

การชดเชยตัวแปรและลดสัญญาณรบกวนของไจโรสโคปราคาถูก Parameter Compensation and Noise Reduction of Low-cost Gyroscope

ชามา สารพร¹, เจิมธง ปรารณารักษ์², จิระพล ศรีเสริฐผล¹* และเกียรติศักดิ์ ทีชะ¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี 38 หมู่ 8 ตำบลนาุ้ง อำเภอเมือง จังหวัดเพชรบุรี 76000

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

บทคัดย่อ

การควบคุมวัตถุที่มีการเคลื่อนที่เช่น รถยนต์ เรือ เครื่องบิน จรวดและหุ่นยนต์ เป็นต้น จำเป็นต้องทราบตำแหน่งและทิศทางที่ถูกต้อง ไจโรสโคปเป็นเครื่องมือวัดที่นิยมใช้ในการวัดความเร็วเชิงมุมอย่างแพร่หลายในการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุ ไจโรสโคปที่มีราคาถูกจะมีสัญญาณที่มีค่าเบี่ยงเบน (Bias) สเกลลิงแฟคเตอร์ (Scaling factor) และสัญญาณรบกวน (Noise) เมื่อนำไปใช้งานจะทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุเกิดความคลาดเคลื่อนและขาดความแม่นยำได้ จากปัญหาที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบ (Calibration) ไจโรสโคปก่อนจะนำมาใช้งานเสมอ ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอ การชดเชยตัวแปรและลดสัญญาณรบกวนของไจโรสโคปราคาถูก โดยใช้คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman filter) ในการลดสัญญาณรบกวนและใช้วิธี Nonlinear least square ในการประมาณค่าตัวแปรได้แก่ค่าเบี่ยงเบนและสเกลลิงแฟคเตอร์ เพื่อชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้กับแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลกับสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์

คำหลัก: ไจโรสโคป, คาลมานฟิลเตอร์, Nonlinear least square

Abstract

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

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

1. บทนำ

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

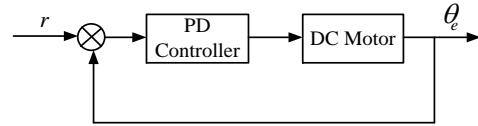
ไจโรสโคป (Gyroscope) เป็นเครื่องมือวัดสถานะเชิงมุมชนิดหนึ่งซึ่งสามารถวัดความเร็วเชิงมุมของวัตถุได้ด้วยเทคโนโลยี Micro-electro-mechanical system (MEMS) ทำให้ไจโรสโคปมีขนาดเล็กและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น [5]สามารถอธิบายหลักการทำงานของไจโรสโคปบนพื้นฐานการสั่นของระบบมวล (Mass) สปริง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

(Coriolis Force) เป็นผลให้เกิดการสั่นในทิศทางตั้งฉากกับการสั่นเดิม ความเร็วเชิงมุมดังกล่าวสามารถหาค่าได้จากการวัดแอมพลิจูดการสั่นเนื่องจากแรงหนีศูนย์กลาง ไจโรสโคปที่มีประสิทธิภาพสูงจะมีสัญญาณรบกวนน้อยและไวต่อการตอบสนอง อีกทั้งจะต้องมีค่าเบี่ยงเบนของสัญญาณน้อยมาก ด้วยประสิทธิภาพรวมถึงคุณภาพของสัญญาณที่ดีทำให้มีราคาสูง แต่ไจโรสโคปราคาถูก (Low-cost Gyroscope) พบว่าสัญญาณที่ได้มีค่าเบี่ยงเบนและมีสัญญาณรบกวนมาก เมื่อนำมาใช้งานทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่อค่าความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้ จากปัญหาที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบ (Calibration) ไจโรสโคปก่อนจะนำมาใช้งานเสมอ [2]ได้นำเสนอ self-calibrating ของการบอกตำแหน่งของแขนกล 2 ข้อต่อ โดยใช้ linear encoder ร่วมกับ Inertia Measurement Unit (IMU) [3]ได้นำเสนออุปกรณ์สอบเทียบเครื่องมือวัดในการประมาณค่ามุมเอียงทั้ง 3 แนวแกน การสอบเทียบ ตัวตรวจรู้แต่ละตัวใช้นั้นหลักการ Least Square Method [4]นำเสนอการสอบเทียบ Inertia Measurement Unit (IMU) ราคาถูกสำหรับการประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่งของรถยนต์ใน 2 มิติ [8]นำเสนอการสอบเทียบ Inertia Measurement Unit (IMU) ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สำคัญคือ ค่าเบี่ยงเบน (Bias) ค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale Factor) และค่า Misalignment Error ทำการสอบเทียบโดยใช้กาลมานฟิลเตอร์ในการประมาณค่าพารามิเตอร์และชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการชดเชยตัวแปรและการลดสัญญาณรบกวนของไจโรสโคปราคาถูกโดยใช้กาลมานฟิลเตอร์ซึ่งเป็นตัวสังเกตแบบเหมาะสมที่สุดที่มีความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนและใช้วิธี Nonlinear least square ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบปรับตัวได้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของสัญญาณไจโรสโคปราคาถูกซึ่งได้แก่ ค่าเบี่ยงเบนและค่าสเกลแฟคเตอร์ แล้วชดเชยให้กับแบบจำลองโดยทำการเปรียบเทียบผลกับสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์

2. MATHEMATICAL DESCRIPTIONS

ระบบที่ใช้ในการปรับปรุงสัญญาณของไจโรสโคปราคาถูกประกอบด้วย 4 ส่วนคือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สัญญาณจากไจโรสโคปราคาถูก กาลมานฟิลเตอร์และตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

เราใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ติดเอ็นโค้ดเดอร์เพื่อใช้ในการบอกตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ โดยใช้ PD Controller เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อ θ_e คือ ตำแหน่งและความเร็วเชิงมุมจากเอ็นโค้ดเดอร์และ r คือ Reference input สัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์ถูกใช้เพื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณจากไจโรสโคปราคาถูกซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่[1],[11]

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

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

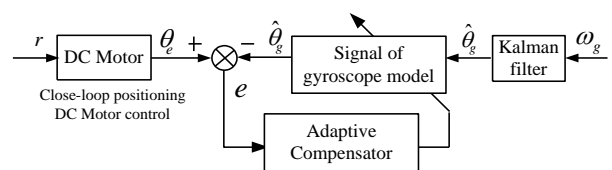
$$\dot{\delta} = v_b \tag{2}$$

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

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

$$z = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \theta_g \end{bmatrix} \tag{3}$$

3. อัลกอริทึม



รูปที่ 2 Block diagram of signal condition

จากรูปที่ 2 คาลมานฟิลเตอร์ถูกใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวน (Noise) วิธี Nonlinear least square ใช้เป็นอัลกอริทึมแบบปรับตัวได้สำหรับประมาณค่าพารามิเตอร์และชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้กับแบบจำลองโดยค่าความคลาดเคลื่อนหาได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณของแบบจำลองใจโรสโคปกับเซ็นเซอร์ คาลมานฟิลเตอร์นั้นเป็นตัวสังเกตแบบเหมาะสมที่สุด (optimal observer) ที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการได้ จากปริภูมิสเตตในสมการ (3) สามารถเขียนในรูปมาตรฐาน[10] ได้เป็น

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

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

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

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

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

สามารถหาค่า P จากวิธี Matrix Riccati differential equation

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

เมื่อ M คือ Kalman gain, G คือ Covariance matrix of observational uncertainty, Q คือ Covariance matrix of process noise in the system state dynamics และ S คือ Covariance matrix of state estimation uncertainty โดยที่ $\hat{\theta}_g$ คือ Signal from Kalman filter เมื่อกำหนดให้ $Q = [5 \ 0; 0 \ 5]$ และ $S = 1.1$ จะได้ $M = [-2.132 \ 0.2373]^T$ ดังนั้นปริภูมิสเตตสำหรับคาลมานฟิลเตอร์คือ

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

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

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

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

โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูลจากการวัด จากสมการที่ (11) จะได้

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

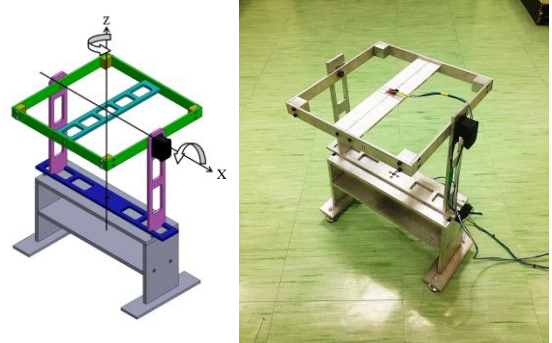
เมื่อ $p = [\alpha \ \delta]^T$ จะทำการ Minimize $f(p)$

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

เมื่อ k คือ จำนวนรอบของการคำนวณ ในบทความนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Nonlinear least squares ของโปรแกรม MATLAB

4. การออกแบบอุปกรณ์ทดลอง

ในการสอบเทียบโรสโคปราคาถูกได้ออกแบบอุปกรณ์เป็นแพลตฟอร์มที่มีแกนหมุน 2 แกน วัสดุของโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นอะลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 3



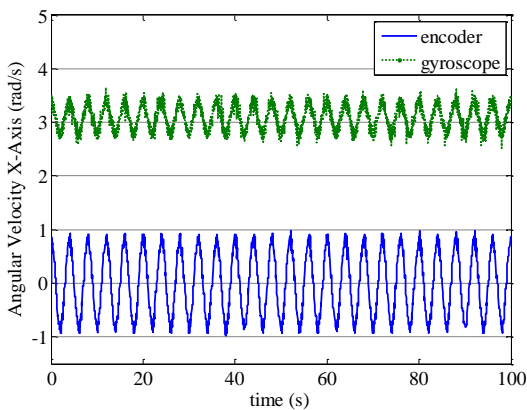
รูปที่ 3 อุปกรณ์ทดลอง

แกนหมุนทั้งสองเคลื่อนที่ด้วยเซอร์โวมอเตอร์ 2 ตัวได้แก่ Dynamixel RX-28 และ RX-64 ซึ่งติดตั้งบนแกน X และแกน Z ตามลำดับ โดยมีตำแหน่งเชิงมุมของเซอร์โวมอเตอร์อยู่ในช่วง $\pm 2.617 \text{ rad}$ ($\pm 150^\circ$) เซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองตัวรับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์

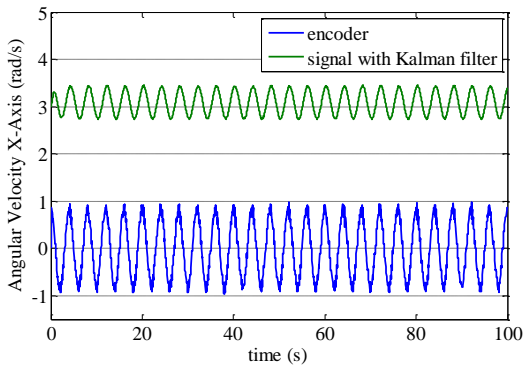
5. ผลการทดลอง

การทดลองกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่กลับไปกลับมาเป็นคลื่นรูป sine ความถี่เท่ากับ 0.25 Hz จากผลการทดลอง รูปที่ 4 คือสัญญาณของโรสโคปราคาถูกซึ่งมีสัญญาณรบกวน bias รวมทั้งค่า Scaling factor ที่ไม่ทราบค่า เมื่อสัญญาณผ่านส่วนของ

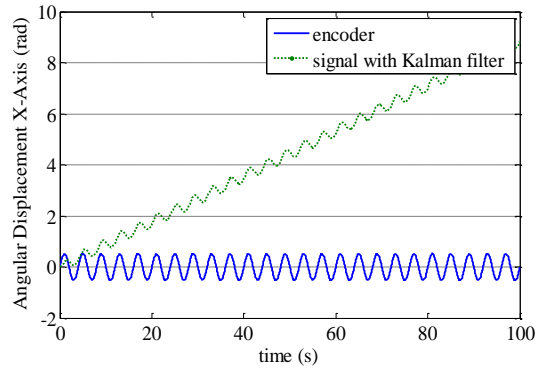
คาลมานฟิลเตอร์ สัญญาณรบกวนจะถูกกรองออกไปแสดงดังรูปที่ 5-6 แต่ในส่วนของตำแหน่งเชิงมุมนั้นยังคงมีความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากเทอม bias และ Scaling factor ที่ยังไม่ทราบค่า จากภาพที่ 7-8 วิธี nonlinear least square ซึ่งในบทความนี้ใช้เพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ 2 ตัวได้แก่ bias และ scaling factor ได้ผลการประมาณค่าคือ bias = -6.658 และ scaling factor = 2.156 พารามิเตอร์ทั้งสองตัวจะถูกชดเชยให้กับสัญญาณไจโรสโคปซึ่งส่งผลให้สัญญาณมีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์แสดงดังรูปที่ 9-10



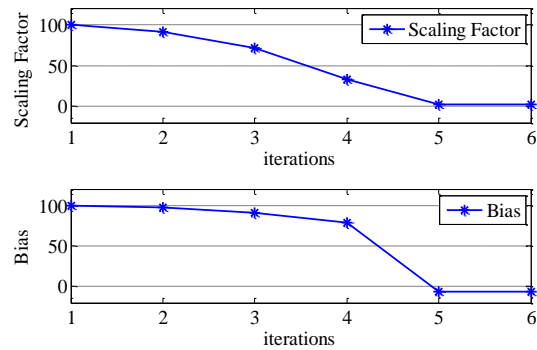
รูปที่ 4 Angular velocity X-axis signal from encoder and gyroscope



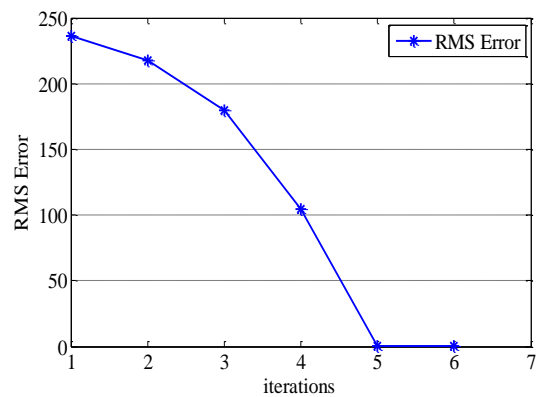
รูปที่ 5 Angular velocity X-axis signal from encoder and Kalman filter



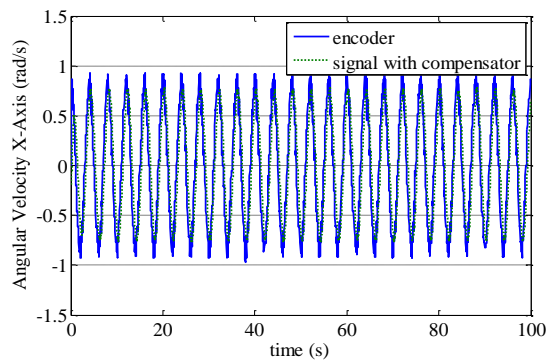
รูปที่ 6 Angular displacement X-axis signal from encoder and Kalman filter



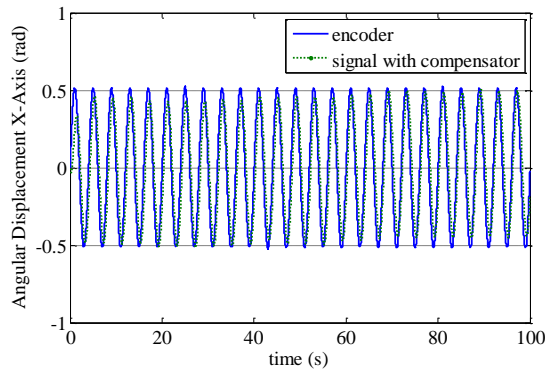
รูปที่ 7 Parameter estimation



รูปที่ 8 Root mean square error of estimation



รูปที่ 9 Angular velocity X-axis signal from encoder and gyroscope model



รูปที่ 10 Angular displacement X-axis signal from encoder and gyroscope model

6. สรุปผล

กาลมานฟิลเตอร์แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการของสัญญาณโรสโคปราคาถูก ผลการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยใช้วิธี Nonlinear least square ดังนั้นกาลมานฟิลเตอร์และวิธี Nonlinear least square สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณโรสโคปราคาถูกให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Leavitt, J., Sideris, A., and Bobrow, J.E. (2006). High bandwidth tilt measurement using low-cost sensors, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol.11 (3), June 2006, pp. 1017-1022.
- [2] Kwang Yong Lim, Goh, F.Y.K., Wei Dong, Kim Doang Nguyen, I-Ming Chen, Song Huat Yeo, Duh, H.B.L., Chung Gon Kim. (2008). A Wearable Self-Calibrating, Wireless Sensor Network for Body Motion Processing, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2008, pp. 1017-1022.
- [3] Lai, Y.-C., Jan S.-S., Hsiao F.-B. (2010). Development of a Low-Cost Attitude and Heading Reference System Using a Three-Axis Rotating Platform, *Sensors*, vol.10 (4) , March 2010, pp. 2472-2491.
- [4] Nebot, E., Durrant-Whyte, H. (1999). Initial calibration and alignment of low-cost inertial

navigation units for land vehicle applications, *Journal of Robotic Systems*, vol.16 (2), February 1999, pp. 81-92.

- [5] Park, S., Horowitz, R. (2005). Discrete time adaptive control for a MEMS gyroscope, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol.19, April 2005, pp. 485-503.
- [6] Chang, B.-S., Lee, J.-G., Kang, T. (2006). Design and performance test of digital rebalance loop for MEMS gyroscope, *Key Engineering Materials*, vol.326-328, December 2006, pp. 249-252.
- [7] Fei, J., Ding, H., System Dynamics and Adaptive Control for MEMS Gyroscope Sensor, *International Journal of Advanced Robotic System*, vol.7 (4), pp.81-86, 2010.
- [8] Wang, L., Hao, Y., Wang, F., Calibration of Low Cost MEMS Inertial Measurement Unit for an FPGA-based Navigation System, *IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 181-186, June 2011.
- [9] Vaganay, J., et al., Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data, *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 277-282, May 1993.
- [10] Qian, H., Xia, Q., et al., On modeling of random drift of MEMS gyroscope and design of Kalman filter, *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 4355 - 4360, August 2009.
- [11] Sahawneh, L., Development and calibration of low cost MEMS IMU for UAV applications, *International Symposium on Mechatronics and Its Applications (ISMA) 5th*, pp. 1-9, May 2008.