

KALIBRASI SENSOR MULTIGAIN AKSELEROMETER DENGAN ACUAN PERCEPATAN GRAVITASI BUMI

Wahyudi^{*)}, and Ngatelan

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}Email : wahyuditinom@yahoo.com

Abstrak

Akselerometer merupakan salah satu sensor percepatan yang banyak dipakai dalam pembuatan IMU (*Inertial Measurement Unit*). Sensor akselerometer dijual di pasaran dalam keadaan belum terkalibrasi, sehingga tidak bisa langsung digunakan. MMA7361L merupakan akselerometer dengan 2 pilihan tingkat sensitivitas, yaitu 1,5 g dan 6 g, sehingga penggabungan 2 unit sensor tersebut dapat digunakan dalam perancangan sensor multigain. Kalibrasi akselerometer dipengaruhi oleh tegangan catu daya, sehingga diperlukan catu daya yang stabil dalam pemakaiannya. Keluaran sensor pada saat tidak ada eksitasi dari luar disebut sebagai nilai *offset* sensor. Kalibrasi sensor multigain dapat dilakukan secara bersamaan dengan membandingkan percepatan gravitasi bumi. Alat utama yang digunakan untuk melakukan kalibrasi sensor dan pengujian sensor adalah simulator gerak 3 sumbu ST-3176-TC-10. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor dengan tipe yang sama mempunyai sensitivitas dan nilai *offset* yang berbeda-beda. Sensor MMA7361L 1,5 g mempunyai nilai sensitivitas yang lebih tinggi dan nilai (*Root Mean Square Error*) RMSE yang lebih rendah jika dibandingkan dengan MMA7361L 6 g.

Kata Kunci : Multisensor, Akselerometer, Kalibrasi

Abstract

Accelerometer is one acceleration sensor which is widely used in the manufacture of IMU (Inertial Measurement Unit). Accelerometer which is sold in the market is an uncalibrated sensor, so it cannot be directly used. MMA7361L is an accelerometer with 2 levels of sensitivity, which is 1.5 g and 6 g, thus merging two of the sensor unit can be used in the design of the sensor multi-gain. Calibration of accelerometer is affected by the power supply voltage, so that a stable power supply is required in its use. The output of the sensor when there is no external excitation is referred to as sensor offset value. Multi-gain sensor calibration can be done simultaneously by comparing the acceleration of gravity. The main tool used to calibrate the sensor and test sensor is a 3-axis motion simulator ST-3176-TC-10. The test results showed that the sensors of the same type had different of sensitivities and offset values. MMA7361L 1.5 g sensor has higher sensitivity and lower (*Root Mean Square Error*) RMSE values than MMA7361L 6 g.

Keywords : Multisensor, accelerometer, calibration

1. Pendahuluan

IMU (*Inertial Measurement Unit*) merupakan salah satu sensor dinamika yang banyak digunakan secara luas pada kehidupan manusia. Komponen utama yang digunakan dalam perancangan sensor IMU adalah akselerometer dan giroskop [2-5,7-9,22]. Ghassemi dkk. menggunakan 2 unit akselerometer yang dipasang pada sambungan lengan *miniexcavator* untuk mendeteksi gerak lengan tersebut [10]. IMU yang terdiri atas 3 unit akselerometer, oleh Amanatiadis dkk., IMU digunakan untuk merancang sistem pendeteksi langkah kaki [1], sedangkan oleh Curone dkk. IMU digunakan untuk melakukan klasifikasi aktivitas gerak tubuh manusia [6].

Sensor MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) yang diproduksi oleh suatu pabrik tidak dalam keadaan terkalibrasi, sehingga setiap sensor harus dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan. Jika sensor yang belum terkalibrasi digunakan, maka akan diperoleh banyak galat pada data hasil pengukuran [21]. Menurut Wang dan Wang ada 2 jenis galat pada sensor inersia yaitu galat deterministik dan galat stokastik [20]. Galat stokastik meliputi *bias-drift* atau *factor-drift* yang bervariasi terhadap waktu dan dinamika. Galat deterministik meliputi ketidakortogonalan (*misalignment*), bias, dan faktor skala. Galat stokastik berhubungan dengan ketidakstabilan bias dan ketidakstabilan faktor skala. Galat deterministik dapat dihilangkan dengan

kalibrasi. Setiap sensor mempunyai galat yang berbeda, sehingga masing-masing sensor harus dikalibrasi [21]. Kinerja sistem inersia sangat ditentukan oleh kinerja IMU. Galat yang terjadi pada akselerometer dan giroskop menyebabkan galat yang semakin besar pada sistem navigasi dengan bertambahnya waktu, sehingga sistem navigasi tidak akan berguna [17]. Unsal dan Demirbas melakukan estimasi terhadap galat parameter deterministik dan stokastik pada sensor IMU [18]. Komponen utama sistem navigasi yang banyak digunakan pada saat ini adalah IMU yang terdiri atas akselerometer dan giroskop. IMU dapat dibuat dengan biaya yang rendah dan berkualitas tinggi, dengan menggunakan algoritme untuk melakukan kompensasi galat. Skog dan Handel melakukan kalibrasi IMU yang terdiri atas 1 unit akselerometer 2 sumbu ADXL203, 1 unit akselerometer 1 sumbu ADXL103, dan 3 unit giroskop 1 sumbu ADXRS150 [15]. Model matematis sensor adalah bahwa keluaran sensor terdiri atas faktor skala, ketidakortogonalan, bias, dan derau. Kalibrasi dilakukan untuk menentukan faktor skala, ketidakortogonalan, dan bias. Shen dkk. melakukan kalibrasi terhadap sensor IMU yang terdiri atas 1 unit akselerometer 2 sumbu ADXL213 dan 1 unit giroskop 1 sumbu ADXRS150 [13]. Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan gelombang singkat (*wavelet*) untuk menentukan faktor skala dan bias. Sun dkk. mengusulkan metode kalibrasi nol pada SINS [16]. Metode kalibrasi ini bertujuan untuk mencari faktor skala dan ketidakortogonalan pada akselerometer dan giroskop. Model matematis yang disampaikan terdiri atas kalibrasi nol dan ketidakortogonalan. Keluaran giroskop berupa faktor skala dikalikan dengan kecepatan sudut dan ditambah dengan galat pada saat *offset*, sedang kecepatan sudut mengandung unsur ketidakortogonalan pada ketiga sumbu. Keluaran akselerometer berupa faktor ketidakortogonalan dikalikan dengan percepatan dan ditambah galat pada saat *offset*. Kalibrasi nol giroskop dan akselerometer pada masing-masing sumbu dilakukan dengan mengambil data pada 4 posisi INS yang berbeda. Galat pada saat *offset* diperoleh dengan rata-rata dari 4 posisi tersebut.

Wang dkk. melakukan kalibrasi 1 unit akselerometer 3 sumbu untuk menentukan faktor penguatan dan bias dengan menggunakan model matematis [21]. Kalibrasi dilakukan dengan prinsip dasar bahwa jumlah kuadrat keluaran akselerometer pada sumbu x, y, dan z adalah sama dengan kuadrat vektor gravitasi. Dua parameter pada model matematis ditentukan dengan melakukan pengukuran keluaran sensor pada 6 sudut yang berbeda. Wang dan Wang melakukan kalibrasi sensor IMU yang terdiri atas 3 unit giroskop 1 sumbu ADXR150 dan 3 unit akselerometer 1 sumbu ADXL210 [20]. Kalibrasi dilakukan untuk mengetahui faktor skala dan bias. Kedua sensor dimodelkan secara matematis dengan 2 parameter tersebut. Vaccaro mengusulkan algoritme untuk menghitung komponen *Angle Random Walk* (ARW) dan *Rate Random Walk* (RRW) dari sensor giroskop [19].

Model matematis dari sensor giroskop adalah bahwa keluaran sensor terdiri atas nilai sebenarnya, bias, dan derau. Sipos dkk. mengusulkan prosedur kalibrasi akselerometer 3 sumbu untuk meminimumkan waktu proses dan biaya [14]. Akselerometer yang digunakan pada ketiga sumbu adalah CXL02LF3, AHRS M3, dan ADIS16405. Metode kalibrasi yang dilakukan adalah dengan melihat kenyataan bahwa jumlah kuadrat dari percepatan ketiga sumbu pada saat diam adalah sama dengan kuadrat gravitasi. Kalibrasi dilakukan dengan 12 posisi yang berbeda untuk masing-masing sumbu, sehingga secara keseluruhan ada 36 posisi yang berbeda. Kinerja sensor dapat diketahui dengan melihat *Root Mean Square Error* (RMSE) sensor sebelum dan sesudah terkalibrasi.

Seifert dan Camacho menjelaskan algoritme yang digunakan untuk mengolah data keluaran akselerometer menjadi data kecepatan dan posisi [12]. Sensor yang digunakan adalah 1 unit akselerometer 3 sumbu MMA7260QT dan mikrokontroler yang digunakan adalah 9S08QG8. Algoritme untuk mendapatkan data kecepatan dan jarak terdiri atas kalibrasi, pemfilteran, penjendeleaan, dan proses integral. Kalibrasi terhadap sensor dilakukan pada saat sensor tidak mendapatkan gerak percepatan, sehingga tegangan keluaran sensor merupakan setengah dari tegangan masukan. *Moving average* merupakan filter yang digunakan untuk menghilangkan derau keluaran sensor. Penjendeleaan dilakukan karena pada saat tidak ada percepatan, terkadang keluaran sensor tidak nol, sehingga algoritme ini diperlukan untuk membuat keluaran sensor bernilai nol. Data percepatan keluaran sensor diintegrasikan sekali untuk mendapatkan data kecepatan dan diintegrasikan dua kali untuk mendapatkan data posisi. Proses integral yang digunakan adalah Runge-kutta orde satu.

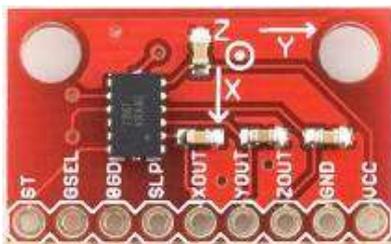
Makalah ini menyajikan kalibrasi sensor multigain akselerometer MMA7361L dengan menggunakan simulator gerak 3 sumbu ST-3176-TC-10 serta dengan acuan percepatan gravitasi bumi. Kinerja sensor hasil kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai RMSE.

2. Metode

2.1 Akselerometer MMA7361L

Akselerometer MMA7361L merupakan sensor percepatan 3 sumbu dengan konsumsi energi rendah, dilengkapi dengan pengkondisi isyarat, filter LPF 1 kutub (*pole*), kompensasi suhu, dan mempunyai 2 tingkat sensitivitas [23]. Sensor dapat bekerja pada kisaran tegangan antara 2,2 V dan 3,6 V dengan konsumsi arus sebesar 400 μ A dan dilengkapi dengan mode *sleep* dengan konsumsi arus sebesar 3 μ A. Pada saat tidak ada percepatan, tegangan keluaran sensor sebesar setengah dari tegangan catu dan disebut sebagai tegangan *offset*. MMA7361L mempunyai 2 pilihan sensitivitas, yaitu 800 mV/g pada percepatan

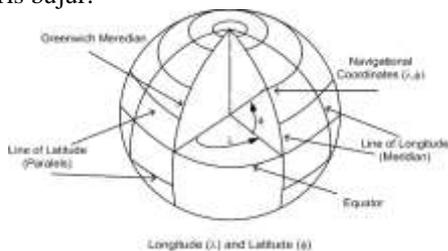
maksimal 1,5 g dan 206 mV/g pada percepatan maksimal 6 g. Pada saat pin *g-select* diberi logika rendah, maka sensor mempunyai percepatan maksimal 1,5 g, pada saat pin *g-select* diberi logika tinggi, maka sensor mempunyai percepatan maksimal 6 g. Sensor tidak akan rusak meskipun mendapat guncangan percepatan hingga 500 g dan berada pada suhu -40 °C sampai 125 °C. Pada penggunaannya, sensor membutuhkan tegangan catu daya yang stabil, karena tegangan *offset* dan sensitivitasnya sangat dipengaruhi oleh tegangan catu daya. Sensor dilengkapi dengan deteksi 0 g, yaitu jika percepatan pada ketiga sumbu adalah 0 g, maka kaki 0 *g-detect* akan mengeluarkan logika tinggi. Gambar 1 memperlihatkan gambar akselerometer yang digunakan dalam rancang bangun sensor IMU.



Gambar 1 Akselerometer tipe MMA7361L

2.2 Gravitasi Bumi

Koordinat suatu benda di permukaan bumi dapat dinyatakan dengan menggunakan letak garis bujur (*line of longitude/meridian*) dan garis lintang (*line of latitude/parallel*). Garis bujur membujur dari utara ke selatan dan garis lintang melintang mengelilingi bumi dari timur ke barat. Garis lintang dan garis bujur dinyatakan dalam derajat, menit, dan detik. Meridian Greenwich merupakan garis yang membujur melalui Greenwich dan dinyatakan sebagai 0° garis bujur, sedang letak 0° lintang adalah equator. Didefinisikan bahwa sudut positif dari garis bujur adalah arah di sebelah timur dari Greenwich dan sudut positif dari garis lintang adalah arah di sebelah utara dari equator. Letak suatu titik dipermukaan bumi dapat dinyatakan dengan koordinat (λ , ϕ) yang berarti bahwa titik tersebut terletak pada garis bujur λ° (sebesar λ° disebelah timur Greenwich) dan terletak pada garis lintang ϕ° (sebesar ϕ° di sebelah utara equator). Pada Gambar diperlihatkan gambar bumi dengan garis lintang dan garis bujur.



Gambar 2 Bumi dengan garis lintang dan garis bujur

Besar gaya gravitasi suatu titik dipermukaan bumi dipengaruhi oleh letak titik tersebut dan ketinggiannya dari permukaan laut. Salah satu pendekatan terhadap nilai gravitasi bumi yang dilakukan oleh McGreevy adalah sebagai berikut [11].

$$g_{RG} = \frac{GM}{a^2} \left[\begin{array}{l} 9.9816568475 \times 10^{-1} \\ + 5.2865923050 \times 10^{-3} \sin^2 \phi \\ - 2.0099579988 x \left(\frac{h}{a} \right) \end{array} \right]$$

Pendekatan tersebut mempunyai tingkat keakuratan 26 μ g dengan nilai a adalah jari-jari equator (6378,163 km), h adalah ketinggian dari permukaan laut, ϕ adalah garis lintang, dan $\frac{GM}{a^2} = 9,7982438986 \text{ m/s}^2$.

2.3 Mikrokontroler ATXMega128A1

Mikrokontroler AVR XMega128A1 beroperasi dengan energi kecil, kinerja tinggi, dan merupakan mikrokontroler berbasis *Reduced Instruction Set Computer* (RISC), yaitu bahwa hampir semua instruksinya berjalan dalam 1 siklus mesin [24]. Mikrokontroler dilengkapi dengan kristal internal yang mempunyai frekuensi 32 MHz, sehingga jika dioperasikan dengan kristal internal, maka mikrokontroler akan mempunyai kecepatan 32 *Million Instruction Per Second* (MIPS).

Memori mikrokontroler dibagi menjadi 2 bagian, yaitu memori data dan memori program. Program dapat dijalankan jika hanya diletakkan di memori program, sementara data dapat disimpan di memori data. Memori data terdiri atas memori I/O dengan kapasitas 4 KB, memori internal *Static Random Access Memory* (SRAM) dengan kapasitas 8 KB, memori *Electrically Erasable Programmable Read Only Memory* (EEPROM) dengan kapasitas 2 KB, dan memori eksternal dengan kapasitas hingga 16 KB. Program aplikasi mikrokontroler disimpan dalam memori *flash* yang mempunyai kapasitas sebesar 128 KB. Program yang disimpan dalam memori *flash* dapat dihapus dan diprogram ulang dengan menggunakan *Program and Debug Interface* (PDI) atau *Joint Test Action Group* (JTAG).

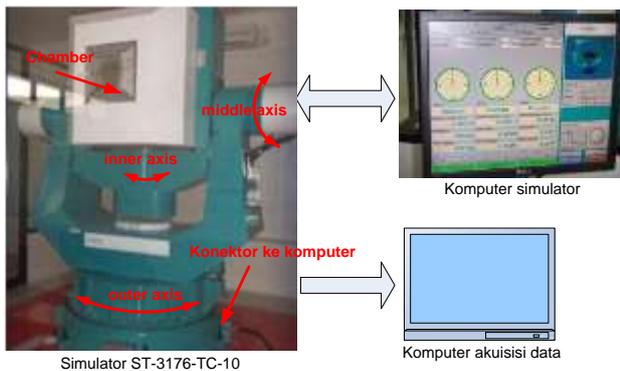
Mikrokontroler XMega128A1 mempunyai 6 unit *port* yang dapat digunakan sebagai I/O serbaguna, yaitu *port* A sampai dengan *port* F. Semua *port* terdiri atas 8 bit, bit 0 sampai dengan bit 7, yang masing-masing bit dapat difungsikan sebagai masukan atau keluaran, tergantung *setting* data di *Data Direction* (DIR) pada masing-masing *port*. Selain berfungsi sebagai masukan atau keluaran serbaguna, ada beberapa *port* yang mempunyai fungsi khusus seperti sebagai *Analog to Digital Converter* (ADC) atau sebagai tempat pengiriman data serial. Ada 2

port, yaitu port A dan port B, yang dapat digunakan sebagai masukan ADC. Ada 4 port yang dapat digunakan sebagai port serial, yaitu port C, D, E, dan F.

ADC mikrokontroler XMega128A1 mempunyai resolusi 12 bit dan mempunyai kecepatan dalam mencuplik data analog sampai dengan 2 Mega sampling per second (MSPS). Tegangan referensi ADC yang digunakan dapat ditentukan atas tiga pilihan tegangan referensi, yaitu 1 V secara internal, $V_{cc}/1,6$ secara internal, serta tegangan eksternal AREF untuk port A dan tegangan eksternal BREF untuk port B. Ada 2 mode pengoperasian ADC yaitu signed dan unsigned. Mode signed dapat digunakan untuk mengukur tegangan masukan positif dan negatif, sehingga jangkauan data digital keluaran ADC adalah -2048 sampai dengan 2047 untuk resolusi 12 bit. Jika menggunakan mode unsigned, data digital keluaran ADC berada di antara 200 (GND) dan 4095 ($V_{REF} - \Delta V$), dengan $\Delta V = 0,005 \times V_{REF}$. Hasil konversi tegangan analog ke digital disimpan dalam Result Register (RES).

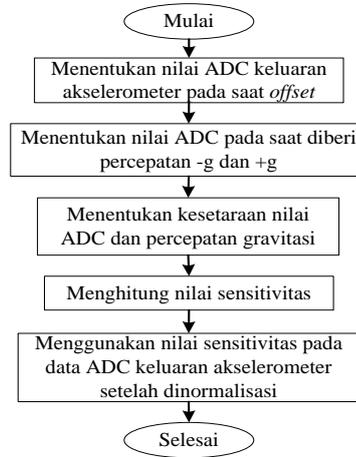
2.4 Gambaran Umum Perancangan Sistem

Alat utama yang digunakan untuk melakukan kalibrasi sensor dan pengujian sensor adalah simulator gerak 3 sumbu ST-3176-TC-10 [25]. Untuk mengoperasikan simulator diperlukan sumber tegangan 3 fasa 380 V dengan daya 50 kW. Alat simulator ini merupakan sistem yang mempunyai kecepatan dan posisi dengan akurasi tinggi. Sistem ini dirancang untuk digunakan dalam melakukan pengujian atau kalibrasi suatu sistem inersia dengan kinerja tinggi dan sistem inersia yang bermutu. Ketiga sumbu tersebut adalah sumbu bagian dalam (inner axis), sumbu menengah (middle axis), dan sumbu bagian luar (outer axis). Sumbu bagian dalam berupa meja yang berbentuk lingkaran dengan diameter 650 mm. Di sisi luar meja lingkaran tersebut terdapat 4 buah konektor yang dapat digunakan untuk menghubungkan sistem inersia yang diuji dengan peralatan luar yang digunakan untuk memonitor. Penggunaan simulator ST-3176-TC-10 pada proses kalibrasi diperlihatkan pada Gambar 3.



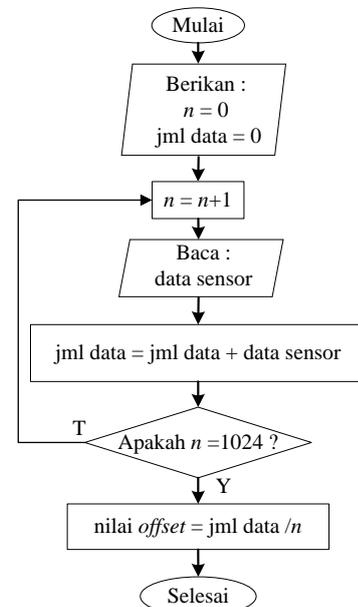
Gambar 3 Proses alir kalibrasi akselerometer

Sensitivitas akselerometer dipengaruhi oleh catu tegangan pada sensor dan karakteristik masing-masing sensor, sehingga setiap sensor harus dikalibrasi [21]. Diagram alir kalibrasi akselerometer diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram alir kalibrasi akselerometer

Pada saat tidak ada eksitasi dari luar, tegangan keluaran akselerometer bernilai sekitar separuh dari tegangan catu sensor dan disebut sebagai tegangan offset. Nilai offset sensor merupakan nilai tegangan atau nilai ADC sensor pada saat tidak diberi eksitasi dari luar. Pengambilan data dilakukan setelah keluaran sensor berada pada nilai offset, karena pada saat sensor diberi catu tegangan, keluaran sensor akan mengalami transien menuju nilai offset. Perhitungan nilai offset akselerometer dilakukan sekali sebelum sensor IMU digunakan. Diagram alir perhitungan nilai offset diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Diagram alir penentuan nilai offset

Perhitungan nilai *offset* akselerometer dapat dilakukan pada saat sensor dalam keadaan diam dan membentuk sudut 90° atau -90° dari arah vertikal, yaitu pada saat tidak ada pengaruh percepatan gravitasi bumi. Penentuan nilai *offset* dilakukan dengan mencari rata-rata dari 1024 data pada saat sensor dalam keadaan diam.

Menentukan nilai ADC pada saat diberi percepatan -g dan +g dapat dilakukan dengan cara mengatur sensor pada posisi vertikal (arah sensor ke atas), kemudian diputar 180°. Hubungan arah sensor dan nilai percepatan gravitasi bumi diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Pengaruh gravitasi bumi

Posisi sensor (°)	Arah sensor	Percepatan gravitasi (g)
0	ke atas	+ 1
180	ke bawah	- 1

Menentukan kesetaraan nilai ADC dan percepatan gravitasi bumi dapat dilakukan dengan menghitung nilai ADC pada saat *offset* dan nilai ADC pada saat mendapat percepatan gravitasi -g atau +g. Nilai percepatan gravitasi bumi adalah setara dengan nilai ADC pada saat mendapat percepatan gravitasi +g dikurangi dengan nilai ADC pada saat *offset* atau nilai ADC pada saat *offset* dikurangi dengan nilai ADC pada saat mendapat percepatan gravitasi -g.

Perhitungan nilai sensitivitas akselerometer dapat dilakukan dengan mengetahui kesetaraan percepatan gravitasi bumi dengan nilai ADC. Sensitivitas akselerometer merupakan nilai ADC pada saat sensor mendapat percepatan gravitasi sebesar g.

Nilai ADC dari keluaran akselerometer setelah dinormalisasi akan bernilai positif pada saat sensor mendapat percepatan positif dan bernilai negatif pada saat mendapatkan percepatan negatif (perlambatan). Nilai percepatan yang menggerakkan akselerometer adalah sebesar nilai ADC keluaran akselerometer setelah dinormalisasi dibagi dengan nilai sensitivitas akselerometer tersebut.

3. Hasil dan Analisa

Kalibrasi bertujuan untuk menghitung nilai percepatan dari data hasil keluaran akselerometer. Dalam melakukan kalibrasi sensor diperlukan perhitungan nilai *offset* dan nilai sensitivitas masing-masing sensor. Kalibrasi percepatan hasil keluaran akselerometer dibandingkan dengan percepatan gravitasi bumi dengan menggunakan simulator ST-3176-TC-10. Kalibrasi sensor yang sejenis dan terletak pada sumbu yang sama dilakukan secara bersamaan. Perhitungan nilai sensitivitas sensor dilakukan dengan menggunakan simulator ST-3176-TC-10, dengan cara meletakkan perangkat keras IMU di dalam *chamber*

kemudian diputar dengan besar sudut tertentu. Sumbu koordinat sensor IMU disesuaikan dengan sumbu koordinat simulator.

3.1 Nilai *offset* sensor.

Nilai *offset* akselerometer diperoleh ketika sensor dalam posisi horisontal atau pada saat sensor tidak dipengaruhi oleh percepatan gravitasi bumi dan tidak mendapat eksitasi dari luar. Perhitungan nilai *offset* sensor dilakukan dengan mengambil nilai rata-rata dari 1024 data ADC keluaran sensor dengan menggunakan filter *moving average* (MA). Data tersebut diambil pada saat sensor dalam keadaan diam dan tidak mendapat pengaruh eksitasi dari luar. Nilai *offset* 6 sensor percepatan yang digunakan untuk merancang sensor IMU tidak dapat dicari secara bersamaan. Jika suatu sumbu dalam posisi vertikal, maka kedua sumbu yang lain dalam posisi horisontal.

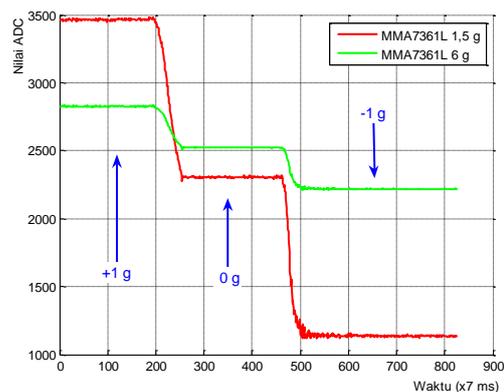
Hasil perhitungan nilai *offset* akselerometer diperlihatkan pada Tabel 2. Terlihat bahwa nilai *offset* akselerometer dengan tipe yang sama adalah berbeda, sehingga perhitungan nilai *offset* akselerometer tidak dapat digunakan untuk akselerometer yang lain.

Tabel 2 Nilai *offset* akselerometer

Akselerometer	Sumbu	Nilai ADC
MMA7361L 1,5 g	x	2321
	y	2308
	z	2832
MMA7361L 6 g	x	2515
	y	2604
	z	2656

3.2 Sensitivitas sensor.

Perhitungan sensitivitas akselerometer dilakukan dengan memutar sensor IMU yang ada di dalam *chamber* simulator, sehingga sensor mendapat percepatan gravitasi bumi sebesar 1 g, 0 g, dan -1 g. Pengaruh percepatan gravitasi terhadap keluaran akselerometer diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Pengaruh gravitasi bumi pada akselerometer

Pada saat akselerometer menghadap ke atas, sensor dipengaruhi percepatan gravitasi bumi sebesar 1 g, pada saat diputar 90° sensor tidak dipengaruhi percepatan gravitasi bumi, dan pada saat diputar 180° sensor dipengaruhi percepatan gravitasi bumi sebesar -1 g. Nilai sensitivitas akselerometer yang diperlihatkan pada Tabel 3 merupakan nilai rata-rata perhitungan sensitivitas pada 1 g dan -1 g.

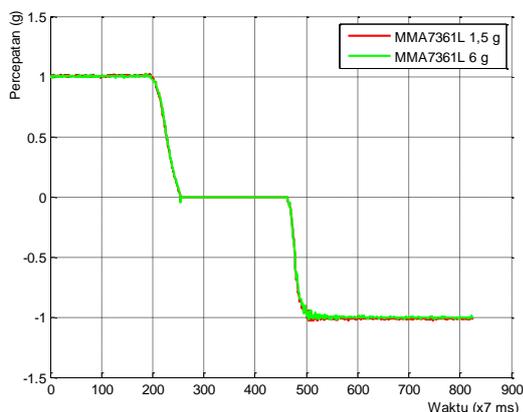
Tabel 3 Sensitivitas akselerometer

Akselerometer	Sensitivitas (unit nilai ADC/ g)		
	Sumbu x	Sumbu y	Sumbu z
MMA7361L 1,5 g	1164	1168	1165
MMA7361L 6 g	305,5	296	308

Tabel 3 menunjukkan bahwa akselerometer dengan tipe yang sama mempunyai nilai sensitivitas yang berbeda, sehingga perhitungan nilai sensitivitas akselerometer tidak dapat digunakan untuk akselerometer yang lain. Terlihat pula, bahwa nilai sensitivitas akselerometer MMA7361L 1,5 g lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai sensitivitas akselerometer MMA7361L 6 g.

3.3 Kalibrasi data sensor

Kalibrasi data sensor dilakukan dengan cara membagi nilai data sensor tersebut dengan nilai sensitivitasnya setelah proses normalisasi dan penggunaan filter DW. Data yang sudah terkalibrasi akan menunjukkan nilai pengukuran sensor. Gambar 7 memperlihatkan keluaran akselerometer setelah terkalibrasi ketika diberi eksitasi dari luar berupa percepatan 1 g, 0 g, dan -1 g.



Gambar 7 Sensor IMU diberi percepatan gravitasi

Gambar 7 juga memperlihatkan bahwa akselerometer MMA7361L 6 g mempunyai derau yang lebih banyak jika dibandingkan dengan MMA7361L 1,5 g.

3.4 Perhitungan RMSE.

Perhitungan RMSE untuk sensor percepatan dilakukan pada saat diberi percepatan sebesar -1 g dan 1 g.

Perbandingan nilai RMSE kedua akselerometer diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Perbandingan nilai RMSE akselerometer

Akselerometer	RMSE ($\times 10^{-3} \text{ m/s}^2$)	
	-1 g	1 g
MMA7361L 1,5 g	64,14	56,59
MMA7361L 6 g	72,94	64,05

Tabel 4 memperlihatkan bahwa RMSE pengukuran percepatan dengan menggunakan akselerometer MMA7361L 1,5 g bernilai lebih kecil jika dibandingkan dengan menggunakan MMA7361L 6 g. Hal ini dapat dikatakan bahwa untuk pengukuran percepatan di antara -1,5 g dan 1,5 g lebih baik dilakukan dengan menggunakan akselerometer MMA7361L 1,5 g, karena selain mempunyai sensitivitas yang lebih tinggi juga memberikan nilai RMSE yang lebih kecil. Sensor dengan sensitivitas yang tinggi akan memberikan ketelitian yang tinggi terhadap hasil pengukuran, sedangkan RMSE yang kecil akan memberikan ketepatan yang tinggi terhadap hasil pengukuran.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

1. Semua sensor akselerometer harus dikalibrasi sebelum digunakan. Setiap sensor mempunyai nilai *offset* dan sensitivitas yang berbeda-beda, meskipun sensor tersebut mempunyai tipe yang sama.
2. Hasil perhitungan nilai sensitivitas akselerometer tidak dapat digunakan untuk akselerometer yang lain.
3. RMSE pengukuran percepatan dengan menggunakan akselerometer MMA7361L 1,5 g bernilai lebih kecil jika dibandingkan dengan menggunakan MMA7361L 6 g.

Referensi

- [1]. Amanatiadis, A., D. Chrysostomou, D. Koulouriotis, and A. Gasteratos, 2010, A Fuzzy Multi-Sensor Architecture for Indoor Navigation, *Proceedings of the IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, pages 452-457.
- [2]. Barton, J., A. Gonzalez, J. Buckley, B. O'Flynn, and S. O'Mathuna, 2007, Design, Fabrication and Testing of Miniaturised Wireless Inertial Measurement Units (IMU), *Proceedings of Electronic Components and Technology Conference*, pages 1143 - 1148.
- [3]. Bekking, J. K. , 2009, Calibration of a Novel MEMS Inertial Reference Unit. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 58(6), 1967-1974.
- [4]. Beravs, T., J. Podobnik, and M. Munih, 2012, Three-Axial Accelerometer Calibration Using Kalman Filter Covariance Matrix for Online Estimation of Optimal Sensor Orientation. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 61(9), 2501-2511.

- [5]. Chang, H., W. Yuan, J. Cui, Q. Jiang, and P. Zhang, 2007, One Bulk Micromachined Single-Chip Inertial Measurement Unit, *Proceedings of the IEEE Conference on Sensors*, pages 1485 – 1488.
- [6]. Curone, D., G.M. Bertolotti, A. Cristiani, E.L. Secco, and G. Magenes, 2010, A real-time and self-calibrating algorithm based on triaxial accelerometer signals for the detection of human posture and activity, *IEEE transactions on information technology in biomedicine a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 14(4), 1098–1105.
- [7]. Dong, Z., G. Zhang, Y. Luo, C. C. Tsang, G. Shi, and S. Y. Kwok, 2007, A Calibration Method for MEMS Inertial Sensors Based on Optical Tracking, *Proceedings of the IEEE International Conference on Nano Micro Engineered and Molecular Systems*, pages 542–547
- [8]. Dong, Z., U. C. Wejinya, And W. J. Li, Calibration of MEMS Accelerometer Based on Plane Optical Tracking Technique and Measurements, *Proceedings of the 2009 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, January 5-8, 2009, Shenzhen, China, paper 893 – 898.
- [9]. Foxlin, E., M. Harrington, and Y. Altshuler, 1998, Miniature 6-DOF inertial system for tracking HMDs, In *SPIE vol. 3362, Helmet and Head-Mounted Displays III, AeroSense 98, Orlando, FL, April 13-14, 1998, pages 1 – 15..*
- [10]. Ghassemi, F., S. Tafazoli, and P. D. Lawrence, 2008, Design and Calibration of an Integration-Free Accelerometer-Based Joint-Angle Sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(1), 150–159.
- [11]. McGreevy, J., 1989, Training Manual : *Fundamentals of Strapdown Inertial Navigation*, Revision “C”, Guidance and Control System Division Litton System, Inc, California.
- [12]. Seifert, Kurt. and O. Camacho, 2007, Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometer, *Freescale Semiconductor*.
- [13]. Shen, S. C., C. J. Chen, and H. J. Huang, 2010, A New Calibration Method for Low Cost MEMS Inertial Sensor Module, *Journal of Marine Science and Technology*, 18(6), 819–824.
- [14]. Sipos, M., P. Pacel, J. Rohac, and P. Novacek, 2012, Analyses of Triaxial Accelerometer Calibration Algorithms, *IEEE Sensors Journal*, 12 (5), May 2012, 1157 – 1168
- [15]. Skog, I. and P. Handel, 2006, Calibration of a MEMS Inertial Measurement Unit, *Proceedings of IMEKO World Congress*, pages 1 – 6.
- [16]. Sun, F., F. Liu, and X. Fang, 2012, A New Method of Zero Calibration of the Strapdown Inertial Navigation System, *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pages 1586–1590.
- [17]. Sun, S. and R. Liu, 2009, Error Calibration and FDI Technology of Gyros in Redundant IMU, *Proceedings of First International Workshop on Database Technology and Applications*, pages 398 – 401.
- [18]. Unsal, D and K. Demirbas, 2012, Estimation of Deterministic and Stochastic IMU Error Parameters, *Proceedings of the Position Location and Navigation Symposium (PLANS)*, pages 862 – 868.
- [19]. Vaccaro, R. J. and A. S. Zaki, 2012, Statistical Modeling of Rate Gyros, *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 61(3), 673–684.
- [20]. Wang, L. And F. 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* ,4(2), 32 – 41.
- [21]. Wang, M., 2006, Data Fusion of MEMS IMU/GPS Integrated System for Autonomous Land Vehicle, *Proceedings of IEEE International Convergence on Information Acquisition*, pages 80 – 84.
- [22]. Zhi-yong, Y., W. Jiang-feng, C. Guo-dong, and X. Jian-ping, 2007, Effects of Harsh Electromagnetic Environment on Inertial Measurement Unit of a Flight Vehicle, *Processing of International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pages 307 – 310.
- [23]. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/MMA7361L.pdf>
- [24]. http://classes.engr.oregonstate.edu/mime/data%20sheets/xmega_128A1.pdf
- [25]. <http://www.space-electronics.com/Products/3AxisMotionSimulator.php>