

# KARAKTERISTIK DAN KALIBRASI UNTUK SENSOR INERTIAL MEASUREMENT UNIT

Ridwan Tri Prasetyo<sup>\*)</sup>, Wahyudi, and Budi Setiyono

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

<sup>\*)</sup>E-mail: [Ridwantp@gmail.com](mailto:Ridwantp@gmail.com)

## Abstrak

Sistem navigasi inersia dapat mengetahui informasi posisi, kecepatan, dan letak dalam waktu yang singkat. Hal ini memicu untuk pencarian sensor dengan biaya yang efektif dan murah, salah satunya dengan MEMS sensor. MEMS sensor mempunyai sumber error dan karakteristik yang harus dimodelkan secara hati-hati dan kalibrasi secara tepat. Seiring berjalannya dengan waktu akurasi dari sistem inersia akan mengalami penurunan. Untuk mendapatkan data percepatan gravitasi dan kecepatan sudut yang presisi, diperlukan pemodelan sensor yang akurat. Beberapa metode telah dilakukan untuk mendapatkan model sensor yang akurat. Masing-masing mempunyai kelebihan dan keunggulannya sendiri. Untuk dapat menghasilkan informasi yang diinginkan diperlukan analisis model sensor yang baik. Salah satu model analisis adalah *Allan Variance*. Metode *Allan Variance* dapat menentukan karakter dari proses acak suatu data. Demikian juga pembahasan tentang sistem kalibrasi dari sensor. Dalam Tugas Akhir ini tes dinamis dan statis dilakukan untuk mendapatkan parameter kalibrasi dan meninjau karakteristik dari kinerja sensor tersebut. Dengan menggunakan metode *Allan Variance* dan metode Least Square, serta dengan berbagai macam posisi. Sehingga didapat parameter ketidakstabilan bias *accelerometer* untuk sumbu  $x=0,404, y=0,16, dan z=0,14$  sedangkan *gyroscope* ketidakstabilan bias *gyroscope* untuk sumbu  $x=0,404, y=0,16, dan z=0,14$ . Dengan metode least square didapat parameter error faktor skala  $x=0,4856$ , faktor skala  $y=0,4261$ , faktor skala  $z=0,6152$ . Pada tes tumbukan sumbu yang lain juga ikut mempengaruhi

*Kata Kunci : sensor inersia, kalibrasi karakteristik*

## Abstract

Inertial navigation system can find out information on the position, velocity, and location within a short time. This sparked a search for cost-effective sensors and cheap, one with MEMS sensors. MEMS sensors have the sources of error and characteristics that must be modeled carefully and appropriately calibration. Over time the accuracy of the inertial system will decrease. To obtain data gravitational acceleration and angular velocity precision, required an accurate modeling of the sensor. Several methods has helped to get an accurate sensor model. Each has its own advantages and superiority. To be able to produce the desired information needed good analysis of sensor models. One model is the Allan Variance analysis. Allan Variance method can determine the character of a random process the data. Similarly, the discussion about the calibration of the sensor system. In this final dynamic and static tests carried out to obtain the calibration parameters and review the characteristics of the sensor performance .. By using Allan Variance and Least Square method, as well as with a variety of positions. Thus obtained parameter instability to the x-axis accelerometer bias = 0.404, y = 0:16, and z = 0.14, while the gyroscope bias instability for the x-axis gyroscope = 0.404, y = 0:16, and z = 0.14. Obtained by the method of least square error parameters scale factor x = 0.4856, y = 0.4261 scale factor, scale factor z = 0.6152. In other tests the collision axis also affects

*Keyword : inertial sensor, characteristic, calibration*

## 1. Pendahuluan

Peranan elektronika di segala bidang menjadi semakin besar di abad ke-21 ini. Bermula dari penerapan rangkaian elektronika analog, kemudian digital dan kini

hampir semua peralatan menggunakan sistem mikroprosesor.

Baru-baru ini, dengan biaya yang tidak terlalu mahal, sensor inersia digunakan dalam aplikasi yang mencakup area lebih luas, bahkan juga digunakan dalam aplikasi non - militer. Sensor inersia sangat penting dalam kontrol dan

navigasi, Sistem navigasi merupakan komponen yang paling penting pada mesin otomatis. Salah satu sistem yang umum digunakan untuk navigasi adalah sistem navigasi inersia, yaitu dengan memanfaatkan sensor IMU. Sebuah IMU bekerja dengan mendeteksi gerakan (percepatan linear dan orientasi dari gerakan tersebut) dengan menggunakan kombinasi dari *accelerometer* dan *gyroscope*.

Sensor yang diproduksi oleh pabrik yang berbeda menghasilkan karakteristik dan harga yang berbeda pula *Accelerometer* dan *gyroscope* mempunyai sumber error bawaan manufaktur. Seperti bias, giroskop drift, dan scale factor. Tiga ortogonal *accelerometer* dan 3 ortogonal *gyroscope* dikombinasikan untuk membuat sebuah IMU. Dibutuhkan suatu algoritma sistem kalibrasi dan metode test yang sederhana, sehingga dapat diterapkan pada berbagai aplikasi.

Adapun tujuan yang hendak dicapai dari pembuatan mengetahui faktor kalibrasi dan karakteristik pada sensor IMU. Supaya pembahasan tidak menyimpang, maka ditentukan pembatasan masalah pada Tugas Akhir ini sebagai berikut :

1. Pembuatan sistem instrumentasi ini menggunakan 3 buah sensor *gyroscope* ADXRS150 yang masing - masing dengan 1 derajat kebebasan dan sensor *accelerometer* MMA7260Q dengan 3 derajat kebebasan.
2. *Range* percepatan yang digunakan sebesar 1,5g.
3. Kalibrasi *accelerometer* menggunakan enam posisi yang berbeda yaitu 1g dan -1g untuk masing-masing sumbu x, y, dan z.
4. Sistem *visualisasi* yang digunakan adalah komputer dengan bantuan bahasa pemrograman *Visual C # .*
5. Mikrokontroler yang digunakan adalah mikrokontroler ATmega 8535.
6. Perangkat lunak yang digunakan untuk memprogram mikrokontroler adalah *Code Vision AVR*.
7. Bahasa pemrograman pada mikrokontroler ATmega8535 menggunakan bahasa C standar ANSI

## 2. Metode

### 2.1 Perancangan Sistem

#### 2.1.1 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

Perancangan perangkat keras pada kalibrasi sensor IMU dengan menggunakan *gyroscope* dan *accelerometer* ini meliputi perancangan sistem minimum mikrokontroler ATmega8535, perancangan sensor *gyroscope* ADXRS150 dan sensor *accelerometer*. Secara umum perancangan perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 1



Gambar 1 Diagram blok perancangan sistem dengan menggunakan *gyroscope* dan *accelerometer*.

Penjelasan dari diagram blok sistem pada Gambar 5 dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Sensor *gyroscope* ADXRS150 digunakan untuk memperoleh besaran kecepatan sudut dan sensor *accelerometer* MMA7260Q percepatan
2. Mikrokontroler ATmega8535 digunakan menerima data dari sensor, mengubahnya menjadi data digital dan melakukan komunikasi serial dengan komputer
3. Komputer digunakan untuk mengolah data digital kecepatan sudut dan percepatan serta menampilkan kedalam grafik.

#### 2.1.2 Perancangan Perangkat Lunak (*Software*)

Mikrokontroler ATmega8535 digunakan untuk membaca sinyal analog dari sensor *gyroscope* dan *accelerometer*, kemudian mengubahnya menjadi data digital 10 bit dan mengirimkannya ke komputer. Secara umum diagram alir pemrograman pada mikrokontroler ATmega8535 dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram alir pemrograman mikrokontroler ATmega8535

**A. Pembacaan ADC dan Pengiriman Data Secara Serial.**

Proses pembacaan dan pengiriman data dilakukan secara berurutan pada masing-masing sumbu. Pada program pembacaan dan pengiriman data ADC di atas, data yang dibaca oleh ADC dari sensor akan dikirimkan ke komputer melalui komunikasi USART. Mikrokontroler akan mengirimkan data hasil pembacaan posisi x ketika komputer menerima karakter ‘A’ melalui program C#. Demikian pula ketika komputer menerima karakter ‘B’ maka akan mengirimkan data hasil pembacaan posisi y dan seterusnya.

**B. Kalibrasi**

Proses ini digunakan untuk menghilangkan komponen *offset* pada data percepatan dari keluaran sensor *accelerometer* MMA7260Q yang disebabkan gravitasi bumi dan kecepatan sudut dari keluaran sensor *gyroscope* ADXRS150. Kalibrasi dilakukan dengan mengambil rata-rata dari *sample* data ketika kedua sensor dalam keadaan diam. Semakin banyak *sample* yang diambil, maka semakin akurat hasil yang didapat. Proses kalibrasi hanya dilakukan pada saat awal program dijalankan.

**C. Filter LPF Digital**

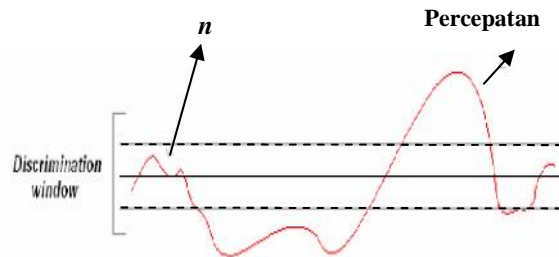
Penggunaan *low pass filter* pada sinyal adalah cara yang sangat baik untuk menghilangkan *noise* mekanik maupun *elektrik* dari kedua *sensor*. Mengurangi *noise* pada aplikasi yang berhubungan dengan posisi sangat penting untuk mengurangi *error* pada saat mengintegrasikan sinyal percepatan dari *accelerometer* dan sinyal kecepatan sudut dari *gyroscope*. Cara yang paling mudah untuk melakukan LPF secara digital adalah dengan melakukan apa yang disebut dengan rata-rata bergerak (*rolling average*) sehingga percepatan dan kecepatan sudut sesaat direpresentasikan dengan rata-rata dari *sample*.

**D. Pemberian Jendela Pembatas (*Discrimination Window*)**

Meskipun sudah melalui *filter LPF digital*, data dari ADC masih terdapat kemungkinan mengandung *error* akibat *noise* mekanik. *Noise* mekanik ini terjadi pada *micromachine*, yang antara lain disebabkan oleh *vibrasi* mekanik dan pergerakan elektron. Ketika sensor dalam kondisi tidak bergerak sejumlah *error* kecil masih tampak pada sinyal keluaran sehingga nantinya sejumlah *error* tersebut akan dijumlahkan.

Pada kondisi ideal, ketika sensor dalam kondisi tidak bergerak maka sinyal keluaran akan konstan pada tegangan *offset*. Oleh karena itu dibutuhkan metode yang dapat mengasumsikan sejumlah *error* kecil tadi sebagai tegangan *offset* yang konstan. Metode tersebut disebut

dengan *filtering window* atau *discrimination window*. Dengan adanya *discrimination window* maka daerah yang terletak antara data yang valid dengan data yang tidak valid akan mendapatkan perlakuan khusus. Penerapan *discrimination window* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Metode *discrimination window* untuk sinyal keluaran sensor

**2.1.3 Pemodelan Error Sensor**

*Error* di representasikan dalam bentuk model matematika, berikut model *error sensor gyroscope* dan *accelerometer* seperti pada persamaan 1[1].

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = B_A + S_A \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + M_A \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + W_A$$

$$\begin{bmatrix} \delta \omega_x \\ \delta \omega_y \\ \delta \omega_z \end{bmatrix} = B_G + B_g \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + S_G \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + M_G \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + W_G \quad ..(1)$$

Di sini, x, y, z adalah percepatan sebenarnya dan  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  adalah kecepatan sudut sebenarnya yang diterapkan pada masing-masing sumbu.  $B_A$  dan  $B_G$  adalah vektor 3x1 yang terdiri dari unsur-unsur bias pada masing-masing sumbu.  $S_A$  dan  $S_G$  adalah matriks 3x3 diagonal, merupakan faktor skala untuk setiap sumbu.  $M_A$  dan  $M_G$  adalah matriks ortogonal yang terdiri dari ketidaksimetrisan. Matrix  $B_g$  merupakan koefisien bias untuk *gyroscope*.  $W_A$  dan  $W_G$  adalah *white Gaussian Noise*. Persamaan 1 dapat diselesaikan dengan metode least square

**3. Hasil dan Analisa**

**3.1 Pengujian Tegangan Offset Gyroscope**

Pengujian tegangan *offset* dilakukan dengan cara mengukur tegangan *offset* menggunakan multimeter.

Tabel 1. Hasil pengujian tegangan *offset* sensor Gyroscope

No.	V <sub>offset</sub> Poros roll (volt)	V <sub>offset</sub> Poros pitch (volt)	V <sub>offset</sub> Poros yaw (volt)
1	2,50	2,31	2,47
2	2,50	2,31	2,47
3	2,50	2,31	2,47
4	2,50	2,31	2,47
5	2,50	2,31	2,47
6	2,50	2,31	2,47
7	2,50	2,31	2,47
8	2,50	2,31	2,47
9	2,50	2,31	2,47
10	2,50	2,31	2,47

Dari Tabel1 dapat dilihat bahwa tegangan *offset* rata-rata untuk poros roll sebesar 2,50, poros pitch sebesar 2,31 dan poros yaw sebesar 2,47. Tegangan *offset* rata-rata sumbu x sudah sesuai dengan tegangan *offset* ideal yaitu sebesar 2,5 volt..

3.2 Pengujian Tegangan *Offset* Accelerometer

Tabel 2. Hasil pengujian tegangan *offset* sensor Accelerometer

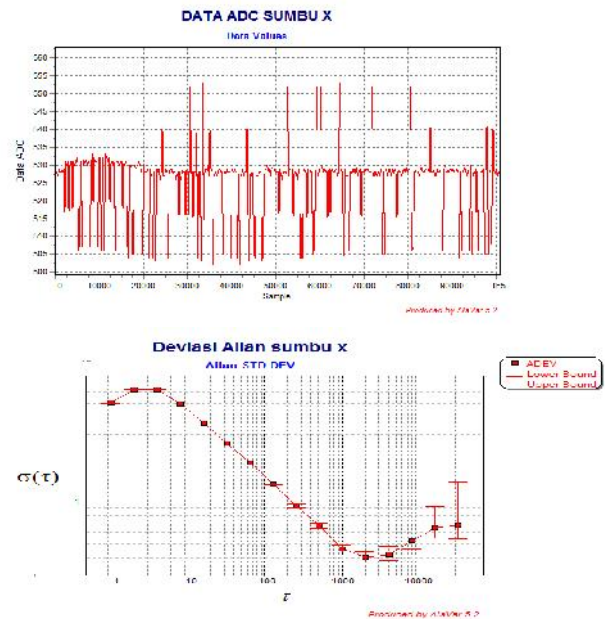
No.	V <sub>offset</sub> Sumbu x (volt)	V <sub>offset</sub> Sumbu y (volt)	V <sub>offset</sub> Sumbu z (volt)
1	1,61	1,78	1,62
2	1,61	1,78	1,62
3	1,61	1,78	1,62
4	1,61	1,78	1,61
5	1,61	1,78	1,61
6	1,61	1,78	1,61

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa tegangan *offset* rata-rata untuk sumbu x sebesar 1,61, sumbu y sebesar 1,78 dan sumbu z sebesar 1,61. Pengujian tegangan *offset* sumbu z dilakukan tanpa adanya pengaruh gravitasi. Tegangan *offset* rata-rata sumbu x sudah hampir sesuai dengan tegangan *offset* ideal yaitu 1,61 v. Pada sumbu y terdapat selisih tegangan dengan tegangan *offset* ideal yaitu sebesar 0,13 volt.

3.3 Tes Statis Accelerometer

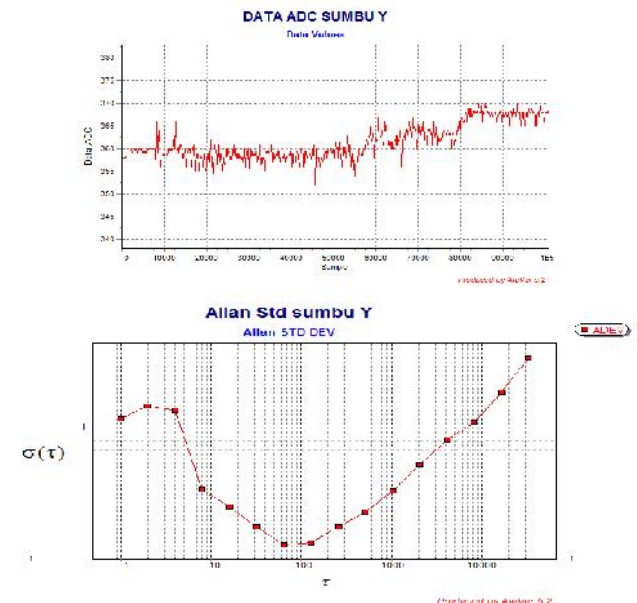
3.3.1 Tes Posisi Tunggal Accelerometer

Data dari *accelerometers* diam dikumpulkan selama beberapa jam untuk mengamati rata-rata dan deviasi standar dari keluaran sensor. Idealnya, karena percepatan gravitasi, keluaran konstan harus diamati pada semua sumbu. Dalam prakteknya karakteristik noise diamati seperti yang diharapkan. Kestabilan Bias merupakan hal penting dalam kalibrasi dan kinerja klasifikasi *accelerometers*. Tes Allan-varian [4] dilakukan untuk melihat perubahan nilai Bias dengan waktu.



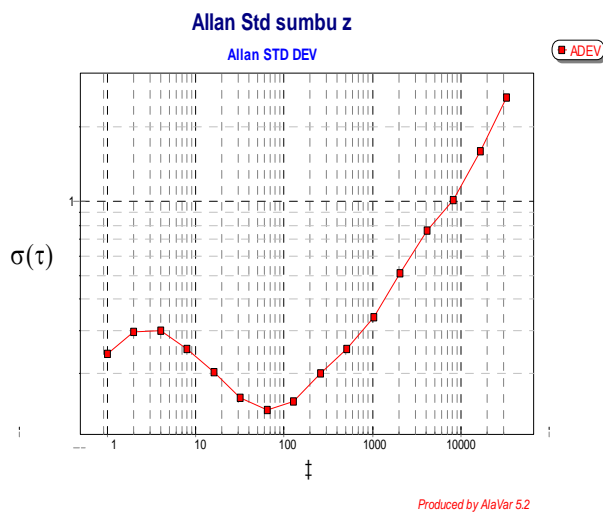
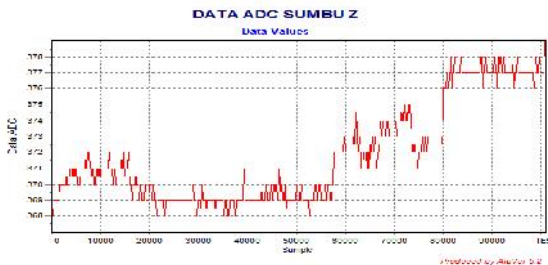
Gambar 4.Allan Deviation sumbu x Accelerometer

Pada Gambar 4 error berupa *angle random walk* mendominasi untuk kelompok waktu yang pendek. Pada saat *cluster time* dalam jangkauan 1024s kurva menunjukkan *slope* menuju nilai 0 atau berada dalam kondisi *flat region*. Hal ini menunjukkan representasi ketidakstabilan bias. Nilai *Allan deviation* sebesar 0.4, untuk mendapatkan nilai ketidakstabilan bias maka nilai *Allan deviation* dibagi 0.664, sehingga didapatkan nilai ketidakstabilan sebesar 0,62. *Error rate ramp* terlihat dari *slope* yang bernilai +1 yaitu dengan nilai *Allan deviation* sebesar 0,53 pada waktu 8192s.



Gambar 5Allan Deviation sumbu y

Pada Gambar 5 error berupa *quantization noise* dengan *slope* bernilai -1 nilai *Allan deviation* adalah 0,38. terlihat bahwa *error rate ramp* mendominasi pada sumbu y ketidakstabilan bias tercapai pada waktu 64s dengan nilai *Allan deviation* 0.16.



Gambar 6. Allan Deviation untuk sumbu z

Pada Gambar 6 error berupa *rate ramp* mendominasi dimulai antara rentang waktu 100-32678s. Ketidakstabilan bias tercapai pada waktu 64s dengan nilai *Allan deviation* 0.14

### 3.3.2 Pengujian Accelerometer Multiposisi

Tujuan dari tes ini adalah untuk mencari parameter error seperti bias, faktor skala dan *misalignment*. Accelerometer ditempatkan pada 6 posisi yang berbeda keenam posisi tersebut harus menunjukkan nilai secara teoritis seperti 1g untuk masing-masing sumbu. Berdasarkan dengan pengamatan multimeter digital hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil pengukuran dengan menggunakan multimeter digital untuk accelerometer

Stationary position	Accelerometer		
	Ax (volt)	Ay (volt)	Az (volt)
Zdown	1,63	1,9	2,45
Zup	1,73	1,78	0,92
Ydown	1,69	2,61	1,72
Yup	0,83	0,84	1,74
Xdown	2,47	1,76	1,85
Xup	0,878	0,84	1,74

Dikonversi dalam bentuk percepatan dengan rumus:

$A_x = (\text{voltax} - 1,65) / 0,4785$  dibandingkan dengan nilai sebenarnya (nilai pada Tabel 2)

Tabel 2 Nilai accelerometer secara teoritis

Stationary position	Accelerometer		
	Ax	Ay	Az
Zdown	0g	0g	+1g
Zup	0g	0g	-1g
Ydown	0g	1g	0g
Yup	0g	-1g	0g
Xdown	1g	0g	0g
Xup	-1g	0g	0g

Dengan metode *least square*  $X = [w^T \cdot w]^{-1} w^T \cdot Y$  didapat.

$$\begin{bmatrix} y1 \\ y2 \\ y3 \\ y4 \\ y5 \\ y6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0417 & 0.522 & 1,671 & 1 \\ 0.167 & 0.271g & -1,52 & 1 \\ 0.08 & 2,00g & 0.14g & 1 \\ -1,71 & -1,69g & 0.188g & 1 \\ 1.71 & 0.22g & 0.417 & 1 \\ -1,61 & -1.69 & 0.188g & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Faktor skala x = 0,4856

Faktor skala y = 0,4261

Faktor skala z = 0,6152

Bias x = 0,098

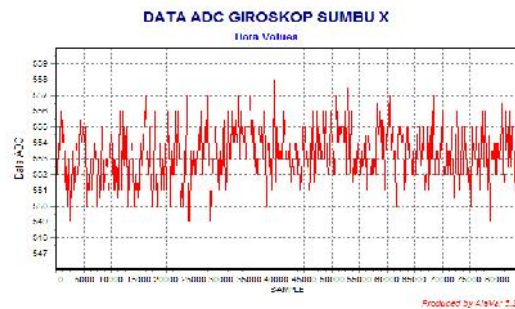
Bias y = 0,0086

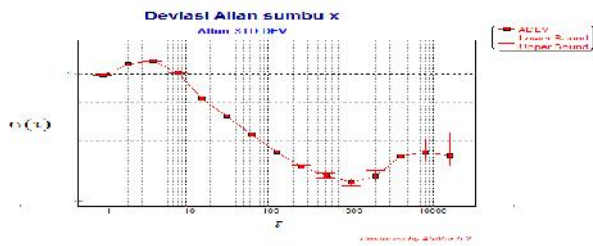
Bias z = -0,1229

*Missaligment* = 0,468

### 3.3 Tes Statis Gyroscope

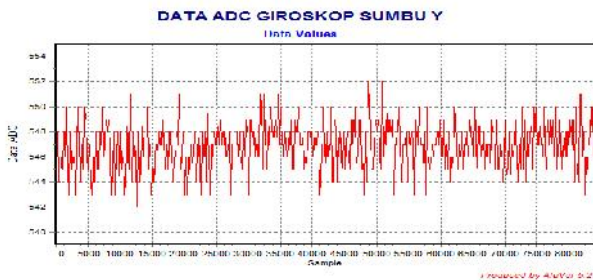
#### 3.4.1 Tes Posisi Diam gyroscope





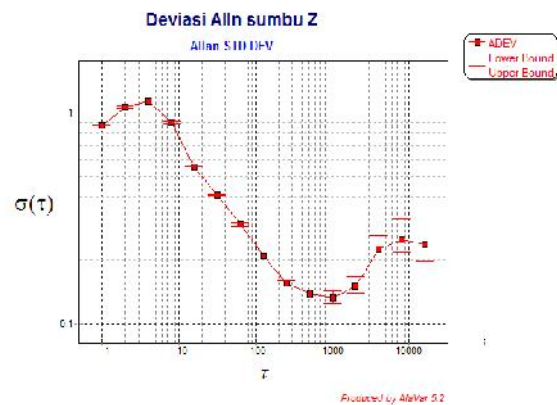
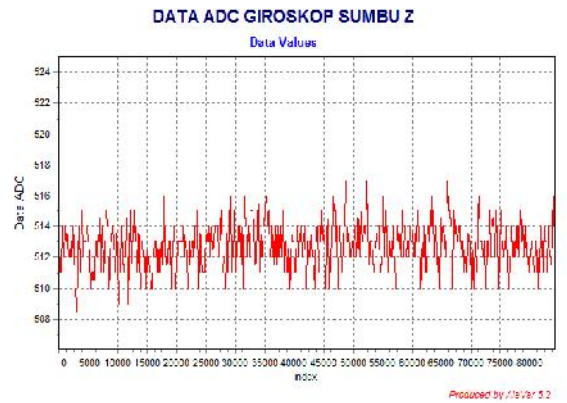
Gambar 7. Allan Deviationes untuk sumbu x

Pada Gambar 7 error berupa *quantization noise* mendominasi untuk kelompok waktu yang pendek. Pada saat *cluster time* dalam jangkauan 256-2048s kurva menunjukkan *slope* menuju nilai 0 atau berada dalam kondisi *flat region*. Hal ini menunjukkan representasi ketidakstabilan bias. Nilai *Allan deviation* sebesar 0,14, untuk mendapatkan nilai ketidakstabilan bias maka nilai *Allan deviation* dibagi 0,664, sehingga didapatkan nilai ketidakstabilan sebesar 0,21.



Gambar 8 Allan Deviationes untuk sumbu y

Gambar 8 error berupa *quantization noise* mendominasi untuk kelompok waktu yang pendek. Pada saat *cluster time* dalam jangkauan 512-2048s kurva menunjukkan *slope* menuju nilai 0 atau berada dalam kondisi *flat region*. Hal ini menunjukkan representasi ketidakstabilan bias. Nilai *Allan deviation* sebesar 0,15, untuk mendapatkan nilai ketidakstabilan bias maka nilai *Allan deviation* dibagi 0,664, sehingga didapatkan nilai ketidakstabilan sebesar 0,22.



Gambar 9. Allan Deviationes untuk sumbu z

Gambar 9 error berupa *quantization noise* mendominasi untuk kelompok waktu yang pendek. Pada saat *cluster time* dalam jangkauan 512-2048s kurva menunjukkan *slope* menuju nilai 0 atau berada dalam kondisi *flat region*. Hal ini menunjukkan representasi ketidakstabilan bias. Nilai *Allan deviation* sebesar 0,13, untuk mendapatkan nilai ketidakstabilan bias maka nilai *Allan deviation* dibagi 0,664, sehingga didapatkan nilai ketidakstabilan sebesar 0,20

### 3.4.2 Pengujian Gyroscope Multiposisi

Metode yang digunakan untuk kalibrasi *gyroscope* multiposisi adalah dengan menggunakan metode integrasi. Metode integrasi ini digunakan untuk mendapatkan gain atau faktor skala. *Gyroscope* diputar dalam enam posisi yang berbeda untuk sudut yang tetap pada tugas akhir ini digunakan sudut 90° untuk masing-masing sumbu. Bidang rotasi *gyroscope* harus sejajar dengan bidang rotasi yang diminta. Selama setiap rotasi data mentah diambil dari *gyroscope* kemudian diintegrasikan untuk membentuk sudut. Sudut yang dihasilkan dari keluaran *gyroscope* kemudian dibandingkan dengan sudut sebenarnya untuk mendapatkan gain atau faktor skala. Kalibrasi dilakukan

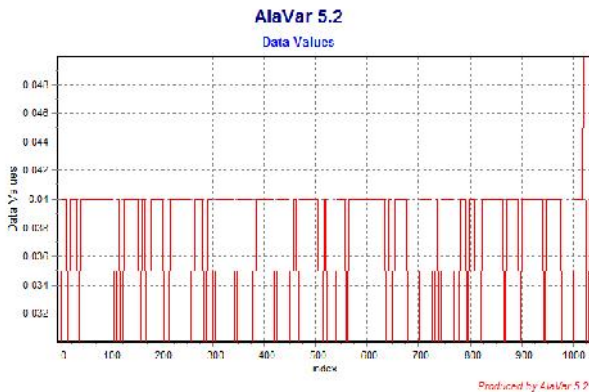
beberapa kali untuk menentukan nilai yang paling tepat. Data *gain* didapat pada Tabel 3.

Tabel 3 Faktor kalibrasi *gyroscope* untuk masing-masing putaran.

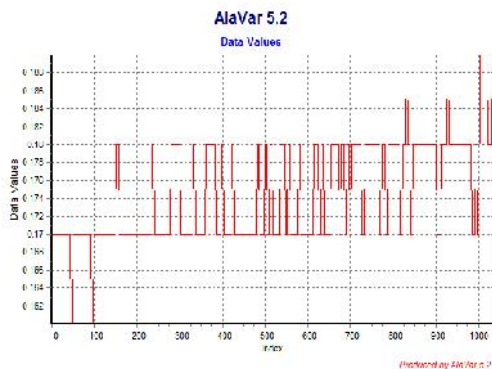
Poros	Sudut rata-rata tercatat (°)	Sudut sebenarnya (°)	Faktor kalibrasi
Roll	348,43	90	0,25
Roll	-331,118	-90	-0,27
Pitch	379,475	90	0,237
Pitch	-344,80312	-90	0,26
Yaw	319,976603	90	0,28
Yaw	-331,426773	-90	0,271

### 3.5 Tes Tumbukan

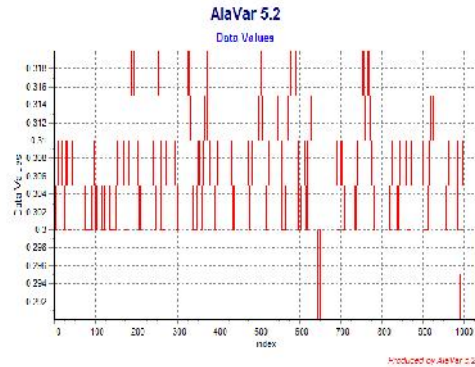
Sebuah tes tumbukan diterapkan sepanjang arah sumbu *z* *accelerometer* setiap detik selama satu menit dan memastikan bahwa sumbu lainnya tidak mengalami gerak apapun. Efek dari dampak ini diamati pada setiap sumbu meskipun tidak ada percepatan diterapkan pada masing-masing sumbu. Hasil dari pengujian tes tumbukan adalah sebagai berikut.



(a) Percepatan pada sumbu *x* *accelerometer*

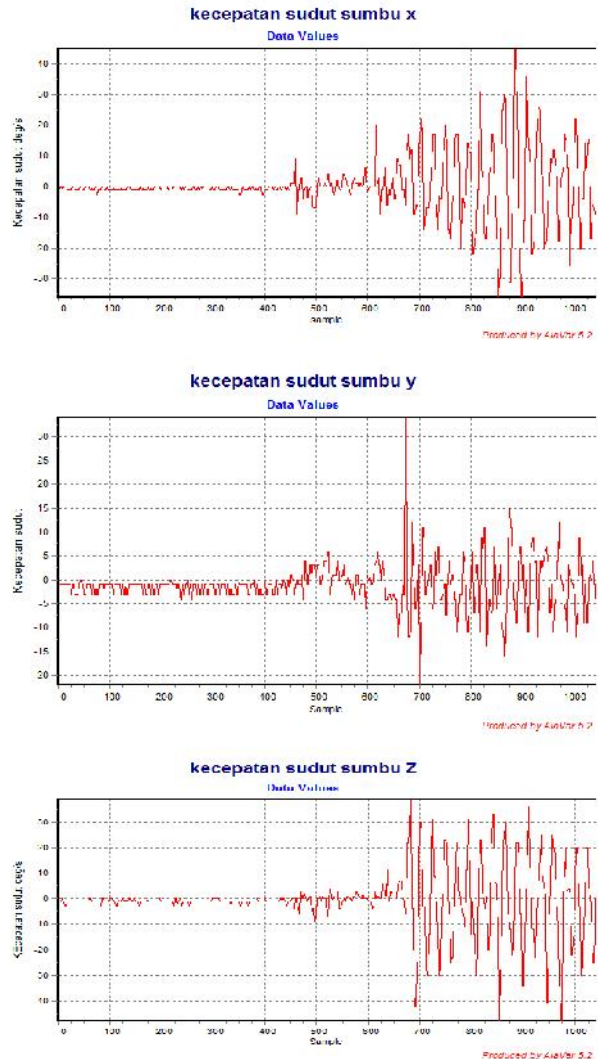


(b) Percepatan pada sumbu *y* *accelerometer*



(c) Percepatan pada sumbu *z* *accelerometer*

Gambar 10. Tes tumbukan yang dikenakan pada *accelerometer* sumbu *z*



Gambar 11. Tes tumbukan *gyroscope*

#### 4. Kesimpulan

Pada hasil pengujian tegangan *offset* sensor menggunakan multimeter, baik *accelerometer* dan *gyroscope* sudah mendekati tegangan *offset* ideal. Pengujian dalam waktu yang lama menggunakan tes *Allan Deviation* ketidakstabilan bertambah seiring berjalannya dengan waktu.. dengan menggunakan metode *Allan Deviation* didapat parameter ketidakstabilan bias *accelerometer* untuk sumbu  $x=0,404$ ,  $y=0,16$ , dan  $z=0,14$  sedangkan *gyroscope* ketidakstabilan bias *gyroscope* untuk sumbu  $x=0,404$ ,  $y=0,16$ , dan  $z=0,14$ . Dengan metode *least square* yang diterkan *accelerometer* didapat parameter *error* faktor skala  $x=0,4856$ , faktor skala  $y=0,4261$ , faktor skala  $z=0,6152$  serta *misalignment*=0,468. Untuk tes tumbukan yang diterapkan pada sumbu  $z$  *accelerometer* sumbu yang lain juga ikut mempengaruhi, walaupun tidak terjadi guncangan pada sumbu yang lainnya..

#### Referensi

- [1]. Aslan, Gokcen., *Characterization And Calibration Of Mems Inertial Measurement Units*, Middle East Technical University, 2004.
- [2]. Gani, Ruslan, *Perancangan Sistem Menggunakan Sensor Gyroscope Dan Accelerometer Untuk Menentukan Sudut Dan Jarak*, Tugas Akhir Universitas Diponegoro, 2010.
- [3]. ----, [http://www.electrofun.biz/catalog/popup\\_image.php?pid=92](http://www.electrofun.biz/catalog/popup_image.php?pid=92)
- [4]. Grewal, Mohinder., Joseph J, *Global Positioning Systems Inertial Navigation And Integration*, 2<sup>nd</sup>. Edition., willey, USA, 2007.
- [5]. Haiying., Hou, *Modelling Inertial sensors Errors Using*, University of Calgary, Canada , 2004.
- [6]. Astrom., Karl J, Bjorn Wttenmark, *Adaptive Control*, 2<sup>nd</sup> Edition. University of New South Wales, Lund Institute of Technology, 2008.
- [7]. ---, *Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer*, STMicroelectronics, USA, 2010