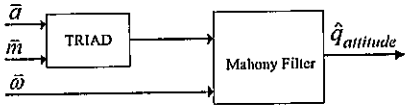
$$\dot{\hat{q}} = T_q(\hat{q})\left[\omega_{imu}^b - \hat{b}_{gyro}^b + K_i \omega_{mes}^b\right] \quad (7)$$

เมื่อ $vex(\cdot)$ เป็นตัวดำเนินการผกผันของการคูณเวกเตอร์ (Inverse cross-product operator) โดยที่ $vex\left(S(a)\right) = a$

- $v_i^b$ คือ ค่าจากเซ็นเซอร์ เมื่อ $i = 1, 2$ ในที่นี้คือค่าของเซ็นเซอร์วัดความเร่งและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ
- $\hat{v}_i^b$ คือ ค่าอ้างอิงโดยประมาณของเซ็นเซอร์วัดความเร่งและเซ็นเซอร์วัดสนามแม่เหล็กที่พอทราบค่า เมื่อ $\hat{v}_1^b = R_n^b v_{01}^n$ และ $\hat{v}_2^b = R_n^b v_{02}^n$ โดยที่ $v_{01}^n = \begin{bmatrix}0 & 0 & 1\end{bmatrix}^T$ , $v_{02}^n = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0\end{bmatrix}^T$
- $k_1, k_2, K_p$ และ $K_i$ เป็นอัตราขยายของตัวสังเกตค่า (Observer gain)
- $T_q(\hat{q})$ เป็นการจัดรูปเพื่อแปลงค่าควอเตอร์เนียน, $\hat{q}$ ที่เป็นค่าประมาณไป เป็นค่าความเร็วเชิงมุม $\dot{\hat{q}}$

## 2.3 อัลกอริทึมของตัวกรองที่นำเสนอ

วิธีการประมาณค่าที่นำเสนอในงานวิจัยนี้เป็นการรวมตัวกรองไตรแอด เข้ากับตัวกรองมาโฮนี ดังรูปที่ 1 ส่วนรูปที่ 2 เป็นบล็อกไดอะแกรมการสร้างตัวกรองแบบผสมนี้ โดยใช้ไอเอ็มยูรุ่น GY-86 และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4-Discovery




รูปที่ 1 ตัวประมาณค่าการวางตัวแนวใหม่ที่นำเสนอ

โดยการทำงานจะเริ่มจากการอินทริเกต (Integrated) ค่า $\hat{q}$ ที่อยู่ในกรอบพิกัดลำตัว เมื่อค่าเริ่มต้นเป็น $\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$ ค่า $\hat{q}$ ที่ได้จากการอินทริเกตจะแปลงเป็นเมทริกซ์การหมุนจากกรอบพิกัดลำตัวเป็นพิกัดเนื้อดจากนั้นก็จะส่งค่า เข้าสู่ฟังก์ชัน $vex(\cdot)$ เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเร็วและค่าสนามแม่เหล็กโลกที่วัดได้จากไอเอ็มยูกับค่าอ้างอิง จากนั้นจะได้ค่า $\omega_{mes}^b$

ซึ่งเป็นเสมือนเหมือนกับค่าความผิดพลาดของการประมาณค่า ซึ่งจะทำการปรับแต่งค่าด้วยอัตราขยายพี ( $K_p$ ) และนำไปลบออกโดยตรงจากค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้จากไจโรสโคป ( $\omega^b_{imu}$ ) และยังนำไปอินทริเกตเพื่อสร้างค่าประมาณไบแอสของไจโร ( $\hat{b}^b_{gyro}$ ) และปรับแต่งค่าไบแอสนี้ด้วยอัตราขยายไอ ( $-K_i$ ) ซึ่งโดยภาพรวมแล้ววิธีการที่ดังกล่าว ก็จะเหมือนเป็นการปรับแต่งค่าตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับความผิดพลาดของการประมาณค่า และขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นการคำนวณหาค่าประมาณของความเร็วแบบควอเตอร์เนียน การหาค่าอัตราการขยายที่เหมาะสมนั้น จริงๆ จะต้องขึ้นอยู่กับระดับของความแปรปรวนของเซนเซอร์ที่ใช้ โดยที่ $k_1$ และ $k_2$ สะท้อนความน่าเชื่อถือของเซนเซอร์วัดความเร่งและสนามแม่เหล็กโลกตามลำดับ ในที่นี้ ได้ใช้วิธีการปรับแต่ง โดยดูผลจากการทดสอบจริง

ข้อสังเกต เกี่ยวกับเสถียรภาพของตัวกรอง งานวิจัย [2] ได้มีการพิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าตัวกรองมาโฮนีนั้นมีเสถียรภาพ และในส่วนของไตรแอดนั้นจะไม่ส่งผลกับเสถียรภาพเนื่องจากไม่ได้มีส่วนป้อนกลับใดๆ

## 3. ผลลัพธ์

การทดสอบประสิทธิผลของตัวประมาณค่าแบบผสมที่นำเสนอนี้ จะทำการเปรียบเทียบกับผลของตัวกรองมาโฮนีและไตรแอดที่ได้เคยทดสอบมาแล้วใน [1] เมื่อทำการปรับค่าอัตราขยายต่างค่ากัน 2 แบบ โดยการทดสอบจะติดตั้งไอเอ็มยูกับแขนกล แล้วทำการเคลื่อนที่แขนกลกลับไป-มา ผลการทำงานของระบบแสดงดังในรูปที่ 3 และรูปที่ 4

จากผลการประมาณค่าของตัวกรองในรูปที่ 3 จะพบว่า เมื่ออัตราขยาย $[k_1\ \ k_2\ \ k_i\ \ k_p]$ มีค่าเท่ากับ $[1\ 1\ -0.2\ 20]$ ตามลำดับ ตัวกรองแบบผสมที่นำเสนอ สามารถตามค่าการเคลื่อนที่ของแขนกลได้ดีเช่นเดียวกับตัวกรองแบบไตรแอด แต่มีความถูกต้องแม่นยำกว่าในสภาวะตอนที่แขนกลเริ่มเคลื่อนที่และหยุดการเคลื่อนที่ ส่วนผลจากตัวกรองมาโฮนีให้ผลการตามค่าที่แย่ที่สุด แต่สามารถปรับปรุงผลการประมาณค่าของตัวกรองมาโฮนีโดยการปรับแต่งค่าอัตราขยายใหม่ เป็น $[5\ 0.1\ -0.2\ 10]$ ดังแสดงในรูปที่ 4

ดังนั้นสรุปได้ว่า ถึงแม้การปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวกรองยังไม่ดีเท่าที่ควร แต่ตัวกรองแบบผสมที่นำเสนอก็ยังมีความสามารถในการตามค่าที่ดีทั้งในสภาวะที่การเคลื่อนที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วสูงแบบทันทีทันใด หรือทั้งในสภาวะปกติที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วค่อนข้างคงที่

## 4. สรุป

บทความวิจัยนี้นำเสนอตัวกรองแนวใหม่ ที่รวมข้อดีของตัวกรองไตรแอดและตัวกรองมาโฮนีที่มีความสามารถในการตามค่าที่ดี และทนทานต่อสัญญาณรบกวน เพื่อใช้ในการประมาณค่าการวางตัวของวัตถุโดยใช้ไอเอ็มยูราคาถูก และทั้งนี้ตัวประมาณค่าที่นำเสนอทั้งหมดในบทความวิจัยนี้ ยังไม่ได้พิจารณาถึงไดนามิกของระบบ (system dynamic) แต่อย่างใด อาศัยเพียงแค่ค่าเอาต์พุตจากเซ็นเซอร์ ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตอาจจะต้องทำการเปรียบเทียบผลกับตัวกรองคาลมาล หรือ ถิวเอส (QUEST) ที่อาศัยไดนามิกของระบบในการประมาณค่า และรวมถึงศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวกรองแบบอัตโนมัติ

## 5. กิตติกรรมประกาศ

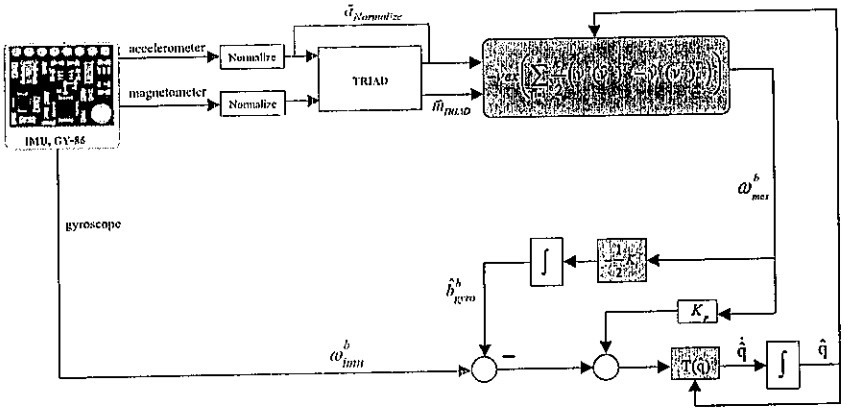
ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA) ที่ให้โอกาสและทุนสนับสนุนการทำวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

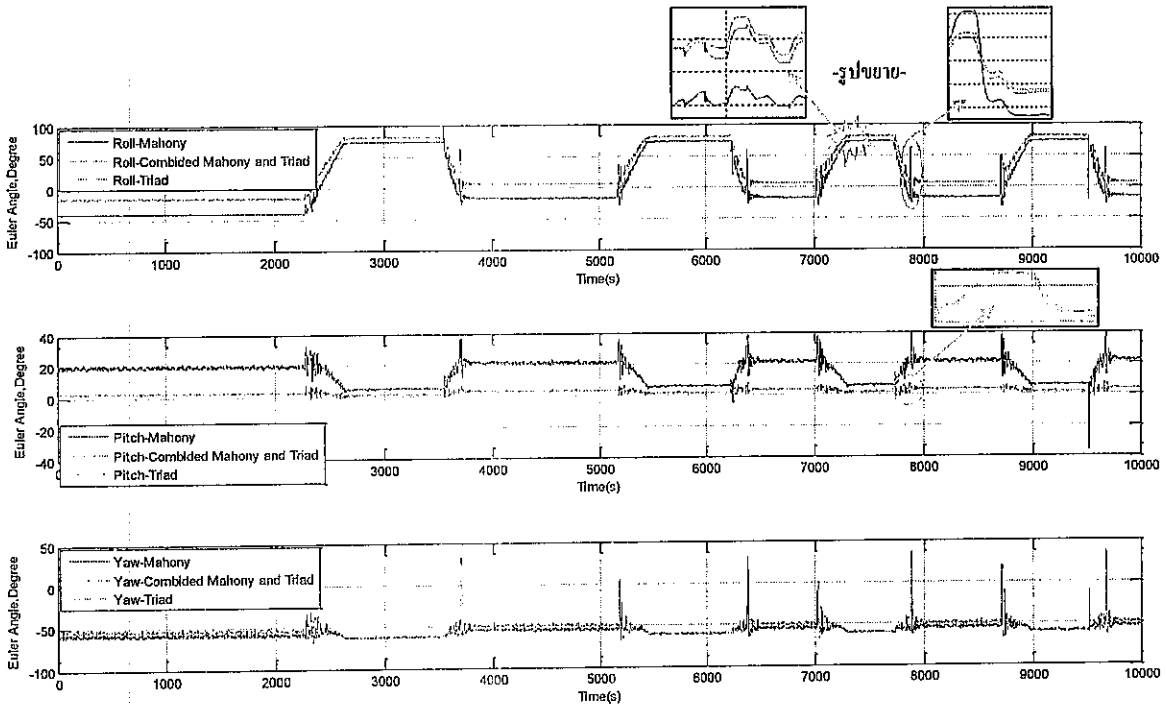
[1] พีรวัฒน์ อาทิตย์ตั้ง และคณะ, "ระบบการหาค่าการวางตัวอย่างง่ายโดยใช้ไอเอ็มยูราคาถูกและไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 32 บิต," การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, ภูเก็ต , 25-27 พฤษภาคม 2559, หน้า 1097 – 1100.

[2] Mahony, R., Hamel, T. and Pflimlin, J.M., "Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group",IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 53, No. 5, pp. 1203–1218, June 2008.

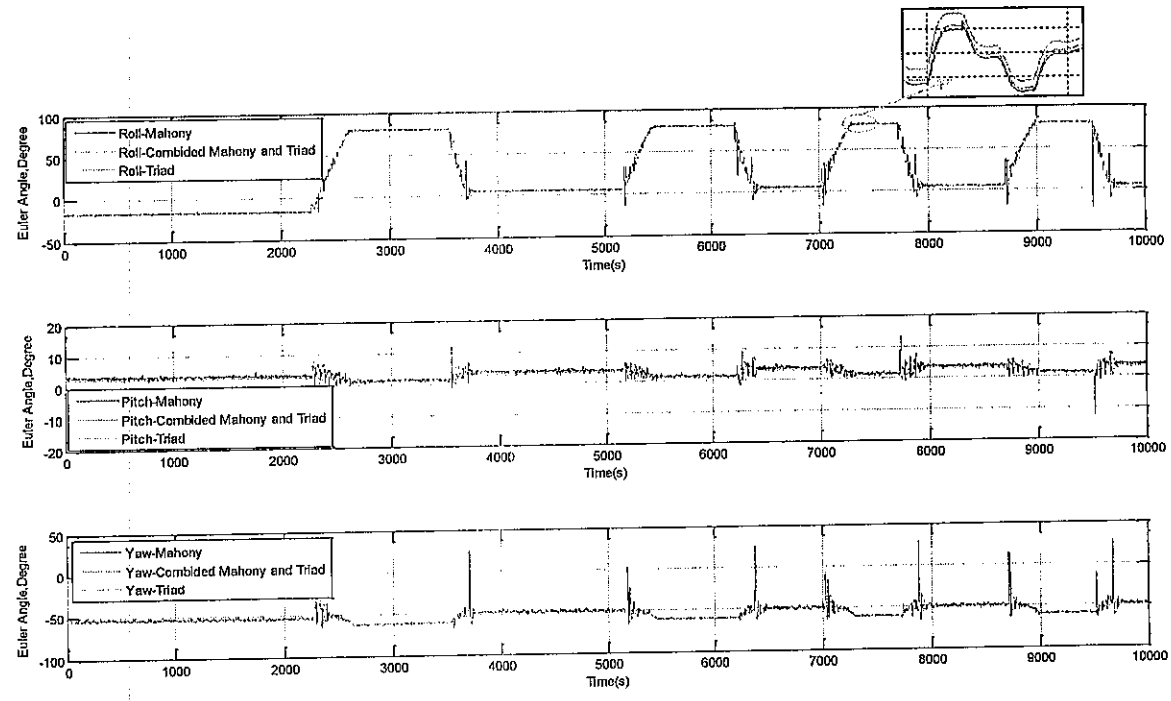
[3] Harold D. Black A Passive System for Determining the Attitude of a Satellite, AIAA Journal, 1964.




รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการสร้างตัวกรองแนวใหม่ที่นำเสนอ




**รูปที่ 3** มุมการวางตัวรอบแกนโรล พิท และยอ เมื่ออัตราขยาย $[k_1\ k_2\ k_i\ k_p]$ มีค่าเท่ากับ $[1\ 1\ -0.2\ 20]$ ตามลำดับ




**รูปที่ 4** มุมการวางตัวรอบแกนโรล พิท และยอ เมื่ออัตราขยาย $[k_1\ k_2\ k_i\ k_p]$ มีค่าเท่ากับ $[5\ 0.1\ -0.2\ 10]$ ตามลำดับ