

METODE KALIBRASI SENSOR RATE-GYROSCOPE UNTUK IMU ROKET [CALIBRATION METHOD OF RATE-GYROSCOPE SENSOR FOR IMU ROCKET]

Wahyudi ^{*,**}), Adhi Susanto ^{**}), Wahyu Widada ^{***}), Sasongko Pramono Hadi ^{**})

^{*)} Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

^{**}) Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

^{***})Peneliti Bidang Telemetri dan Muatan Roket, LAPAN

e-mail : wahyuditinom@yahoo.com

ABSTRACT

Rate-gyroscope sensor is used in the IMU to measure the rotation angle in three axes. The output of rate-gyroscope sensor is a voltage which is the angular rate, so to obtain the angle used once an integral process. The integral result of rate-gyroscope sensor depend on sampling time or the cycle time of program to get the datum, so the integral calculation depends on the processor speed of microcontroller (computer). Using of the different sampling time will affect the integral result or in other words we can say that for the same program, if we apply it to a different microcontroller, we will obtain the different calculation. This paper presents the calibration method for determining the calibration factor on the rate-gyroscope sensor, so we will get the actual angle value. The rate-gyroscope sensors on different axes have different characteristics, so each sensor needs to be calibrated. In the experiment results, the calibration factors in three axes are different in both for the clockwise rotation and counterclockwise rotation.

Key words: *Calibration, Rate-gyroscope, IMU*

ABSTRAK

Sensor *rate-gyroscope* banyak digunakan pada IMU untuk mengukur sudut putaran pada tiga sumbu. Keluaran sensor *rate-gyroscope* berupa tegangan yang setara dengan kecepatan sudut, sehingga untuk mendapatkan data sudut diperlukan proses integral sekali. Hasil integral terhadap keluaran sensor *rate-gyroscope* dipengaruhi oleh waktu *sampling* atau lebih tepatnya adalah waktu siklus program dalam mengambil data, sehingga perhitungan proses integral tergantung pada kecepatan mikrokontroler (komputer) yang digunakan. Penggunaan waktu *sampling* yang berbeda akan mempengaruhi hasil integral atau dengan kata lain dapat dikatakan bahwa untuk program yang sama, jika diterapkan pada mikrokontroler yang berbeda akan menghasilkan perhitungan integrasi yang berbeda. Pada makalah ini disajikan metode kalibrasi untuk menentukan faktor kalibrasi pada sensor *rate-gyroscope*, sehingga hasil perhitungan integrasi akan menghasilkan nilai sudut yang sebenarnya. Penggunaan sensor *rate-gyroscope* pada sumbu yang berbeda mempunyai karakteristik yang berbeda, sehingga masing-masing sensor perlu dilakukan kalibrasi secara bersamaan. Pada hasil pengujian diperoleh nilai faktor kalibrasi sensor *rate-gyroscope* adalah pada ketiga sumbu berbeda baik untuk putaran searah jarum jam atau berlawanan arah dengan jarum jam.

Kata kunci: *Kalibrasi, Rate-gyroscope, IMU*

1 PENDAHULUAN

Sensor *rate-gyroscope* perlu dikalibrasi sebelum digunakan pada suatu sistem navigasi, seperti pada sistem navigasi helikopter (Wang, J. *et al.*, 2006) dan pada sistem navigasi kendaraan darat (Ghoda, S., 2006). Banyak metode kalibrasi terhadap sensor *rate-gyroscope* yang telah dilakukan, yaitu dengan cara menghilangkan kesalahan yang ditimbulkan oleh sensor pada saat sensor digunakan, diantaranya adalah dengan melakukan kompensasi terhadap kesalahan bias (Arnaudov, *et al.*, 2005; Madgwick, S, 2010), mempertimbangkan adanya pengaruh temperatur dengan menggunakan *wavelet* (Shen, *et al.*, 2010) dan dengan menggunakan filter Kalman (Wang, Li, *at al.*, 2011). Adem Gokhan Hayal melakukan kalibrasi dengan melakukan estimasi terhadap kesalahan pada sensor (Hayal, 2010), sedangkan G. Artese dan A. Trecroci, 2008, melakukan kalibrasi dengan menggunakan filter Kalman untuk menghilangkan kesalahan yang ada pada sensor (Artese *et al.*, 2008). P. Aggarwal menyampaikan beberapa metode kalibrasi yang ditentukan dari sumber kesalahan sensor, yaitu dengan melakukan estimasi terhadap kesalahan deterministik dari sensor *rate-gyroscope* (Aggarwal, P *et al.*, 2008).

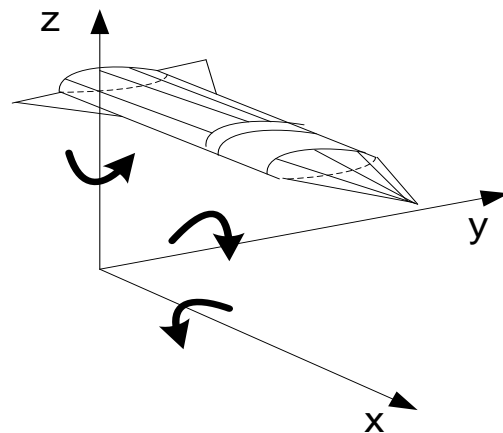
Sensor dinamik *rate-gyroscope* dengan menggunakan teknologi *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS) adalah sensor kecepatan sudut yang banyak digunakan dalam pembuatan IMU untuk roket. Setiap sensor *rate-gyroscope* mempunyai spesifikasi yang berbeda-beda, sehingga penggunaan sensor pada tiga sumbu (*roll*, *pitch*, dan *yaw*), masing-masing sensor harus dikalibrasi dan menghasilkan faktor kalibrasi yang berbeda (Wang, Jiandong *et al.*, 2006; Wang, Li *et al.*, 2011).

Makalah ini membahas metode kalibrasi sensor *rate-gyroscope* dengan mencari faktor kalibrasi (Madgwick, S, 2010), sehingga hasil integral kecepatan sudut yang merupakan keluaran sensor

sama dengan sudut uji dan dengan menghilangkan faktor bias sensor dengan menggunakan metode *discrimination window* (Seifert, K. and Camacho, O, 2007). Kalibrasi dilakukan terhadap tiga buah sensor *rate-gyroscope* tipe ADXRS150 dengan alat uji yang dapat diputar pada tiga sumbu (x, y dan z).

2 METODE KALIBRASI

Kalibrasi bertujuan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang benar dan dalam hal ini dilakukan dengan menentukan nilai faktor kalibrasi yang digunakan untuk menentukan besarnya sudut putar pada tiga sumbu x, y, dan z. Gerak rotasi pada sumbu x disebut *roll* (ϕ), rotasi pada sumbu y disebut *pitch* (θ), dan rotasi pada sumbu z disebut *yaw/azimuth* (ψ). Rotasi dikatakan positif adalah jika dilihat dari titik asal, putaran searah dengan putaran jarum jam. Pada Gambar 2-1 diperlihatkan arah gerak rotasi pada tiga sumbu.



Gambar 2-1: Gerak rotasi pada 3 sumbu

Algoritma untuk menentukan faktor kalibrasi sensor pada tiga sumbu x, y, z, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Madgwick, S, 2010).

$$\min_{k \in \mathbf{R}} \left[r - \sum_{t=0}^n T(k_{xyz,t} G_{xyz,t} - b_{xyz,t}) \right]^2 \quad (2-1)$$

Nilai faktor kalibrasi yang akan dicari adalah k_t , sedangkan r adalah besar sudut uji yang telah ditentukan, T adalah periode *sampling* waktu pengambilan

data, G_t adalah data pengukuran dari sensor *rate-gyroscope* yang akan dikalibrasi, t adalah waktu ke- t pengambilan data, dan b_t adalah bias pada waktu ke- t . Sebelum dilakukan kalibrasi terhadap sensor, bias yang ada pada setiap sensor dihilangkan dengan menggunakan metode *discrimination window* (Seifert, K. and Camacho, O, 2007), sehingga diperoleh persamaan (2-2).

$$\min_{k \in \mathbb{R}} \left[r - k_{xyz,t} \sum_{t=0}^n T G_{xyz,t} \right]^2 \quad (2-2)$$

Proses perhitungan yang berada pada tanda sigma adalah proses integral terhadap data hasil pembacaan sensor *rate-gyroscope*, sehingga proses yang terjadi pada persamaan 2-2 merupakan proses membandingkan (selisih) antara nilai sudut uji yang telah ditentukan dengan hasil integral data kecepatan sudut. Penggunaan kuadrat pada persamaan tersebut untuk menyatakan bahwa pendekatan perhitungan menuju nilai minimal yang dikehendaki, baik dari arah negatif maupun dari arah positif dianggap sama. Pada saat dilakukan kalibrasi, sensor diputar sebesar sudut uji r , dan pada saat yang sama dilakukan proses integral terhadap data kecepatan sudut dari $t = 0$ sampai $t = n$. Pada Gambar 2-2 diperlihatkan alat uji yang digunakan untuk melakukan kalibrasi.

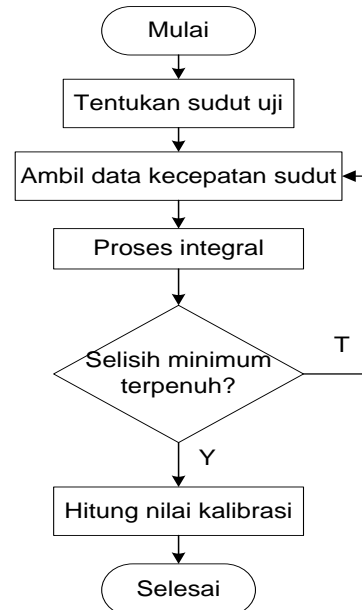


Gambar 2-2: Alat pengujian kalibrasi sensor *rate-gyroscope*

Jika syarat minimum yang telah ditentukan terpenuhi, maka dilakukan perhitungan nilai faktor kalibrasi.

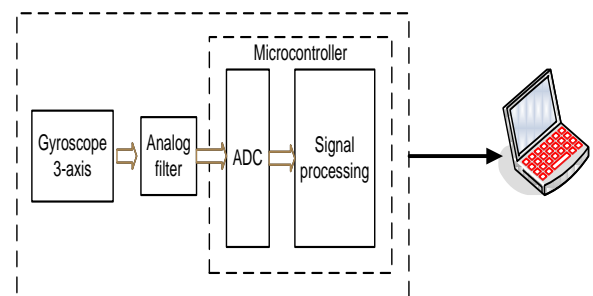
$$k_{xyz,t} = \frac{r}{\sum_{t=0}^n T G_{xyz,t}} \quad (2-3)$$

Diagram alir proses perhitungan nilai kalibrasi diperlihatkan pada Gambar 2-3.



Gambar 2-3: Diagram alir kalibrasi sensor *rate-gyroscope*

Data kecepatan sudut dari sensor *rate-gyroscope* dikirim ke komputer melalui kabel serial dan digunakan untuk menghitung nilai faktor kalibrasi. Skema kalibrasi sensor *rate-gyroscope* diperlihatkan pada Gambar 2-4.

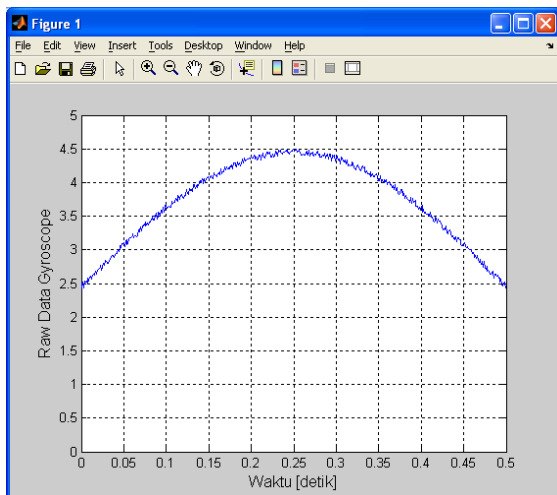


Gambar 2-4: Skema kalibrasi sensor *rate-gyroscope*

3 SIMULASI KALIBRASI

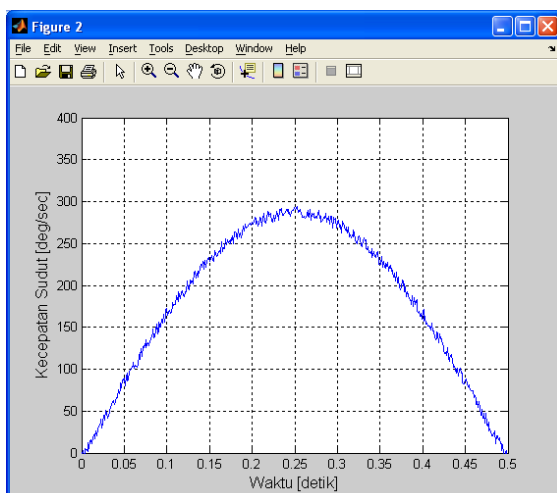
Simulasi kalibrasi sensor dilakukan dengan menggunakan program matlab. Simulasi dilakukan untuk mengetahui

bahwa algoritma untuk melakukan kalibrasi telah berjalan dengan benar. Frekuensi *sampling* data yang digunakan dalam simulasi adalah 1000 Hz, sehingga periode *sampling* data adalah 1 msec. Sensor disimulasikan berputar ke kanan sebesar 90° dan nilai *offset* sensor adalah 2,5 Volt. Pada Gambar 3-1 diperlihatkan sinyal keluaran sensor *rate-gyroscope*.



Gambar 3-1: Sinyal keluaran *rate-gyroscope*

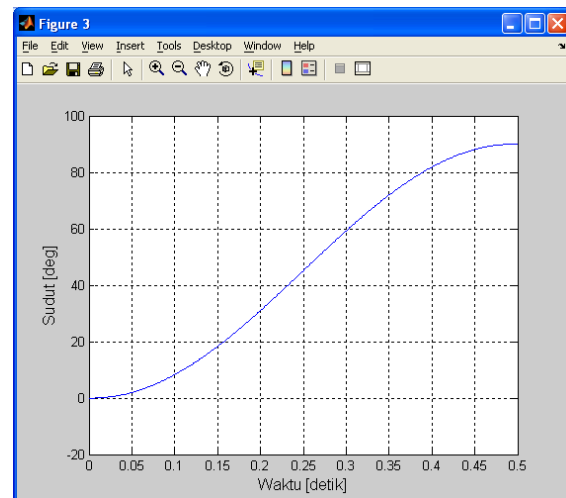
Sinyal keluaran sensor *rate-gyroscope* digunakan untuk menentukan nilai faktor kalibrasi. Nilai faktor kalibrasi hasil perhitungan digunakan sebagai faktor kalibrasi dari keluaran sensor. Pada Gambar 3-2 diperlihatkan kecepatan sudut setelah dilakukan kalibrasi dengan faktor kalibrasi.



Gambar 3-2: Kecepatan sudut

Dengan melakukan proses integral sekali terhadap sinyal kecepatan

sudut pada Gambar 3-2, maka diperoleh hasil perhitungan sudut seperti pada Gambar 3-3. Terlihat bahwa hasil integral dari kecepatan sudut adalah 90° seperti nilai yang diharapkan.



Gambar 3-3: Hasil perhitungan sudut

4 HASIL DAN ANALISIS

Pengujian sensor *rate-gyroscope* pada ketiga sumbu dilakukan dengan cara yang sama. Nilai faktor kalibrasi diperoleh dengan melakukan pengujian pada sudut uji 90°, 180°, 270°, dan 360°. Penentuan faktor kalibrasi pada *rate-gyroscope* dilakukan pada masing-masing sumbu putar dengan memutar pada sudut uji dan pada tiap-tiap sumbu ditentukan faktor kalibrasi untuk putaran searah jarum jam dan faktor kalibrasi untuk putaran berlawanan arah jarum jam.

Percobaan penentuan faktor kalibrasi pada masing-masing sudut uji dilakukan dengan melakukan perhitungan sebanyak sepuluh kali pengujian dan mengambil nilai rata-ratanya pada tiap variasi sudut uji, sedangkan variasi sudut uji untuk tiap-tiap sumbu adalah sama. Faktor kalibrasi yang digunakan merupakan rata-rata dari hasil semua sudut uji.

Hasil percobaan penentuan faktor kalibrasi pada sumbu *roll* untuk putaran searah jarum jam dan berlawanan arah dengan jarum jam diperlihatkan pada Tabel 4-1 dan Tabel 4-2.

Tabel 4-1: SUMBU *ROLL* SEARAH JARUM JAM

No.	Sudut uji (°)	Rata-rata faktor kalibrasi
1	90	0,251104957
2	180	0,247034178
3	270	0,249290402
4	360	0,248054130

Dari Tabel 4-1 dapat dihitung rata-rata faktor kalibrasi untuk *rate-gyroscope* pada sumbu *roll* dan searah jarum jam adalah 0,248870917.

Tabel 4-2: SUMBU *ROLL* BERLAWANAN ARAH JARUM JAM

No.	Sudut uji (°)	Rata-rata faktor kalibrasi
1	90	0,263837713
2	180	0,273242345
3	270	0,263094745
4	360	0,264800910

Dari Tabel 4-2 dapat dihitung rata-rata faktor kalibrasi untuk *rate-gyroscope* pada sumbu *roll* dan berlawanan arah jarum jam adalah sebesar 0,266243928.

Hasil percobaan penentuan faktor kalibrasi pada sumbu *pitch* untuk putaran searah jarum jam dan berlawanan arah dengan jarum jam, masing-masing diperlihatkan pada Tabel 4-3 dan Tabel 4-4.

Tabel 4-3: SUMBU *PITCH* SEARAH JARUM JAM

No.	Sudut uji (°)	Rata-rata faktor kalibrasi
1	90	0,259939872
2	180	0,235890095
3	270	0,236447129
4	360	0,236824693

Dari Tabel 4-3 dapat dihitung rata-rata faktor kalibrasi untuk *rate-gyroscope* pada sumbu *pitch* dan searah jarum jam adalah 0,242275447.

Tabel 4-4: SUMBU *PITCH* BERLAWANAN ARAH JARUM JAM

No.	Sudut uji (°)	Rata-rata faktor kalibrasi
1	90	0,261049130
2	180	0,262632206
3	270	0,263116336
4	360	0,262947252

Dari Tabel 4-4 dapat dihitung rata-rata faktor kalibrasi untuk *rate-gyroscope* pada sumbu *pitch* dan berlawanan arah jarum jam adalah sebesar 0,262436231.

Hasil percobaan penentuan faktor kalibrasi pada sumbu *yaw* untuk putaran searah jarum jam dan berlawanan arah dengan jarum jam dapat dilihat pada Tabel 4-5 dan Tabel 4-6.

Tabel 4-5: SUMBU *YAW* SEARAH JARUM JAM

No.	Sudut uji (°)	Rata-rata faktor kalibrasi
1	90	0,281391762
2	180	0,281100234
3	270	0,281864657
4	360	0,281965416

Dari Tabel 4-5 dapat dihitung rata-rata faktor kalibrasi untuk *rate-gyroscope* pada sumbu *yaw* dan searah jarum jam adalah 0,281580517

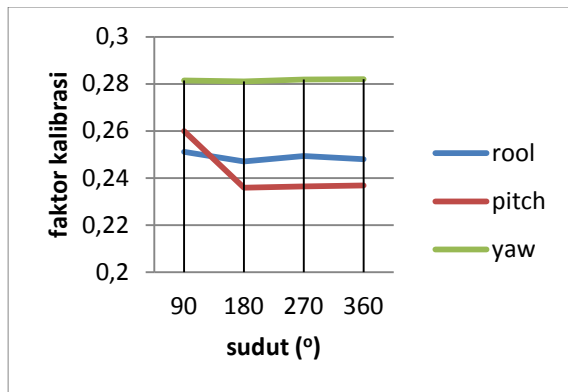
Tabel 4-6: SUMBU *YAW* BERLAWANAN ARAH JARUM JAM

No.	Sudut uji (°)	Rata-rata faktor kalibrasi
1	90	0,271342959
2	180	0,272800600
3	270	0,272384684
4	360	0,269881444

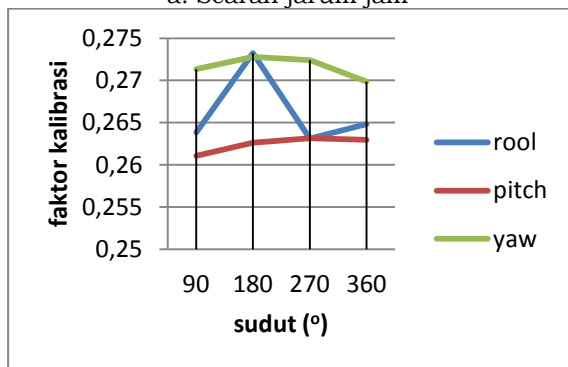
Dari Tabel 4-6 dapat dihitung rata-rata faktor kalibrasi untuk *rate-gyroscope* pada sumbu *yaw* dan berlawanan arah jarum jam adalah sebesar 0,271602422.

Hasil pengujian faktor kalibrasi sensor *rate-gyroscope* pada ketiga sumbu diperlihatkan pada Gambar 4-1. Dari Gambar 4-1 terlihat bahwa faktor kalibrasi sensor *rate-gyroscope* untuk ketiga sumbu adalah berbeda, baik untuk putaran searah jarum jam maupun untuk putaran berlawanan arah dengan jarum jam. Perbedaan faktor kalibrasi pada masing-masing sudut untuk putaran berlawanan arah dengan jarum jam relatif lebih sedikit jika dibandingkan dengan putaran searah jarum jam. Pengujian sumbu *yaw* pada masing-masing sudut pengujian mempunyai perbedaan faktor kalibrasi yang lebih kecil jika dibandingkan dengan

kedua sumbu yang lain, baik untuk putaran searah jarum jam maupun untuk putaran berlawanan arah dengan jarum jam. Faktor kalibrasi pada semua sumbu dan semua sudut uji mempunyai nilai kurang dari satu, hal ini menunjukkan bahwa proses integral terhadap data keluaran sensor *rate-gyroscope* bernilai lebih besar daripada sudut uji.



a. Searah jarum jam



b. Berlawanan arah jarum jam

Gambar 4-1 : Hasil faktor kalibrasi sensor

5 KESIMPULAN

Sebelum digunakan untuk melakukan pengukuran sudut, semua sensor *rate-gyroscope* harus dikalibrasi terlebih dahulu. Algoritma penentuan faktor kalibrasi sensor *rate-gyroscope* dilakukan dengan memutar sensor pada sudut tertentu dan selanjutnya nilai faktor kalibrasi akan dihitung. Ada perbedaan faktor kalibrasi yang diperoleh untuk ketiga sumbu, baik untuk putaran searah dengan jarum jam atau berlawanan arah dengan jarum jam. Nilai faktor kalibrasi ini akan berbeda jika program dijalankan pada mikrokontroler dengan spesifikasi yang berbeda.

DAFTAR RUJUKAN

- Aggarwal, P., Syed, Z., Niu, X. and El-Sheimy, N., 2008. *A Standard Testing and Calibration for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units*, Journal of Navigation, 611, 323-336.
- Arnaudov, Rumen, Yassen Angelo, 2005. *Improvement in the Method for Bias Drift Compensation in Micromechanical Gyroscopes*, Radioengineering, vol. 14 no 2, pp 7-12.
- Artese, G. and Trecroci, A., 2008. *Calibration of a Low Cost MEMS INS Sensor for an Integrated Navigation System*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing.
- Godha, S., 2006. *Performance Evaluation of Low Cost MEMS-Based IMU Integrated with GPS for Land Vehicle Navigation Application*, Thesis, UCGE reports Number 20239, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- Hayal, Adem Gokhan, 2010. *Static Calibration of the Tactical Grade Inertial Measurement Units*, Graduate Program in Geodetic Science and Surveying The Ohio State University.
- Madgwick, Sebastian O. H., 2010. *Automated Calibration of Accelerometer, Magnetometers and Gyroscope-A Feasibility Study*, unpublished.
- Seifert, K. and Camacho, O., 2007. *Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers*, Freescale Semiconductor.
- Shen, Sheng-Chih, Chia-Jung Chen, and Hsin-Jung Huang, 2010. *A New Calibration Method for Low Cost MEMS Inertial Sensor Module*, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 18, No. 6, pp. 819-824.

- Wang, Jiandong. Liu, Yunhui., Fan, Weihong., 2006. *Design and Calibration for a Smart Inertial Measurement Unit for Autonomous Helicopters Using MEMS Sensors*, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Luoyang China, pp. 956-961.
- Wang, Li, Fei Wang, 2011. *Intelligent Calibration Method of low cost MEMS Inertial Measurement Unit*

for an FPGA-based Navigation System, International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.4, No.2, pp. 32 – 41.

