

# ESTIMASI SUDUT ORIENTASI BENDA MENGGUNAKAN SENSOR 6 DOF IMU DAN SENSOR MAGNETOMETER 3 AKSIS

Rahadian Nurfansyah<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 : rahadian.nur@gmail.com

## Abstrak

Penentuan posisi dan orientasi yang tepat dalam suatu sistem teknis mempunyai peranan yang penting dalam sistem navigasi dan robotika. Instrumen-instrumen yang biasa digunakan pada sistem navigasi adalah Inertial Measurement Unit (IMU) dan sensor magnetometer. IMU yang merupakan kombinasi dari sensor akselerometer dan sensor giroskop, beserta sensor magnetometer merupakan sensor-sensor yang telah mengalami kemajuan dan banyak diaplikasikan untuk mengukur sudut orientasi. Untuk aplikasi yang lebih lanjut, sensor IMU dan sensor magnetometer banyak digunakan untuk keperluan navigasi. Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan pembuatan instrumentasi sensor IMU dan sensor magnetometer untuk mendeteksi sudut dengan 3 derajat kebebasan. Data berupa sudut diperoleh dari hasil penggabungan data ketiga sensor dengan metode tapis komplementer. Nilai penguatan pada tapis komplementer didapatkan dengan menggunakan logika fuzzy. Sistem instrumentasi menggunakan mikrokontroler Atmega128 sebagai unit pemroses utama, dan komputer yang akan menampilkan data hasil pengukuran. Data hasil pengukuran dikirim secara nirkabel dari mikrokontroler ke komputer dengan menggunakan modul YS-1020UA. Hasil pengujian menunjukkan bahwa estimasi sudut orientasi dari tapis komplementer cukup baik karena dapat menghilangkan galat drift dari sensor giroskop dan dapat meredam galat dari pengaruh getaran terhadap akselerometer.

*Kata kunci : Sudut Orientasi, IMU, Magnetometer, Mikrokontroler*

## Abstract

Determining of exact position and orientation has important role in navigation system and robotics. The Instruments commonly used in navigation are IMU and magnetometer sensor. IMU that consist of accelerometer sensor and gyroscope sensor, together with magnetometer are sensors that have been improved and have a lot of application for measuring orientation. For further application, IMU and magnetometer are widely used for navigational purpose. In this research, IMU and magnetometer sensors instrumentation are designed and implemented for sensing 3 degree of freedom orientation. Orientation data is gained from fusion of three sensors data by using complementary filter. The instrumentation system is using an Atmega128 microcontroller as main processor unit, and a computer for showing measurement data. The Measurement Data are sent wirelessly from microcontroller to computer by using YS-1020UA modul. Test result showed that estimated orientation data from complementary filter is good enough because it can eliminate drift error from gyroscope and compensate error from vibration effect of accelerometer.

*Keyword : inverted Orientation, IMU, Magnetometer, Mikrokontroler*

## 1. Pendahuluan

Sudut orientasi merupakan posisi sudut dari suatu benda di dalam suatu ruang tertentu yang dapat direpresentasikan dalam sumbu roll, pitch, dan yaw. Representasi sudut orientasi dalam roll, pitch, dan yaw biasa disebut dengan istilah Euler Angle. Sudut orientasi menjelaskan seberapa besar benda harus berputar pada sumbu roll, pitch, dan yaw untuk mengubah posisi sudut benda tersebut dari referensi ke posisi sudut yang sekarang.

Sensor akselerometer dan magnetometer dapat digunakan untuk mengukur sudut orientasi pada benda yang statis. Sensor akselerometer dan magnetometer dapat mengukur dengan baik ketika benda pada kondisi statis karena referensi sensor tersebut adalah gravitasi dan medan magnet bumi yang bersifat tetap. Pengukuran sudut oleh sensor akselerometer dan magnetometer kurang baik dalam kondisi dinamis karena adanya gaya dari luar yang mengganggu data sensor.

Sensor giroskop dapat mengukur sudut orientasi pada benda yang dinamis. Sensor giroskop dapat mengukur dengan baik ketika benda pada kondisi dinamis karena sensor giroskop sedikit sekali terpengaruh oleh gaya dari luar. Pengukuran sudut oleh sensor giroskop kurang baik dalam kondisi statis karena giroskop tidak memiliki referensi yang tetap.

Tapis komplementmerupakan tapis digital yang dapat memperbaiki kelemahan dari sensor akselerometer, magnetometer, dan giroskop sehingga didapatkan nilai sudut orientasi yang lebih handal baik dalam keadaan dinamis maupun statis<sup>[11]</sup>. Tapiskomplementer berupa tapis digital sehingga dapat ditanamkan dalam mikrokontroler. Tapiskomplementer menggunakan masukan beberapa nilai dari sensor yang berbeda-beda untuk mendapatkan suatu nilai keluaran yang baik.

## 2. Metode

### 2.1 Sudut Orientasi

Sudut orientasi merupakan besarnya sudut antara perpindahan suatu benda terhadap sudut referensi dari benda tersebut. Sudut Orientasi suatu benda dapat direpresentasikan dalam *Euler Angel* (sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw*). Sudut orientasi *roll*, *pitch*, dan *yaw* dapat disimbolkan dengan  $\phi$ ,  $\theta$ , dan  $\psi$ . Kerangka acuan sudut orientasi adalah bumi dengan utara-selatan untuk sumbu x, timur-barat untuk sumbu y, dan atas-bawah untuk sumbu z.

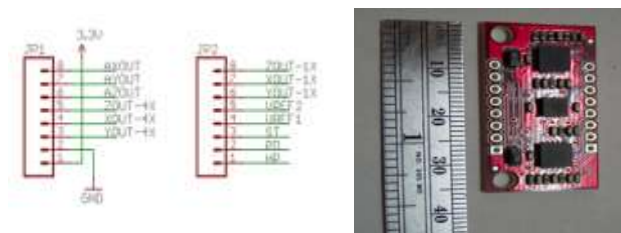
### 2.2 Pengukuran Sudut Orientasi Benda

Sudut orientasi benda dapat diukur menggunakan sensor giroskop, akselerometer, dan magnetometer. Sensor giroskop, akselerometer, dan magnetometer mengukur sudut orientasi dengan karakteristik yang berbeda-beda. Sensor giroskop memiliki karakteristik yang baik ketika benda bergerak atau dalam kondisi dinamis, sedangkan sensor akselerometer dan magnetometer justru lebih baik ketika kondisi diam atau statis. Sensor giroskop mampu mengukur sudut orientasi di ketiga sumbu sedangkan akselerometer hanya mampu mengukur sudut *roll* dan *pitch*. Sensor akselerometer harus digabung dengan magnetometer untuk mendapatkan sumbu *yaw*.

Sensor giroskop merupakan instrumentasi yang sensitif terhadap kecepatan sudut. Sensor akselerometer adalah instrumen yang dapat digunakan untuk mengukur kemiringan yang diakibatkan oleh percepatan yang ditimbulkan karena adanya gaya gravitasi (*inklinasi*). Sensor magnetometer 3 aksis untuk membaca medan magnet bumi yang bekerja pada sebuah benda sebagai ( $m_x$ ,  $m_y$ , dan  $m_z$ ).

### 2.3 Modul Razor 6 DoF IMU

Salah satu modul *IMU* yang ada saat ini adalah Sparkfun Razor 6 DoF *IMU*. Modul ini terdiri dari sebuah akselerometer 3 aksis (ADXL335), sebuah giroskop dua aksis (LPR530AL), dan sebuah giroskop satu aksis (LY530ALH). Akselerometer dan giroskop dipasang pada satu modul sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk pengukuran 6 DoF (*degree of freedom* / derajat kebebasan). Derajat kebebasan yang mampu diukur oleh 6 DoF *IMU* adalah poros x, y, z, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Dimensi dan konfigurasi keluaran Razor 6 DoF *IMU* ditunjukkan oleh Gambar 1<sup>1</sup>.



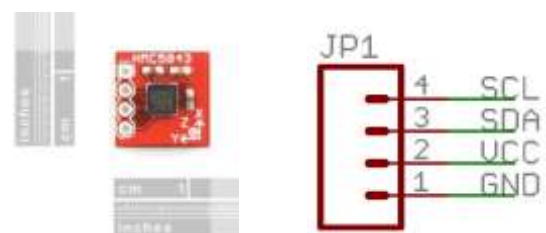
a. Dimensi sensor.

b. Konfigurasi keluaran.

Gambar 1. Razor 6 DoF *IMU*.

### 2.4 Modul Sensor Magnetometer HMC5843

Modul HMC5843 merupakan salah satu modul sensor magnetometer yang biasa digunakan untuk mendeteksi medan magnet bumi. Modul sensor HMC5843 berukuran kecil seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Modul sensor HMC5843 memiliki keluaran digital dengan konfigurasi keluaran seperti pada Gambar 2.



a. Dimensi sensor

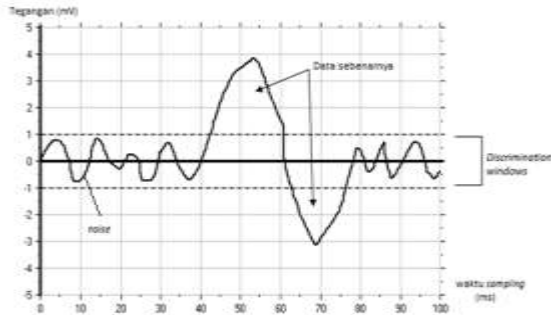
b. Konfigurasi keluaran

Gambar 2. Modul sensor magnetometer HMC5843

### 2.5 Kompensasi Derau Mekanik

Metode *filtering window* atau *discrimination window* digunakan untuk menghilangkan derau mekanik. Derau mekanik menyebabkan sensor yang dalam kondisi tidak bergerak masih menghasilkan sejumlah galat kecil pada sinyal keluaran sensor. *Discrimination window* digunakan untuk memberi perlakuan khusus pada daerah yang terletak antara data yang valid dengan data yang tidak

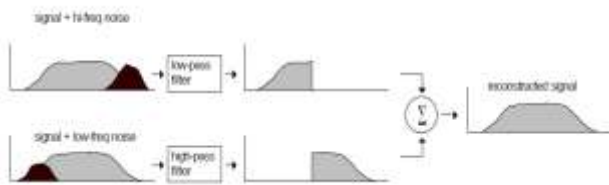
valid. Penerapan *discrimination window* dapat ditunjukkan oleh Gambar 3. Data yang terdapat dalam *discrimination window* akan dianggap sebagai derau. Data yang sebenarnya adalah data yang berada di luar *discrimination window*.



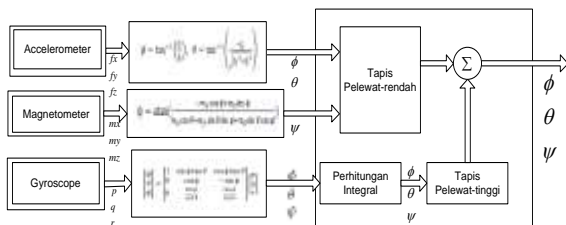
Gambar 3. Metode *discrimination window* sinyal keluaran sensor.

### 2.6 Tapis Komplementer

Dua buah masukan yang salah satunya memiliki derau dengan frekuensi tinggi dan dan masukan yang lain memiliki frekuensi derau rendah. Masukan yang memiliki frekuensi derau tinggi ditapis dengan tapis pelewat-rendah, sedangkan masukan yang memiliki frekuensi derau rendah ditapis dengan tapis pelewat-tinggi. Hasil rekonstruksi kedua sinyal yang masing-masing telah ditapis tersebut merupakan variabel yang ingin dibaca tanpa adanya derau yang sebelumnya terasosiasi dengan sensor.



Gambar 4. Prinsip kerja tapis komplementer.

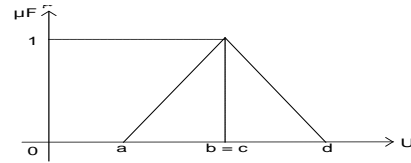


Gambar 5. Diagram tapis komplementer pada sudut orientasi.

$$\phi = (K_{giroskop}) \times (\phi + \dot{\phi}_{Giroskop} \times dt) + (K_{AksiMag}) \times (\phi_{AksiMag}) \quad (1)$$

### 2.6 Logika Fuzzy

Terdapat beberapa fungsi keanggotaan (*membership function = MF*) yang sering digunakan dalam aplikasi logika fuzzy.



Gambar 6. Fungsi keanggotaan segitiga.

$$\mu(u) = \begin{cases} 0 & , \text{ untuk } u \leq a \\ \frac{u-a}{b-a} & , \text{ untuk } a \leq u \leq b \\ \frac{d-u}{d-c} & , \text{ untuk } c \leq u \leq d \\ 0 & , \text{ untuk } u \geq d \end{cases} \quad (2)$$

Gambar 7. Fungsi keanggotaan trapesium.

$$\mu(u) = \begin{cases} 0 & , \text{ untuk } u \leq a \\ \frac{(u-a)}{(b-a)} & , \text{ untuk } a \leq u \leq b \\ 1 & , \text{ untuk } b \leq u \leq c \\ \frac{(d-u)}{(d-c)} & , \text{ untuk } c \leq u \leq d \\ 0 & , \text{ untuk } u \geq d \end{cases} \quad (3)$$

Aturan pada suatu model fuzzy biasa disebut dengan aturan *IF-THEN. if x is A then y is B*. Model fuzzy sugeno (TSK) ini merupakan pendekatan sistematis pembangkit aturan fuzzy dari himpunan data masukan dan keluaran yang diberikan. *if x is A AND y is B then z = f(x, y)*

### 2.7 Root Mean Square Error (RMSE)

*RMS (Root Mean Square)* adalah besarnya pengukuran statistik dari nilai yang bervariasi. *RMSE (Root Mean Square Error)* merupakan nilai *RMS* dari beberapa nilai error.

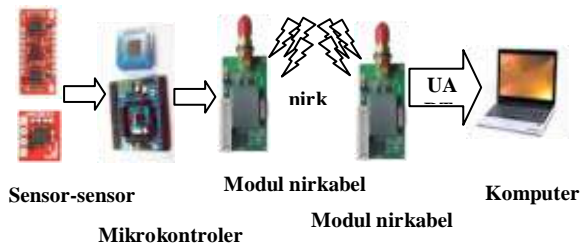
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n e_i^2)} \quad (4)$$

$$RMS_{Total} = \sqrt{RMS_1^2 + RMS_2^2 + \dots + RMS_n^2} \quad (5)$$

### 2.8 Perancangan Perangkat-Keras

Secara umum perancangan perangkat-keras pengukur orientasi sudut dengan sensor 6 DoF IMU dan sensor

magnetometer 3 aksis ditunjukkan oleh blok diagram pada Gambar 8.



Gambar 8. Blok diagram perancangan perangkat-keras.

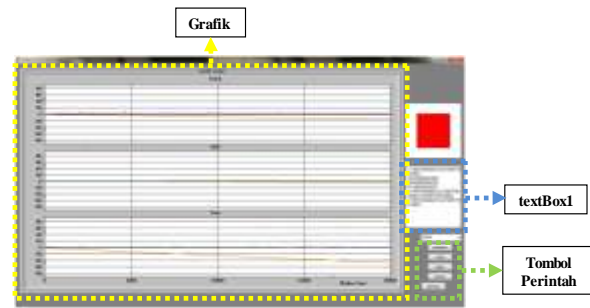
Gambar 8 menunjukkan bahwa data dari sensor dikirim ke mikrokontroler. Data tersebut kemudian diolah oleh mikrokontroler. Data yang telah diolah dikirim ke komputer melalui modul nirkabel untuk ditampilkan.

### 2.9 Perancangan Perangkat-Lunak

Perancangan perangkat-lunak merupakan perancangan algoritma program untuk merealisasikan sistem estimasi sudut orientasi benda menggunakan sensor 6 DoF IMU dan sensor magnetometer 3 aksis. Perancangan perangkat-lunak pada sistem estimasi sudut orientasi benda meliputi dua hal yaitu perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler dan perancangan perangkat lunak pada komputer.

Perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler merupakan perancangan yang dilakukan agar mikrokontroler dapat mengambil, mengolah, dan mengirim data sudut orientasi dari sensor 6 DoF IMU dan sensor magnetometer 3 aksis. Perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler dilakukan dengan bahasa C dan menggunakan *Integrated Development Environment (IDE) CodeVisionAVR (CVAVR)*. Perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler meliputi perancangan pewaktuan program, perancangan antarmuka dengan sensor, perancangan tapis *discrimination window*, perancangan kecepatan sudut dari sensor giroskop, perancangan pembacaan grafitasi dari sensor akselerometer, perancangan pembacaan medan magnet dari sensor magnetometer, perhitungan sudut akselerometer magnetometer, perancangan tapis komplementer, perancangan logika *fuzzy*, dan perancangan pengiriman data serial.

Perancangan perangkat lunak pada komputer dilakukan agar data sudut orientasi dari mikrokontroler dapat diterima, diolah dan ditampilkan di komputer. Perancangan perangkat lunak pada komputer dibuat menggunakan IDE Microsoft Visual Studio 2010 dengan bahasa C#. Perancangan perangkat lunak pada komputer terdiri dari perancangan penerimaan data serial, perancangan pengolahan data, dan penampilan data.



Gambar 9. Tampilan perancangan GUI.

## 3. Hasil dan Analisis

### 3.1 Pengujian Sudut Orientasi pada Kondisi Diam

Pengujian sudut orientasi pada kondisi diam dilakukan dengan pengambilan data masing-masing sumbu (sumbu *pitch*, sumbu *roll* dan sumbu *yaw*) ketika instrumentasi dalam kondisi diam atau statis. Pengambilan data dilakukan dari sudut 0 derajat hingga sudut 90 derajat dengan rentang setiap 15 derajat. Nilai *error* pengujian didapatkan dengan mengurangkan nilai sudut uji dengan sudut percobaan kemudian dibagi 180 derajat dan dikalikan dengan 100%. Hasil perhitungan nilai *RMSE* dari *error* pengujian ditunjukkan oleh Tabel 1.

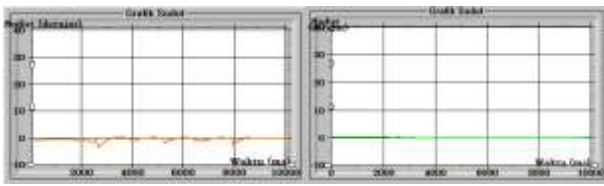
Tabel 1 Hasil perhitungan *RMSE* sudut orientasi.

Sudut	<i>RMSE Pitch</i> (%)	<i>RMSE Roll</i> (%)	<i>RMSE Yaw</i> (%)
0	0,210662	0,155288	0,159155
15	0,385519	0,424635	0,67343
30	0,869479	0,945513	1,195164
45	0,687646	1,183022	1,616897
60	0,886921	0,941559	1,86129
75	1,039743	0,607673	1,276331
90	0,820583	0,766099	2,357398

Nilai *RMSE total* jika dihitung maka hasilnya adalah 3,89517149223433% untuk sumbu *yaw*, 2,08342847210208% untuk sumbu *pitch*, dan 1,99070477466524% untuk sumbu *roll*.

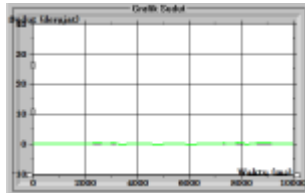
### 3.2 Pengujian Sudut Orientasi pada Kondisi Getar

Pengujian sudut orientasi pada kondisi getar dilakukan dengan pengambilan data sudut orientasi pada masing-masing sumbu (*pitch*, *roll* dan *yaw*) ketika instrumentasi dalam kondisi digerakkan dengan gerakan linear secara berulang-ulang. Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik nilai sudut orientasi yang dihasilkan ketika dalam kondisi getar. Pengujian sudut orientasi kondisi getar dilakukan dengan memberikan getaran pada sumbu X, Y, dan Z.



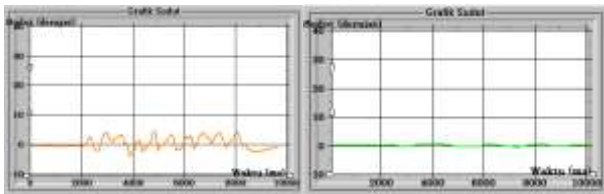
a. *pitch*

b. *Roll*



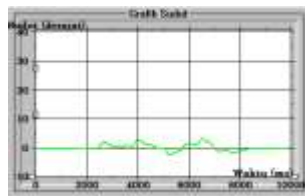
c. *yaw*

Gambar 10. Pengujian gangguan lambat pada sumbu X.



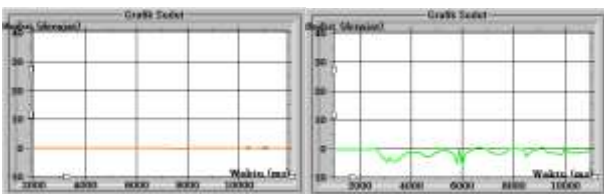
a. *pitch*

b. *Roll*



c. *yaw*

Gambar 11. Pengujian gangguan cepat pada sumbu X.



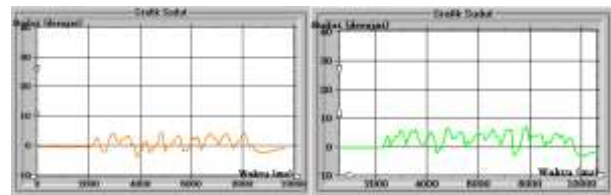
a. *pitch*

b. *Roll*



c. *yaw*

Gambar 12. Pengujian gangguan lambat pada sumbu Y.



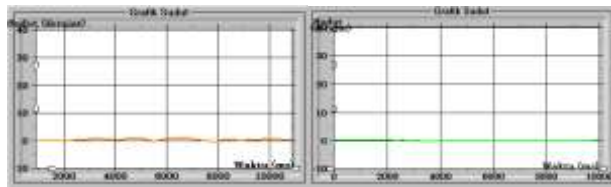
a. *pitch*

b. *Roll*



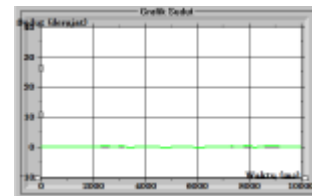
c. *yaw*

Gambar 13. Pengujian gangguan cepat pada sumbu Y.



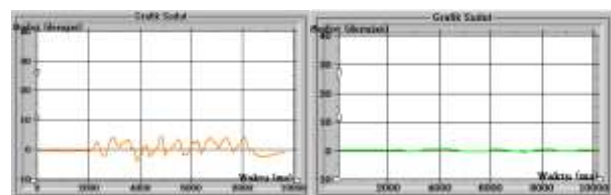
a. *pitch*

b. *Roll*



c. *yaw*

Gambar 14. Pengujian gangguan lambat pada sumbu Z.



a. *pitch*

b. *Roll*



c. *yaw*

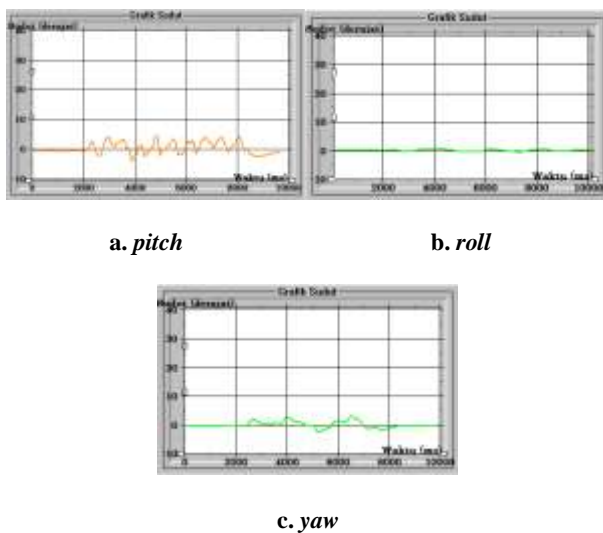
Gambar 15. Pengujian gangguan cepat pada sumbu Z.



Hasil pengujian menunjukkan gangguan getaran pada sumbu X masih sangat mempengaruhi nilai sudut *pitch* dan hanya sedikit berpengaruh pada sudut *roll* dan sudut *yaw*. Gangguan getaran pada sumbu Y masih sangat mempengaruhi nilai sudut *roll* dan hanya sedikit berpengaruh pada sudut *pitch* dan sudut *yaw*. Gangguan getaran pada sumbu Z hanya sedikit berpengaruh pada sudut *pitch*, sudut *roll*, dan sudut *yaw*.

### 3.3 Pengujian Pengaruh Gangguan Sudut Lain

Pengujian pengaruh gangguan sudut lain dilakukan dengan mengambil data sudut orientasi ketika gangguan diberikan pada salah satu sumbu sudut orientasi. Gangguan yang diberikan berupa gerakan berulang-ulang (getaran) sudut pada salah satu sumbu rotasi. Getaran dilakukan dari sekitar sudut  $-45$  derajat hingga  $45$  derajat. Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh gangguan di salah satu sudut orientasi terhadap nilai sudut orientasi yang lain.



Gambar 16. Pengujian gangguan rotasi sudut.

Hasil pengujian menunjukkan sudut *yaw* dan *roll* sedikit ikut bergetar ketika sudut *pitch* diberi gangguan getaran sudut. Sudut *yaw* dan *pitch* sedikit ikut bergetar ketika sudut *roll* diberi gangguan getaran sudut. Sudut *pitch* dan *roll* sedikit ikut bergetar ketika sudut *yaw* diberi gangguan getaran sudut.

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sistem estimasi sudut orientasi dengan sensor *6 DoF IMU* dan sensor magnetometer 3 aksis dapat mengukur sudut orientasi dengan cukup baik. Nilai *RMS total* sudut orientasi masing masing sumbu adalah  $3,89517149223433\%$  untuk sumbu *yaw*,  $2,08342847210208\%$  untuk sumbu *pitch*, dan  $1,99070477466524\%$  untuk sumbu *roll*. Hasil estimasi

sudut orientasi tidak baik digunakan pada sistem yang memiliki kondisi getaran terlalu cepat pada sumbu X dan sumbu Y. Gangguan getaran yang lebih cepat menyebabkan kesalahan pembacaan sudut orientasi lebih besar. Frekuensi gangguan berupa getaran sudut tidak terlalu berpengaruh pada hasil estimasi sudut orientasi. Hasil estimasi sudut orientasi tidak baik digunakan pada sistem yang tidak dapat mentoleransi kesalahan kecil ketika diberi gangguan getaran sudut.

## Daftar Pustaka

- [1]. Anshori, Muhammad Ikhsan, Desain Kontrol Autopilot Pada UGV (*Unmanned Ground Vehicle*) Berbasis GPS (*Global Positioning System*), penelitian Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2012.
- [2]. As'ari, M Hasim, Pendeteksi Sudut Menggunakan Sensor *Gyroscope*, penelitian Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.
- [3]. Colton, Shane, *The Balance Filter : A Simple Solution for Integrating Accelerometer and Gyroscope Measurements for a Balancing Platform*, Chief Delphi white paper, 2007.
- [4]. Glasser, Paul C, *An Introduction to the Use of Complementary Filters for Fusion of Sensor Data*, 1997.
- [5]. Jang, Jyh Shing Roger, Chuen Tsai Sun, Eiji Mizutani. *Neuro Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall International, Inc, 1997.
- [6]. Kurniawan, David, Kontrol *Mobile Robot* Penjejak Objek Bergerak Berbasis Logika Fuzzy, penelitian Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2007.
- [7]. Kuswandi, Son., *Kendali Cerdas Teori dan Aplikasi praktisnya*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2007.
- [8]. Ronnback, Sven, "*Development of a INS/GPS navigation loop for an UAV*", Masters Thesis Lulea University of Technology, 2000.
- [9]. Setyono, Arif, Perancangan Perangkat Lunak Pendeteksi Posisi Benda Dalam 6 Derajat Kebebasan, penelitian Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.
- [10]. Susilo, Tri Bagus, Pengukuran Sudut Kemiringan Benda dengan Sensor Percepatan, penelitian Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.
- [11]. Yoo, Tae Suk, Sung Kyung Hong, Hyok Min Yoon, Sungsu Park, Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System, Open Access, Inc, 2011.
- [12]. -----, *ADXL335 Data Sheet*, <http://www.analog.com>, April 2012.
- [13]. -----, *ATMega 128 Data Sheet*, <http://www.atmel.com>, April 2012.
- [14]. -----, *HMC5843 Data Sheet*, <http://www.honeywell.com>, April 2012.
- [15]. -----, *LPR530AL Data Sheet*, <http://www.analog.com>, April 2012.
- [16]. -----, *LY530ALH Data Sheet*, <http://www.analog.com>, April 2012.
- [17]. -----, *Razor 6DOF and Arduino*, <http://voidbod.net/Razor-6dof>, April 2012.
- [18]. -----, Residu dan error di bidang statistika, [http://en.wikipedia.org/wiki/Errors\\_and\\_residuals\\_in\\_statistics](http://en.wikipedia.org/wiki/Errors_and_residuals_in_statistics), Januari 2013.
- [19]. -----, *RMSE*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Root\\_mean\\_square](http://en.wikipedia.org/wiki/Root_mean_square), Januari 2013.
- [20]. -----, Tapis *Exponential smoothing*, [http://en.wikipedia.org/wiki/Exponential\\_smoothing](http://en.wikipedia.org/wiki/Exponential_smoothing), Januari 2013.