



TRANSMISI

TRANSMISI

JURNAL ILMIAH TEKNIK ELEKTRO

APRIL 2016

VOLUME 18

NOMOR 2

ISSN 1411-0814

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

Transmisi

Volume 18

Nomer 2

April 2016

ISSN 1411-0814

TRANSMISI
JURNAL ILMIAH TEKNIK ELEKTRO
ISSN 1411-0814
Volume 18, Nomor 2, April 2016, hlm. 43-100

Terbit 4 kali dalam setahun pada bulan Januari, April, Juli, dan Oktober (Edisi berbahasa Indonesia dan berbahasa Inggris). Berisi tulisan yang diangkat dari hasil penelitian dan kajian analisis kritis di bidang teknik elektro. ISSN 1411-0814

Pemimpin Umum

Dr. Aris Triwiyatno, ST, MT

Pemimpin Redaksi

Dr. Wahyul Amien Syafei, ST, MT

Sekretaris Redaksi

Achmad Hidayatno, ST, MT

Dewan Redaksi

Prof. Dr. Ir. Suwarno, MT (ITB-Bandung),
Prof. Dr. Ir. Muh. Tola, M. Eng (Unhas-Makassar),
Prof. Dr. Ir. Soebagio, Ms.EE (ITS-Surabaya),
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. (ITS-Surabaya),
Prof. Adhi Soesanto, M.Sc., Ph.D. (UGM-Jogyakarta),
Ir. Muhammad Nasir, MT (Undan-Padang),
I Gede Bagus Manuaba, ST, MT (Udayana-Denpasar),
Muhammad Aziz Muslim, ST, MT, Ph.D. (Unbraw-Malang),
Prof. Dr. Wahyu Setiabudi, MS (Undip-Semarang),
Dr. Hermawan, DEA (Undip-Semarang),
Dr. Muhammad Nur, DEA (Undip-Semarang),
Mochamad Facta, MT, Ph.D. (Undip-Semarang),
Munawar Agus Riyadi, MT, Ph.D. (Undip-Semarang),
Dr. Rizal Isnanto, MM, MT (Undip-Semarang),
Dr. Ir. Joko Windarto, MT (Undip-Semarang),
Ir. Agung Warsito, DHET (Undip-Semarang)

Editor

Imam Santoso, ST, MT

Bendahara

Ajub Ajulian Zahra, ST, MT

Alamat Penyunting dan Tata Usaha: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Jalan Prof. Sudharto, SH, Tembalang, Semarang, 50275. Telepon dan Fax. (024) 7460057, e-mail: transmisiundip@yahoo.co.id

TRANSMISI, JURNAL ILMIAH TEKNIK ELEKTRO, diterbitkan sejak Juni 1999 oleh Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

Redaksi menerima sumbangan tulisan yang belum pernah diterbitkan dalam media lain. Naskah diketik di atas kertas HVS kuarto spasi tunggal sepanjang maksimal 6 halaman, dengan format seperti tercantum pada halaman belakang (“Petunjuk Bagi Calon Penulis Transmisi”). Naskah yang masuk dievaluasi dan disunting untuk keseragaman format, istilah, dan tata cara lainnya.

TRANSMISI
JURNAL ILMIAH TEKNIK ELEKTRO
ISSN 1411-0814
Volume 18, Nomor 2, April 2016, hlm. 43-100

INDEKS PENULIS

A		E	
Agung Warsito	75	Eko Didik Widiyanto	80
A		M	
Aris Triwiyatno	49	Muhammad Alvin Ridho	70
A		S	
Arya Sony	55	Suroso	60
B		W	
Bambang Winardi	65	Wahyudi	43
D		Y	
Denni Judha Jaya Puranto	96	Yuli Christyono	87

DAFTAR ISI	hal.
Perhitungan Faktor Kalibrasi Sensor Akselerometer MMA7361L pada Ketiga Sumbu dengan Menggunakan Simulator ST-3176-TC-10 <i>Wahyudi, Ngatelan, dan Wahyu Widada (Universitas Diponegoro)</i>	43-48
Perancangan Sistem Kontrol Simulator Portal Otomatis Jalur Busway Menggunakan Metode Fuzzy-PID <i>Aris Triwiyatno, Adrian Bela Widodo, dan Darjat (Universitas Diponegoro)</i>	49-54
Analisis Kinerja Protokol Routing IoT pada Topologi Statis dengan NS2 <i>Arya Sony, dan Selo Sulistyio (Universitas Gadjah Mada)</i>	55-59
Boost-Up Chopper 24 V/320 V dengan Kendali Proporsional-Integral (PI) Berbasis Mikrokontroler <i>Suroso, Winasis, Daru Tri Nugroho, dan Dolly Arthur Siregar (Universitas Jenderal Soedirman)</i>	60-64
Perbaikan Losses dan Drop Tegangan PWI 9 dengan Pelimpahan Beban Ke Penyulang Baru Pwi 11 di PT PLN (Persero) Area Semarang <i>Bambang Winardi, Heru Winarno, dan Kurnanda Rizky Aditama (Universitas Diponegoro)</i>	65-69
Prototype Alat Pengukur Rendemen Gula Menggunakan Sensor Ping dan Sensor Warna TCS3200 <i>Muhammad Alvin Ridho, M. Surya Sulila, Andre Hanafi, Putri Rousan Nabila, dan Rahmatika Luthfiani Safitri (Universitas Diponegoro)</i>	70-74
Perbaikan JTR Penyulang SRL001 di Daerah Tanjungsari guna Mengurangi Drop Tegangan di PT PLN (Persero) Rayon Semarang Selatan Menggunakan Software Etap <i>Agung Warsito, Bambang Winardi, dan Dinda Hapsari Kusumastuti (Universitas Diponegoro)</i>	75-79
Implementasi Kit Torsi Elektrik Sepeda Untuk Bantuan Jalan Menanjak <i>Eko Didik Widiyanto, Tri Prasetyo, dan R. Rizal Isnanto (Universitas Diponegoro)</i>	80-86
Perancangan Antena Mikrostrip Array pada Frekuensi 850 MHz <i>Yuli Christyono, Imam Santoso, dan Rahmat Dwi Cahyo (Universitas Diponegoro)</i>	87-95
Pengaturan Pola Operasi CWP untuk Optimalisasi Efisiensi Thermal Combined Cycle PLTGU Tambaklorok Semarang <i>Denni Judha Jaya Puranto, dan Haryadi Adi Leksono (PT. Indonesia Power)</i>	96-100

PERHITUNGAN FAKTOR KALIBRASI SENSOR AKSELEROMETER MMA7361L PADA KETIGA SUMBU DENGAN MENGGUNAKAN SIMULATOR ST-3176-TC-10

Wahyudi^{*)}, Ngatelan^{*)}, and Wahyu Widada^{**)}

^{*)}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{**)}Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)
Jl. Raya LAPAN Rumpin No. 2 Mekarsari, Bogor 16350, Indonesia

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

Abstrak

Akselerometer adalah sensor percepatan yang banyak dipakai sebagai komponen utama dalam pembuatan IMU (*Inertial Measurement Unit*). Akselerometer MMA7361L merupakan sensor percepatan dengan 2 pilihan tingkat sensitivitas, yaitu 800 mV/g dan 206 mV/g. Sensor akselerometer yang dijual belum terkalibrasi, sehingga sensor harus dikalibrasi sebelum digunakan. Kalibrasi akselerometer dipengaruhi oleh tegangan catu daya, sehingga diperlukan catu daya yang stabil dalam pemakaiannya. Faktor kalibrasi merupakan faktor pengali yang mengubah data ADC keluaran sensor menjadi nilai percepatan hasil pengukuran. 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 faktor kalibrasi yang berbeda-beda, sehingga setiap sensor harus dikalibrasi sebelum digunakan. Faktor kalibrasi suatu sensor tidak dapat digunakan untuk sensor yang lain meskipun tipenya sama.

Kata Kunci : Akselerometer, Faktor Kalibrasi

Abstract

Accelerometer is an acceleration sensor which is used as the main componen of IMU (*Inertial Measurement Unit*). Accelerometer sensor, MMA7361L has 2 levels of sensitivity, which is 800 mV/g and 206 mV/g. Accelerometer which is sold in the market is not a calibrated sensor, so it has to be calibrated before used. Calibration of accelerometer depends on the power supply voltage, so that a stable power supply is required in its use. Scale calibration is a multiple factor to change the output ADC of the sensor to the value of acceleration. The main tool used to calibrate the 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 scale calibration values, so every sensor has to be calibrated before used. Scale calibration of sensor can not be used to the other of sensor.

Keywords : Accelerometer, Scale Calibration

1. Pendahuluan

Komponen utama yang banyak digunakan dalam perancangan sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*) terdiri atas sensor percepatan akselerometer dan sensor kecepatan sudut giroskop [1-8]. IMU digunakan sebagai sensor gerak, seperti untuk mendeteksi langkah kaki manusia [9], untuk melakukan klasifikasi aktivitas gerak tubuh manusia [10], dan untuk mendeteksi gerak lengan *miniexcavator* [11]. 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 [12].

Ada 2 jenis galat pada sensor inersia yaitu galat deterministik dan galat stokastik [13]. 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 [12]. Penentuan galat pada sensor dapat dilakukan dengan cara melakukan

estimasi terhadap galat parameter deterministik dan stokastik pada sensor IMU [14]. Metode kalibrasi dengan menggunakan transformasi gelombang singkat (*wavelet*) dilakukan terhadap sensor IMU yang terdiri atas 1 unit akselerometer 2 sumbu ADXL213 dan 1 unit giroskop 1 sumbu ADXRS150 [15]. Kalibrasi dilakukan untuk menentukan faktor skala dan faktor bias. Metode kalibrasi nol pada SINS dilakukan untuk menentukan faktor kalibrasi sensor [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. 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 [17]. Model matematis sensor adalah bahwa keluaran sensor terdiri atas faktor skala, ketidakortogonalan, bias, dan derau. Kalibrasi dilakukan untuk menentukan faktor skala, ketidakortogonalan, dan bias

Kalibrasi sensor IMU yang terdiri atas 3 unit giroskop 1 sumbu ADXR150 dan 3 unit akselerometer 1 sumbu ADXL210 dilakukan dengan menghitung faktor skala dan bias dari sensor tersebut [13]. Kalibrasi Kedua sensor dimodelkan secara matematis dengan 2 parameter tersebut. Prosedur kalibrasi akselerometer 3 sumbu dengan memanfaatkan percepatan gravitasi bumi dilakukan untuk meminimumkan waktu proses dan biaya [18]. 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. Kalibrasi 1 unit akselerometer 3 sumbu juga dapat dilakukan dengan cara menentukan nilai faktor penguatan dan bias, serta dengan menggunakan model matematis [12]. Kalibrasi dilakukan dengan prinsip dasar bahwa jumlah kuadrat keluaran akselerometer pada sumbu x, y, dan z adalah sama dengan kuadrat vektor gravitasi.

Algoritme yang dapat digunakan untuk mengolah data keluaran akselerometer menjadi data kecepatan dan jarak terdiri atas kalibrasi, pemfilteran, penjendelaan, dan proses integral [19]. Kalibrasi nol terhadap sensor dilakukan pada saat sensor tidak mendapatkan gerak percepatan, sehingga tegangan keluaran sensor

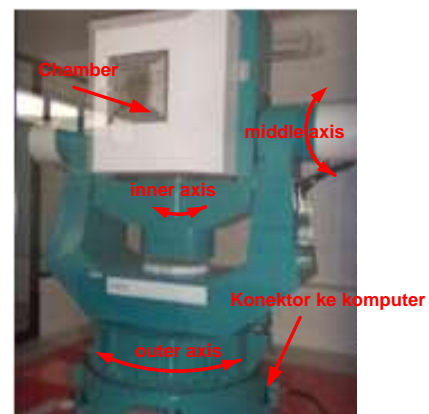
merupakan setengah dari tegangan masukan dan nilai tersebut sama dengan percepatan 0 g.

Makalah ini menyajikan metode perhitungan faktor kalibrasi sensor akselerometer MMA7361L pada ketiga sumbu dengan menggunakan simulator ST-3176-TC-10 untuk memberikan percepatan gravitasi pada sensor. Hasil perhitungan faktor kalibrasi digunakan untuk menentukan nilai percepatan yang diukur oleh sensor akselerometer dalam satuan percepatan gravitasi bumi.

2. Metode

2.1. Alat dan Bahan

Simulator gerak 3 sumbu ST-3176-TC-10 [20]. adalah alat yang digunakan untuk menghitung faktor kalibrasi sensor akselerometer MMA7361L. Alat simulator ini dirancang sebagai alat kalibrasi suatu sistem inersia yang bermutu dan mempunyai kinerja yang tinggi. Ketiga sumbu tersebut adalah sumbu *inner axis* (sumbu x), *middle axis* (sumbu y), dan *outer axis* (sumbu z). Sumbu x berada di bagian dalam *chamber* 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.



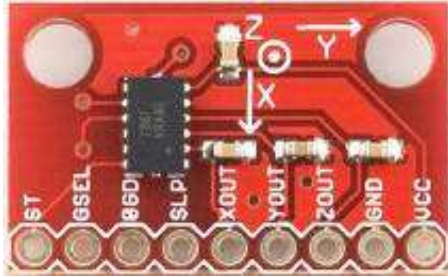
Simulator ST-3176-TC-10

Gambar 1. Simulator 3 sumbu ST-3176-TC-10

Seperangkat komputer yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Spesifikasi perangkat keras yang digunakan adalah 1) Prosesor : Intel(R) Pentium Dual Core CPU T2080@1,73 GHz, 2) Memori : 2 GB, dan *Hardisk* : 250 GB. Spesifikasi perangkat lunak yang digunakan adalah OS Microsoft Windows XP 2002, Microsoft Office Word 2007, Microsoft Office Excel 2007, Visio 2003, dan Matlab 7.0.1.

Akselerometer MMA7361L adalah sensor percepatan 3 sumbu yang dilengkapi dengan pengkondisi sinyal, filter

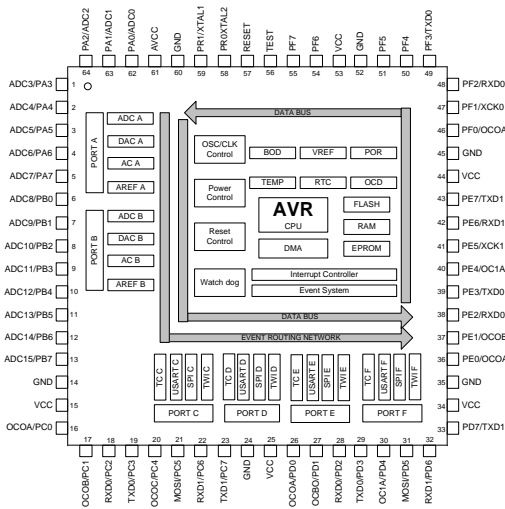
LPF 1 kutub (*pole*), kompensasi suhu, serta mempunyai 2 tingkat sensitivitas yaitu 800 mV/g dan 206 mV/g [21]. Gambar 2 memperlihatkan gambar akselerometer yang digunakan dalam rancang bangun sensor IMU.



Gambar 2. Akselerometer tipe MMA7361L

Sensor bisa dioperasikan pada tegangan antara 2,2 V dan 3,6 V. Pada saat sensor tidak dipengaruhi oleh percepatan, tegangan keluaran sensor adalah setengah dari tegangan catu. Percepatan yang dapat diindera dengan sensor MMA7361L adalah -1,5 g sampai dengan +1,5 g pada sensitivitas 800 mV/g dan - 6 g sampai dengan + 6 g pada sensitivitas 206 mV/g. Pilihan sensitivitas dapat dilakukan dengan memberikan nilai logika pada masukan pin *g-select*. Pada saat pin *g-select* diberi logika rendah, maka sensor mempunyai sensitivitas 800 mV/g dan pada saat pin *g-select* diberi logika tinggi, maka sensor mempunyai sensitivitas 206 mV/g.

AVR XMEGA128A1 adalah mikrokontroler yang berbasis *Reduced Instruction Set Computer* (RISC), yaitu bahwa hampir semua instruksinya berjalan dalam 1 siklus mesin [22]. Pada saat mikrokontroler dioperasikan dengan menggunakan kristal internal yang mempunyai frekuensi 32 MHz, maka mikrokontroler akan mempunyai kecepatan 32 *Million Instruction Per Second* (MIPS). Gambar 3 memperlihatkan susunan pin pada mikrokontroler AVR XMEGA128A1.

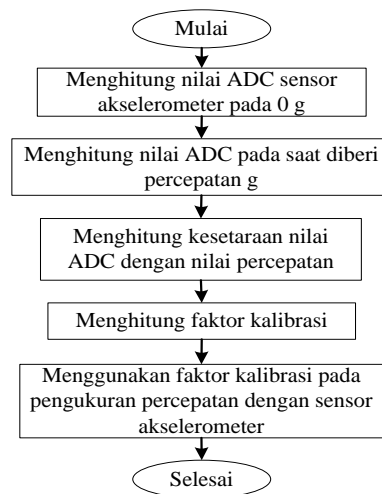


Gambar 3. Susunan pin mikrokontroler XMEGA128A1.

Mikrokontroler XMEGA128A1 mempunyai 6 unit *port* yang dapat digunakan sebagai I/O serbaguna. Masing-masing *port*, yaitu *port* A sampai dengan *port* F terdiri atas 8 bit, yaitu bit 0 sampai dengan bit 7. Fungsi masing-masing pin pada tiap *port* dapat diatur dengan melakukan *setting* data yang ada pada register *Data Direction* (DIR). *Port* A dan *port* B dapat berfungsi sebagai I/O serbaguna, sebagai *Analog to Digital Converter* (ADC) atau sebagai tempat pengiriman data serial. *Port* C, D, E, dan F dapat berfungsi sebagai I/O serbaguna atau sebagai *port* serial. ADC pada mikrokontroler XMEGA128A1 mempunyai resolusi 12 bit dengan kecepatan mencuplik data analog hingga 2 *Mega sampling per second* (MSPS). Ada 3 tegangan referensi ADC yang dapat digunakan, yaitu 1 V secara internal, $V_{CC}/1,6$ secara internal, serta tegangan eksternal, yaitu AREF untuk *port* A dan 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. Pada mode *unsigned*, data digital keluaran ADC berada di antara 200 (GND) dan 4095 ($V_{REF} - \Delta V$), dengan $\Delta V = 0,005 \times V_{REF}$.

2.2. Perhitungan Faktor Kalibrasi

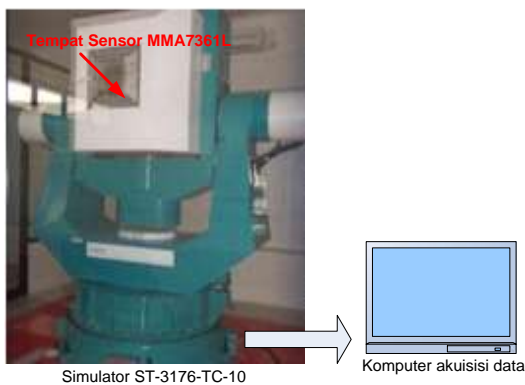
Faktor kalibrasi setiap sensor akselerometer dipengaruhi oleh karakteristik dari masing-masing sensor serta tegangan catu daya pada sensor, sehingga setiap sensor harus dihitung nilai faktor kalibrasinya [21]. Diagram alir perhitungan faktor kalibrasi akselerometer diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram perhitungan faktor kalibrasi.

Perhitungan nilai ADC sensor akselerometer pada 0 g dilakukan dengan mencari rata-rata dari 1024 data pada saat sensor dalam keadaan diam dan tidak mendapat pengaruh percepatan gravitasi bumi. Pada saat sensor mendapat percepatan gravitasi 0 g, tegangan keluaran akselerometer bernilai sekitar separuh dari tegangan catu

sensor dan disebut sebagai tegangan *offset*. Perhitungan nilai ADC pada saat diberi percepatan sebesar gravitasi bumi g dilakukan dengan memberi percepatan $-1 g$ dan $+1 g$. Sensor memperoleh percepatan gravitasi sebesar $+1 g$ pada saat sisi atas IC MMA7361L menghadap ke atas, dan memperoleh percepatan gravitasi sebesar $-1 g$ pada saat sisi atas IC menghadap ke bawah. Perhitungan kesetaraan nilai ADC dengan nilai percepatan dilakukan dengan membandingkan perubahan nilai ADC pada saat mendapat percepatan sebesar percepatan gravitasi bumi. Faktor kalibrasi merupakan nilai percepatan yang diberikan terhadap perubahan nilai ADC sensor akselerometer. Akuisisi data proses perhitungan faktor kalibrasi dilakukan dengan meletakkan sensor MMA7361L ke dalam *chamber* simulator ST-3176-TC-10 seperti pada Gambar 5. Sumbu koordinat sensor disesuaikan dengan sumbu koordinat simulator.



Gambar 5. Proses akuisisi data sensor

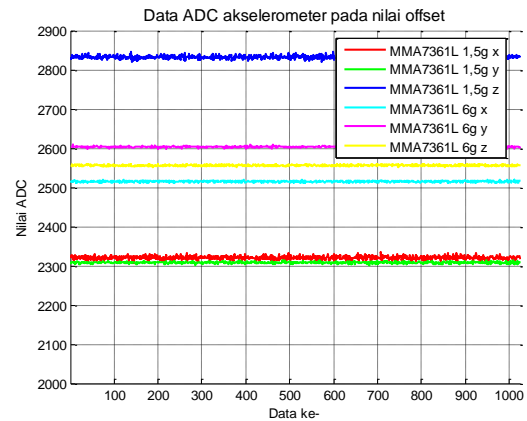
Pemberian percepatan pada masing-masing sumbu sensor dilakukan dengan memutar sumbu *inner axis* dan sumbu *middle axis*, sehingga masing-masing sensor mendapatkan percepatan gravitasi bumi sebesar $-1 g$ dan $+1 g$. Sensor yang terletak pada sumbu yang sama mendapat perlakuan yang sama dalam mendapatkan percepatan, sehingga data perhitungan faktor kalibrasi sensor diperoleh secara bersamaan.

3. Hasil dan Analisis

Untuk menghitung faktor kalibrasi sensor diperlukan perhitungan nilai *offset* sensor akselerometer pada masing-masing sumbu. Nilai *offset* sensor MMA7361L merupakan nilai tegangan atau nilai ADC sensor pada saat tidak diberi pengaruh percepatan dari luar. Tegangan tersebut bernilai sekitar separuh dari tegangan catu daya pada sensor. Gambar 6 memperlihatkan data *offset* sensor akselerometer MMA7361L.

Gambar 6 memperlihatkan bahwa nilai ADC sensor akselerometer MMA7361L 1,5 g dan MMA7361L 6 g pada masing-masing sumbu berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa proses perhitungan faktor kalibrasi

harus dilakukan pada masing-masing sensor. Pengambilan data dilakukan setelah data keluaran sensor dalam keadaan tunak, karena pada saat sensor diberi catu tegangan, keluaran sensor akan mengalami transien menuju ke nilai *offset*.



Gambar 6. Nilai offset akselerometer MMA7361L.

Faktor kalibrasi merupakan faktor pengali terhadap nilai ADC keluaran sensor akselerometer untuk mendapatkan data percepatan (dalam satuan percepatan gravitasi bumi g) dari hasil penginderaan dengan menggunakan sensor tersebut. Hasil perhitungan faktor kalibrasi sensor akselerometer MMA7361L diperlihatkan pada Tabel 1. Terlihat bahwa nilai faktor kalibrasi sensor akselerometer dengan tipe yang sama juga berbeda, sehingga perhitungan faktor kalibrasi suatu sensor tidak dapat digunakan untuk sensor yang lain.

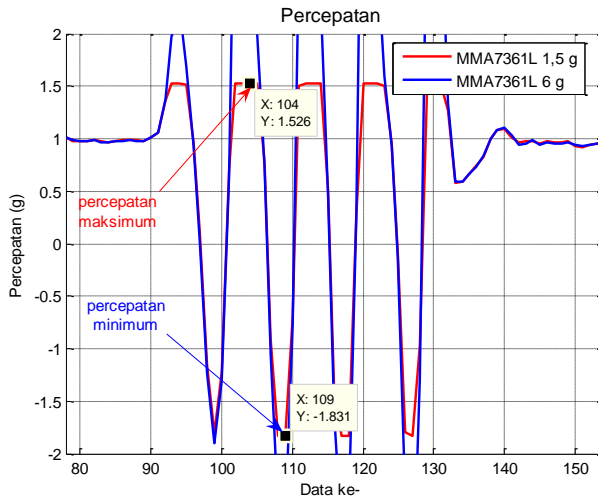
Tabel 1. Nilai faktor kalibrasi MMA7361L

Akselerometer	Sumbu	Faktor Kalibrasi ($g \times 10^{-4}$)
MMA7361L 1,5 g	x	8,5911
	y	8,5616
	z	8,5837
MMA7361L 6 g	x	32,7332
	y	33,7838
	z	32,4675

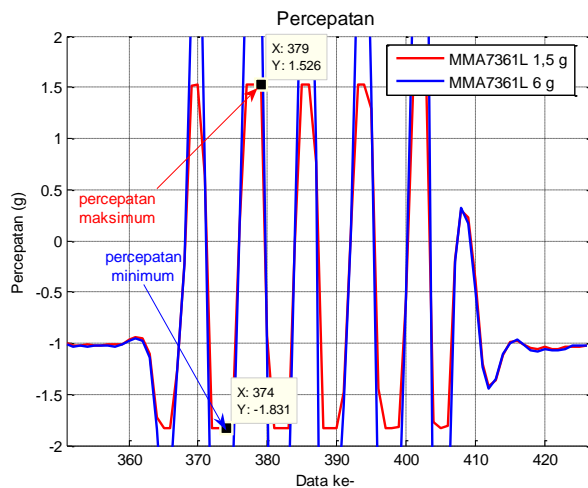
Nilai faktor kalibrasi yang diperlihatkan pada Tabel 1 merupakan nilai rata-rata hasil perhitungan faktor kalibrasi pada saat diberi percepatan $+1 g$ dan $-1 g$.

Pengujian penggunaan faktor kalibrasi dilakukan dengan memberi percepatan sebesar $-1 g$ dan $+1 g$ pada sensor MMA7361L, kemudian diberi percepatan tambahan baik positif maupun negatif untuk melihat kemampuan pengukuran sensor. Gambar 6 memperlihatkan hasil pengujian sensor pada sumbu x dengan menggunakan faktor kalibrasi 8,5911 pada MMA7361L 1,5 g dan faktor kalibrasi 32,7332 pada MMA7361L 6 g. Hasil pengujian sensor MMA7361L pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa sensor MMA7361 1,5 g mampu mendeteksi percepatan positif sampai dengan 1,526 g dan mampu mendeteksi percepatan negatif sampai dengan $-1,831 g$.

Hal ini menunjukkan bahwa sensor akselerometer MMA7361L 1,5 g dapat digunakan dengan baik dalam jangkauan antara -1,5 g sampai dengan 1,5 g.



a. Percepatan di sekitar +1 g



b. Percepatan di sekitar -1 g

c.

Gambar 6. Pengujian dengan faktor kalibrasi.

4. Kesimpulan

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

1. Setiap sensor mempunyai nilai *offset* dan perhitungan faktor kalibrasi yang berbeda-beda, meskipun sensor tersebut mempunyai tipe yang sama.
2. Hasil perhitungan nilai faktor kalibrasi suatu sensor akselerometer tidak dapat digunakan untuk sensor akselerometer yang lain meskipun tipenya sama.
3. Nilai faktor kalibrasi akselerometer MMA7361L 1,5 g bernilai lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai faktor kalibrasi akselerometer MMA7361L 6 g.

Referensi

- [1]. 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.
- [2]. Bekking, J. K. , 2009, Calibration of a Novel MEMS Inertial Reference Unit. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 58(6), 1967–1974.
- [3]. 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.
- [4]. 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.
- [5]. 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
- [6]. 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.
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. 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.
- [10]. 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.
- [11]. 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.
- [12]. 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.

- [13]. 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.
- [14]. 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.
- [15]. 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.
- [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]. Skog, I. and P. Handel, 2006, Calibration of a MEMS Inertial Measurement Unit, *Proceedings of IMEKO World Congress*, pages 1 – 6.
- [18]. 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
- [19]. Seifert, Kurt. and O. Camacho, 2007, Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometer, *Freescale Semiconductor*.
- [20]. <http://www.space-electronics.com/Products/3AxisMotionSimulator.php>
- [21]. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/MMA7361L.pdf>
- [22]. http://classes.engr.oregonstate.edu/mime/data%20sheets/xmega_128A1.pdf