

**METODE ADAPTIF FREKUENSI-CUTOFF UNTUK COMPLEMENTARY FILTER PADA ACCELEROMETER DAN GYROSCOPE UNTUK SUDUT PITCH DAN ROLL WAHANA TERBANG
(ADAPTIVE CUTOFF-FREQUENCY METHOD FOR COMPLEMENTARY FILTER OF ACCELEROMETER AND GYROSCOPE FOR PITCH AND ROLL ANGLES FLIGHT VEHICLE)**

Wahyu Widada

Pusat Teknologi Roket

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Raya LAPAN No. 2, Mekar Sari, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia

e-mail: wahyu.widada@lapan.go.id

Diterima 18 Maret 2015, Direvisi 17 April 2015, Disetujui 21 April 2015

ABSTRACT

Inertial Measurement Unit (IMU) is an electronic device that measures velocity, orientation, and gravitational forces, using a combination of accelerometer and gyroscope sensor, and also magnetometers on flight vehicle. This paper discusses a method complementary adaptive filter with variable cut-off frequency for the integration of accelerometer and gyroscope sensors to measure the pitch and roll angles in the flight vehicle applications, such as guided missile and drone. The accelerometer can be used to measure angles but is affected by high frequency noise, while the gyroscope can be used to measure the angle but is influenced by the drift noise. This filter can integrate the two sensors to measure angles with more accurate, the results of the experiment showed better RMSD (root mean square deviation) about 5,6 times compared with the measurements without the use of filters.

Keywords: Complementary filter, Accelerometer, Gyroscope, Integration sensor, Flight vehicle

ABSTRAK

Unit pengukuran inersia (*Inertial Measurement Unit/IMU*) adalah perangkat elektronik yang digunakan untuk mengukur kecepatan, orientasi, dan gaya gravitasi, dengan menggunakan kombinasi sensor *accelerometer* dan *gyroscope*, dan juga magnetometer pada wahana terbang. Tulisan ini membahas metode *complementary filter* dengan variabel adaptif *cut-off frequency* untuk integrasi sensor *accelerometer* dan *gyroscope* pada pengukuran *pitch* dan *roll* pada aplikasi wahana terbang seperti roket kendali dan pesawat tanpa awak. *Accelerometer* dapat digunakan untuk mengukur sudut tetapi terpengaruh oleh derau frekuensi tinggi, sedangkan *gyroscope* digunakan untuk mengukur sudut tetapi dipengaruhi *drift noise*. Filter ini dapat mengintegrasikan kedua sensor untuk mengukur sudut dengan lebih akurat, dari hasil percobaan menunjukkan *Root Mean Square Deviation* (RMSD) menjadi lebih baik sekitar 5,6 kali dibanding dengan pengukuran tanpa menggunakan filter.

Kata kunci: *Complementary filter, Accelerometer, Gyroscope, Integrasi sensor, Wahana terbang*

1 PENDAHULUAN

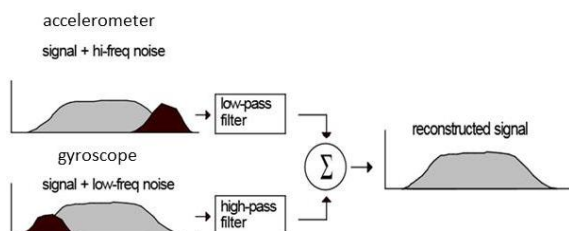
LAPAN mempunyai program untuk mengembangkan wahana terbang seperti roket tipe balistik dan roket kendali serta pesawat tanpa awak. Roket tipe balistik hanya memerlukan data trayektori untuk menentukan performa seperti daya jangkauan dan ketinggian. Data trayektori seperti *Global Position System* (GPS) dapat memenuhi kebutuhan untuk uji terbang roket balistik. Roket tipe kendali dan pesawat tanpa awak memerlukan data sensor yang lebih kompleks untuk menentukan performa pada saat uji terbang, karena data-data tersebut secara aktif digunakan dalam pengendalian gerak roket. Data-data yang sangat diperlukan adalah data percepatan translasi dan data kecepatan sudut putaran. Data tersebut dapat diperoleh dari sensor *Inertial Measurement Units* (IMU) yang berupa *accelerometer* untuk mengukur percepatan gerak dan *gyroscope* untuk mengukur kecepatan sudut putaran [Wahyudi, 2012]. Sensor IMU ini telah digunakan dalam uji peluncuran roket LAPAN untuk tipe RX100 hingga RX320. Kedua sensor tersebut dapat digunakan untuk mengukur sudut baik *pitch*, *yaw*, dan sudut *roll* [Xunyuan Yin, 2013]. Masing-masing sensor mempunyai kelebihan dan kekurangan, sensor *accelerometer* dapat mengukur perubahan sudut berdasarkan nilai percepatan gravitasi tetapi dipengaruhi oleh vibrasi dan akselerasi. Sensor *gyroscope* dapat

mengukur sudut dari proses integral kecepatan sudut, tetapi dipengaruhi oleh sinyal *drift* yang tidak stabil [Jaw-Kuen Shiau, 2012]. Oleh karena itu perlu metode untuk melakukan kombinasi kedua sensor tersebut agar dapat mengukur dengan lebih akurat. Sifat vibrasi dan akselerasi sensor *accelerometer* adalah mempunyai frekuensi tinggi, sedangkan sinyal *drift* pada *gyroscope* mempunyai frekuensi yang rendah. Metode untuk kombinasi sensor tersebut dapat menggunakan Kalman filter dan *complementary filter* dan telah dibandingkan secara matematis [Shu-Chih Yang, 2012; Robert Mahony, 2012]. *Complementary filter* merupakan metode yang dapat mengabungkan kedua sifat sensor tersebut untuk pengukuran nilai yang sama. *Filter* ini merupakan kombinasi *lowpass filter* dan *high pass filter* [R. Baranek, Rogers, 2003]. Metode ini juga telah digunakan pada bidang-bidang lain seperti, robotika dan deteksi gerak manusia [Hassen Fourati, 2013; Ficher 2012; Rantakokko 2011; Ficher 2010]. Dalam bidang pesawat tanpa awak juga sangat penting dan telah banyak diaplikasikan untuk meredam sinyal derau [Guillermo 2002; S. A. Quadri 2014; Xiaodong Zhang 2014]. Pemrosesan sinyal derau pada sensor untuk kecepatan dan percepatan secara matematis telah dilakukan supaya *error* semakin kecil [Hideaki Yamato 2012, N. Chaturvedi 2011, T. Lee 2013].

Tulisan ini membahas metode *adaptive complementary filter* pada sensor IMU wahana terbang untuk menghitung sudut menjadi lebih akurat. Sensor *accelerometer* dan *gyroscope* dikombinasikan pada satu sumbu yang sama untuk mengukur sudut tersebut dengan menggunakan metode kombinasi *complementary filter*. Pengaturan variabel *cut-off frequency* dilakukan secara adaptif yang dapat menyesuaikan secara *realtime* kondisi dinamik wahana terbang. Pengaruh frekuensi tinggi pada *accelerometer* dapat direduksi dan pengaruh frekuensi rendah pada *gyroscope* juga dapat direduksi dengan baik, sehingga sinyal yang diperoleh menjadi lebih akurat. Percobaan metode ini dilakukan dengan menggunakan sensor *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) accelerometer* dan *gyroscope*, sedangkan algoritma diterapkan pada perangkat lunak Matlab pada PC.

2 COMPLEMENTARY FILTER UNTUK SUDUT PITCH-ROLL

Complementary filter dapat digunakan untuk kombinasi data *accelerometer* dan data *gyroscope* terintegrasi dengan melewati melalui *low-pass* dan yang terakhir melalui *high-pass filter order* ke-satu. Gambar 2-1 di bawah adalah ilustrasi sinyal derau pada *accelerometer* (atas) dan sinyal *gyroscope* (bawah), masing-masing derau tersebut akan direduksi dan direkonstruksi sinyalnya menjadi lebih baik.



Gambar 2-1: Blok diagram yang menggambarkan proses ini *complementary filter* dengan *1st-order low-pass* dan *high-pass filter*

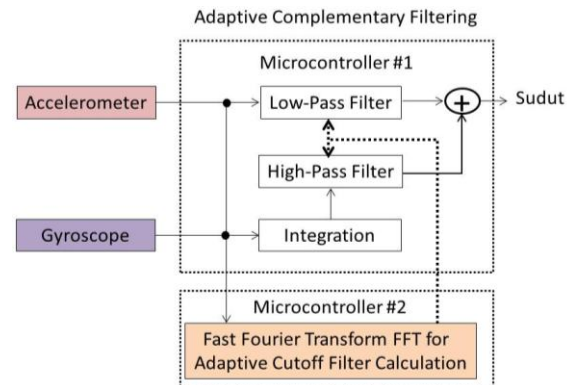
Proses kombinasi tersebut dapat ditulis dengan persamaan berikut:

$$\theta_k = \alpha(\theta_{k-1} + \omega_k \Delta t) + (1 - \alpha)\theta_{accel_k} \quad (2-1)$$

Disini θ menunjukkan estimasi sudut, θ_{accel} adalah perubahan sudut dari sensor *accelerometer*, dan ω adalah kecepatan sudut dari *gyroscope*, sedangkan α adalah parameter yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$\alpha = \frac{T}{\Delta t} / (1 + \frac{T}{\Delta t}) \quad (2-2)$$

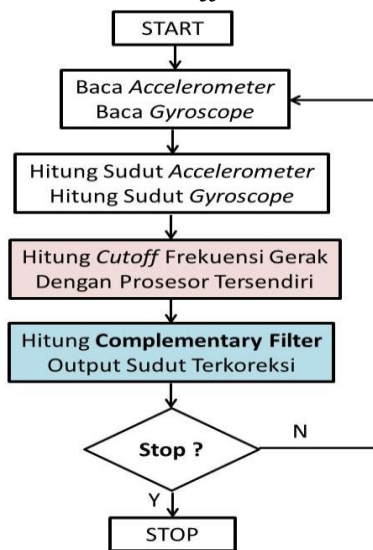
Disini T adalah frekuensi *cut-off filter* sedangkan Δt adalah sampling waktu. Variabel T ini ditentukan secara adaptif dengan menghitung spektrum frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)*, sehingga dapat ditentukan nilainya supaya tepat. Nilai pada percobaan ini adalah gerakan dengan frekuensi sekitar 3 Hz, akan tetapi secara umum nilainya akan selalu berubah mengikuti kondisi sinyal yang diproses dari sensor. Proses pada persamaan (2-1) dan (2-2) dapat digambarkan seperti pada Gambar 2-2.



Gambar 2-2: Bagan konsep *complementary filter* untuk pengukuran sudut menggunakan *accelerometer* dan *gyroscope* dan *microcontroller*

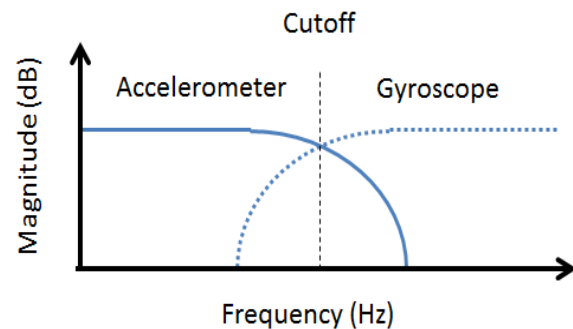
Prosesor ke satu digunakan untuk memproses *filter* digital, sedangkan prosesor ke dua digunakan secara khusus untuk menghitung *cut-off frequency* berbasis algoritma FFT supaya tidak mengganggu kecepatan pemrosesan data (data dikirim melalui komunikasi serial ke prosesor ke 1). Data *gyroscope* diintegrasikan setiap *step* waktu dengan nilai sudut terkini, setelah itu dikombinasikan dengan data *low-pass* dari *accelerometer*. Spektrum frekuensi dihitung secara periodik untuk mengubah nilai *cut-off*

frequency pada persamaan (2), dalam hal ini karena masih dilakukan secara *offline*, maka hanya ditentukan sekali saat merekam data. Akan tetapi pada prosesor *onboard* nantinya proses ini akan dilakukan secara periodik (tiap beberapa detik), nilai *cut-off frequency* akan diperbaharui. Gambar 2-3 adalah rangkuman alur algoritma *complementary filter*, mula-mula membaca sensor yang telah terkalibrasi sebelumnya, kemudian menghitung perubahan sudut dari kedua sensor serta nilai *cut-off* frekuensi.



Gambar 2-3: Alur algoritma adaptif *cut-off frequency* untuk *complementary filter* pada sensor *accelerometer* dan *gyroscope*

Jika nilai *cutoff* ini tidak dilakukan secara adaptif, maka hasil yang akan diperoleh menjadi tidak sesuai. Ilustrasi nilai *cutoff* frekuensi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2-4 berikut ini.



Gambar 2-4: Ilustrasi *cutoff* frekuensi pada *complementary filter* untuk sensor *accelerometer* dan *gyroscope*

Selanjutnya menghitung sudut dengan *complementary filter* dengan keluaran yang sudah terkoreksi. Alur perhitungan ini dilakukan secara terus-menerus selama perhitungan sudut dilakukan. *Complementary filter* ini dapat mengkombinasikan sensor-sensor untuk menghitung sudut yang diperlukan oleh wahana terbang dengan pasangan seperti terlihat pada Tabel 2-1.

Tabel 2-1: KOMBINASI SENSOR UNTUK MENGHITUNG SUDUT DAN POSISI BERBASIS *COMPLEMENTARY FILTER*

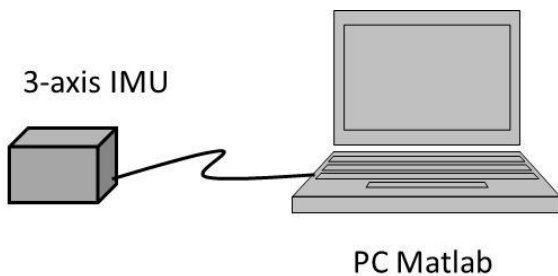
Sudut	Kombinasi Sensor
Roll	<i>Accelerometer</i> dan <i>Gyroscope</i>
Pitch	<i>Accelerometer</i> dan <i>Gyroscope</i>
Yaw	<i>Gyroscope</i> dan <i>Magnetometer</i>
Posisi/Jarak	INS dan GPS

Kombinasi berbasis *complementary filter* ini selain untuk mengukur sudut juga berlaku untuk mengukur jarak, seperti sensor *Inertial Navigatioh System* (INS) dan GPS, hal tersebut sangat kompleks dan perlu diteliti dan dibahas pada tulisan tersendiri secara detail.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Setup Percobaan

Percobaan telah dilakukan dengan menggunakan sensor IMU dan sebuah PC dengan perangkat lunak Matlab. Percobaan dilakukan secara *offline* dengan cara merekam data sensor IMU ke PC melalui komunikasi serial, kemudian data tersebut disimpan dan diolah dengan menggunakan algoritma *complementary filter* yang telah dijelaskan diatas. Skema percobaan seperti pada Gambar 3-1.

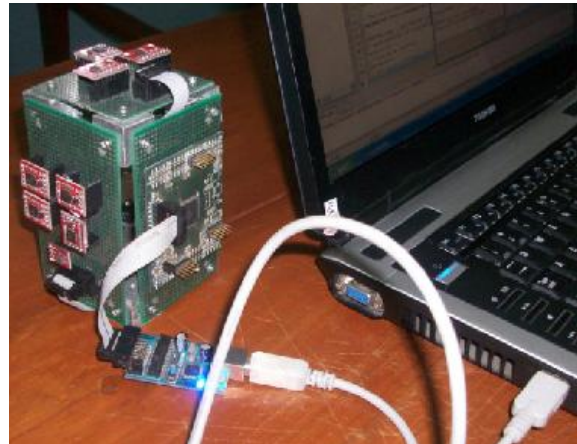


Gambar 3-1: 3-axis IMU dan PC dengan perangkat lunak Matlab untuk percobaan algoritma *complementary filter*

Gambar 3-2 menunjukkan perangkat keras yang digunakan dalam percobaan, sensor IMU terdiri dari 3-axis *accelerometer* tipe ADXL335 (+/-3g) [www.analog.com] dan 3-axis *gyroscope* tipe ITG-3200 (+/-30°/s) [www.sparkfun.com].

Prosesor yang digunakan adalah tipe ATMEL ATmega128 8-bit dengan kemampuan *Analog to Digital Converter* (ADC) 10 bit untuk membaca sensor analog dan digital, serta komunikasi serial maksimum 1 M bps untuk komunikasi ke PC [www.atmel.com]. Kemampuan ADC dari voltase nol sampai dengan 5 Volt. Kecepatan sampling data yang dapat dilakukan hingga lebih dari 200 data tiap detik

dengan 10 bit data dan kecepatan 256 kbps. Sensor *accelerometer* dan *gyroscope* telah dikalibrasi dengan menggunakan metode secara otomatis [Wahyudi dkk, 2012], sensitivitas yang diperoleh adalah 360 mV/g dan 12.5 mV/deg/sec.



Gambar 3-2: Perangkat keras IMU yang terhubung ke PC dengan perangkat lunak Matlab untuk percobaan

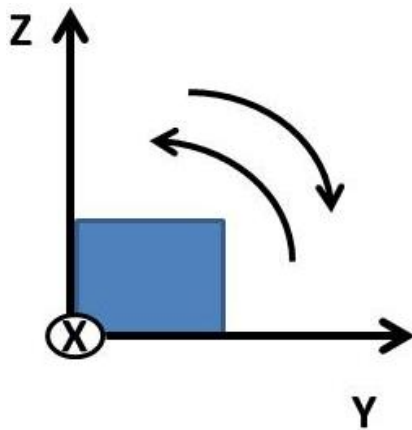
Tabel 3-1: RANGKUMAN PERANGKAT KERAS DAN SENSOR UNTUK PERCOBAAN

Hardware	Type
<i>Accelerometer</i>	ADXL335 (+/-3g) 360 mV / g
<i>Gyroscope</i>	ITG-3200 (+/- 30°/s) 12.5 mV/deg/sec
<i>Microcontroller</i>	ATmega128, 12 bit ADC
<i>PC Software</i>	Window7 dan Matlab

Perangkat keras dan sensor untuk percobaan dapat dirangkum seperti terlihat pada Table 3-1, terdiri dari sensor, mikroprosesor, dan PC.

3.2 Hasil Percobaan dan Analisis

Percobaan dilakukan dengan menggunakan 3-axis *accelerometer* dan 3-axis *gyroscope* yang telah terintegrasi dengan *microcontroller* dengan komunikasi data ke PC. Mula-mula IMU digerakkan berputar fokus pada sumbu X secara perlahan dan diputar kembali seperti posisi semula (Gambar 3-3).



Gambar 3-3: Percobaan sensor yang digerakkan berputar kekiri dan diputar kembali kearah kanan.

Data ke-enam sensor dibaca dan dikirim ke PC yang direkam ke memori. Dari data tersebut, dengan menggunakan perangkat lunak Matlab, perubahan sudut sensor IMU dihitung berdasarkan data *accelerometer*, data *gyroscope*, dan gabungan ke-dua sensor dengan *complementary filter*. Perhitungan sudut dari sensor *accelerometer* dapat ditulis dengan persamaan berikut.

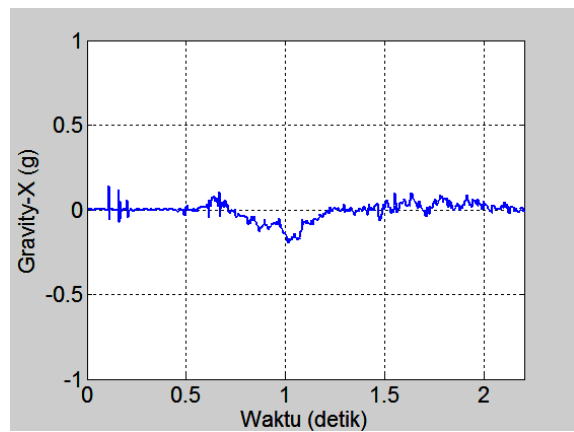
$$\theta_{accel}(t) = \arctan\left(\frac{A_y(t)}{A_z(t)}\right) \quad (3-1)$$

Disini A_y adalah gaya gravitasi yang terukur pada *accelerometer* sumbu-Y dan A_z adalah gaya gravitasi yang terukur pada *accelerometer* sumbu-Z, sedangkan t adalah waktu. Perhitungan sudut secara prinsip dari sensor *gyroscope* dapat ditulis dengan persamaan berikut.

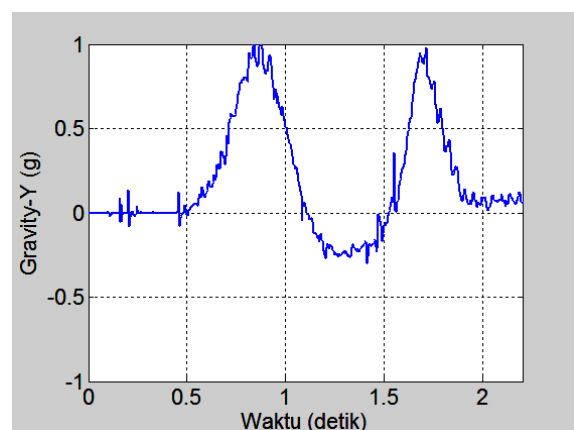
$$\theta_{gyro}(t) = \int_0^t \dot{\theta}_{gyro}(t) dt \quad (3-2)$$

Disini sudut θ dihitung dengan integral dari kecepatan sudut dari sensor *gyroscope*. Pada prinsipnya selain percepatan sudut juga terdapat sinyal *drift* dengan frekuensi rendah dan sinyal derau, sehingga akan menjadikan kesalahan pada sudut yang dihitung. Gambar 3-4 adalah data *accelerometer* pada sumbu-X yang direkam selama lebih dari dua detik. Pada sumbu ini terlihat perubahan percepatan gravitasi tidak melebihi seperempat g , karena berputar pada sumbu tersebut.

Sedangkan pada Gambar 3-5 adalah data *accelerometer* pada sumbu-Z, perubahan percepatan hingga mencapai $1 g$. Dari kedua data tersebut terlihat data tidak secara mulus, masih adanya semacam derau sinyal yang disebabkan adanya vibrasi dan dari derau elektronik. Perhitungan sudut dari sensor *accelerometer* ini hanya perhitungan langsung antara data sensor pada sumbu yang berbeda, sehingga tidak mengandung proses *filtering*. Data sudut yang akan diperoleh juga tetap mengandung sinyal derau. Akan tetapi proses ini mempunyai kelebihan tidak menghitung akumulasi kesalahan, sehingga semakin lama nilai *error* tidak semakin membesar, hanya terjadi pada saat perhitungan saja.



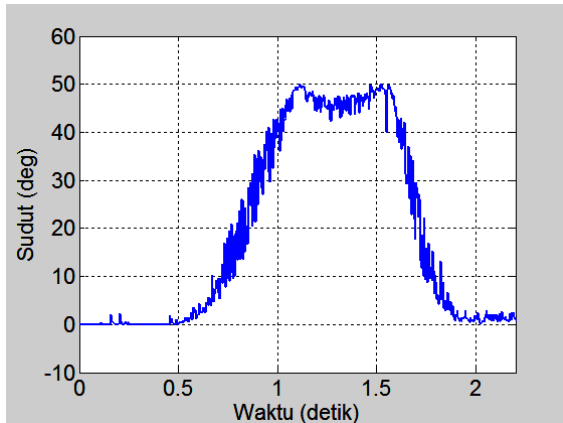
Gambar 3-4: Gaya gravitasi pada sumbu X diukur menggunakan *accelerometer*



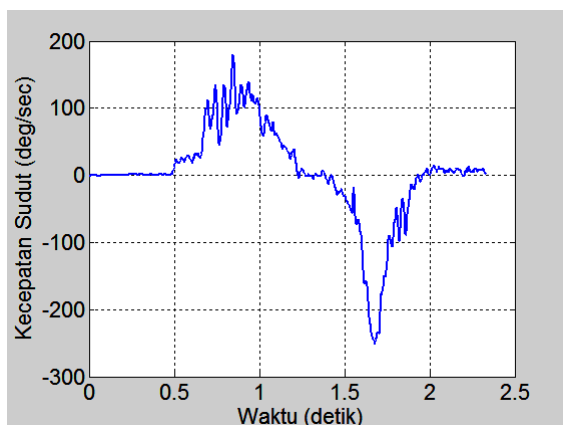
Gambar 3-5: Gaya gravitasi pada sumbu Y diukur menggunakan *accelerometer*

Dengan menggunakan persamaan (3-1) diatas, maka perubahan sudut dapat dihitung dan ditampilkan pada Gambar

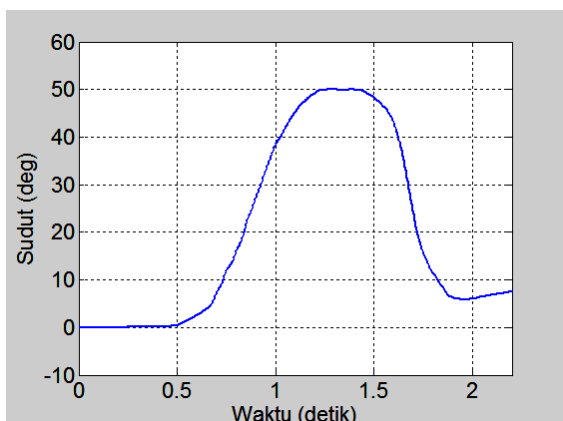
3-6 di bawah. Seperti terlihat pada Gambar 3-6, sudut yang dihitung dari sensor *accelerometer* mengalami derau yang cukup mengganggu dengan komponen frekuensi yang cukup tinggi yang disebabkan oleh adanya getaran pada saat berputar. Nilai sudut setelah selesai diambil data adalah mendekati nol atau kembali seperti semula.



Gambar 3-6: Sudut diukur menggunakan *accelerometer* pada sumbu Y



Gambar 3-7: Kecepatan sudut *gyroscope* pada sumbu Y



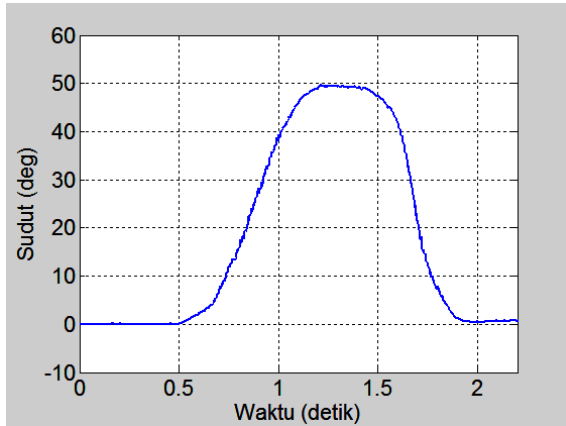
Gambar 3-8: Sudut *gyroscope* pada sumbu Y

Kecepatan sudut yang diukur dengan menggunakan sensor *gyroscope* dapat dilihat pada Gambar 3-7. Terlihat kecepatan sudut dapat mencapai sekitar 180 deg/detik baik arah positif maupun arah sebaliknya.

Sedangkan hasil perhitungan sudut oleh *gyroscope* berdasarkan persamaan (3-2) seperti terlihat pada Gambar 3-8 terlihat kurvanya lebih halus bebas dari sinyal derau, akan tetapi perubahan sudut seperti sedikit tidak normal semakin naik atau tidak kembali seperti semula (mendekati nol). Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan nilai pada saat diam atau stabil yang sudah sedikit berubah (nilai *offset*), sehingga dengan adanya proses integral pada persamaan (3-2) semakin lama akan semakin menyimpang ke atas nilainya. Hal ini disebabkan naiknya nilai *offset* saat sensor diam, sehingga menambah nilai sudut saat proses integral. Pada percobaan ini dilakukan pada saat awal sensor digunakan, sehingga nilai *offset* belum stabil dengan baik. Perubahan ini bersifat frekuensi rendah, sehingga perlu adanya eliminasi sinyal pada frekuensi rendah tersebut dengan menggunakan *lowpass filter*. Sesuai dengan fungsinya, *complementary filter* dapat mengkombinasikan kedua sensor ini, sehingga kekurangan-kekurangan dari kedua sensor tersebut dapat direduksi agar hanya kelebihan saja yang dikombinasikan menjadi alat ukur yang lebih akurat hasilnya. Gambar 3-9 adalah hasil kombinasi sensor dengan *complementary filter*, terlihat perubahan sudut lebih halus dan pengaruh *drift* dapat direduksi dengan baik, sehingga nilai sudut terakhir mendekati nol atau kembali seperti semula.

Perubahan data maksimum sudut *accelerometer* mencapai 12 deg per sampling waktu (Gambar 3-8) sedangkan dari hasil kombinasi menjadi berkurang hanya sekitar 0,6 deg (Gambar 3-9) sehingga lebih bebas

gangguan. Pada saat kondisi diam pada pegangan nilai *Root Mean Square Deviation* (RMSD) sudut *accelerometer* adalah 0,34, sedangkan dari *filter* yang digunakan menjadi 0.06, sehingga lebih baik sekitar 5,6 kali.



Gambar 3-9: Sudut *complementary filter* pada sumbu Y

Sensor *accelerometer* digunakan untuk mengukur gaya spesifik yang terjadi di sensor, pada saat benda diam tidak bergerak atau bergerak dengan kecepatan konstan hanya gaya gravitasi pada arah vertikal yang terukur. Gaya gravitasi ini digunakan untuk mengukur sudut *pitch* dan *roll*. Tetapi pada saat terjadi percepatan gerak, maka sinyal akan tercampur dan dapat mengganggu perhitungan sudut tersebut. Untuk mengukur sudut tersebut maka perlu *filter* yang dapat menghilangkan pengaruh gaya luar tersebut. Sebaliknya jika ingin mengukur gaya luar tersebut, maka harus dapat menghilangkan pengaruh gaya gravitasi bumi. *Gyroscope* yang dapat digunakan untuk mengukur kecepatan sudut dapat mengalami tambahan kesalahan hitung sudut saat proses integral. Kedua sensor ini mempunyai kecepatan sampling yang sama atau saat yang berbarengan data diakuisisi, sehingga pada algoritma *complementary filter* mudah diterapkan. Untuk sensor yang mempunyai kecepatan data yang berbeda seperti *accelerometer* dan GPS saat mengukur jarak, maka perlu tambahan algoritma untuk penyesuaian kecepatan akuisisi

data ini atau disebut *multirate filtering* [Xue Guang-Yue, 2013]. Untuk kasus kedua sensor dalam percobaan ini nilai *cutoff* frekuensi yang harus dapat mengikuti kondisi vibrasi dan *shock* pada wahana terbang yang akan diaplikasikan. Semakin banyak getaran seperti pesawat yang memakai motor serta kecepatan manuver yang berubah-ubah, maka pemilihan parameter disesuaikan dengan kondisi tersebut. Perhitungan langkah pada *Complementary filter* ini lebih sederhana serta sedikit dibandingkan *Kalman filter*, sehingga lebih cocok untuk aplikasi kecepatan data yang lebih tinggi [Robert Mahony, 2012] seperti untuk pesawat tanpa awak yang hanya sedikit membawa beban.

Untuk menghitung spektrum frekuensi dengan FFT perlu menggunakan mikroprosesor khusus yang mempunyai kecepatan yang cukup seperti tipe AVR32 32-bit RISC arsitektur yang diproduksi oleh Atmel [www.atmel.com/images/doc32076.pdf]. Mikroprosesor ini juga telah dilengkapi fungsi perhitungan FFT, sehingga sangat cepat dibanding dengan tipe 8-bit. Implementasi metode ini memerlukan penelitian lebih lanjut yang memerlukan dua buah khusus mikroprosesor agar perhitungan FFT dan sampling data menjadi lebih cepat.

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Metode *complementary filter* sangat cocok untuk aplikasi penggabungan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* untuk mengukur sudut *pitch*, dan *roll* pada wahana terbang, sedangkan untuk sudut *yaw*, dapat menggunakan sensor *gyroscope* dan sensor *magnetometer*. Gangguan sinyal *drift* pada *gyroscope* dan sinyal derau akibat vibrasi gravitasi pada *accelerometer* dapat diredam dengan baik dan hasil akhir pengukuran sudut menjadi lebih akurat sekitar 5,6 kali berdasarkan RMSD.

Signal dari sensor pada percobaan mempunyai frekuensi sekitar 3 Hz yang digunakan sebagai *cutoff* frekuensi, *complementary filter* dapat

mengestimasi orientasi sudut dengan baik. Untuk gerak seperti pesawat dan roket kendali, nilai *cutoff* frekuensi ini akan berubah-ubah secara adaptif mengikuti kondisi gerak dan gangguan vibrasi yang terjadi.

Konsumsi memori dan langkah yang tidak banyak memungkinkan untuk memproses secara lebih cepat untuk aplikasi wahana dengan gerak kecepatan tinggi. Mikroprosesor khusus untuk *Digital Signal Processing* (DSP) akan lebih mempercepat proses perhitungan FFT dan keseluruhan jumlah data tiap detik, sehingga proses adaptif akan berjalan dengan lancar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Saya ucapkan terimakasih kepada Pustekroket dan Ristek atas pembiayaan dalam program Sinas 2010 - 2011, sehingga tersedianya perangkat keras untuk pengujian dalam penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- C. Fischer and H. Gellersen, 2010. *Location and Navigation Support for Emergency Responders: A Survey*, IEEE Pervasive Computing, vol. 9, no. 1, 38-47, January-March 2010.
- C. Fischer P. T. Sukumar, and M. Hazas 2012. *Tutorial: Implementation of a Pedestrian Tracker Using Foot-Mounted Inertial Sensors*, IEEE Pervasive Computing, DOI: 10.1109/MPRV.2012.16, January 2012.
- Guillermo Heredia, 2011. *Detection of Sensor Faults in Small Helicopter UAVs Using Observer/Kalman Filter Identification*, Jurnal Mathematical Problems in Engineering Volume 2011 (2011), Article ID 174618, 20 pages.
- Hassen Fourati, 2013. *Position Estimation Approach by Complementary Filter-aided IMU for Indoor Environment*, European Control Conference (ECC 2013), Jul 2013, Zurich, Switzerland. 4028-4213.
- Hideaki Yamato, Takayuki Furuta, and Ken Tomiyama, 2012. *Attitude Determination by Globally and Asymptotically Stable Estimation of Gyroscope Bias Error with Disturbance Attenuation and Rejection*, Journal ref: Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 24, No. 2, 389-398, 2012.
- <http://www.atmel.com/images/doc32076.pdf> (15 Maret 2015).
- J. Rantakokko, J. Rydell, P. Stromback, P. Handel, J. Callmer, D. Tornqvist, F. Gustafsson, M. Jobs, M. Gruden, M., 2011. *Accurate Andreliable Soldier and First Responder Indoor Positioning: Multisensor Systems and Cooperative Localization*, IEEE Wireless Communications, vol. 18, no.2, 10-18, April 2011.
- Jaw-Kuen Shiau dkk, 2012. *Noise Characteristics of MEMS Gyro's Null Drift and Temperature Compensation*, Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 15, No. 3, 239246.
- N. Chaturvedi, A. Sanyal, and N. McClamroch, 2011. *Rigid-Body Attitude Control*, IEEE Control Systems Magazine, vol. 31, no. 3, 30-51, 2011.
- R. Baranek, 2013. *Tuning of Complementary Filter Attitude Estimator using Precise Model of Multicopter*, Jurnal Electroscopie ISSN,1802-4564, 18-11-2013.
- Robert Mahony dkk, 2012. *Nonlinear Complementary Filters on the Special Linear Group*, International Journal of Control Volume 85, Issue 10, 1557-1573 Juni.
- Rogers, M. R., 2003. *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. Reston, Virginia. Second edition.
- S. A. Quadri and Othman Sidek, 2014. *Error and Noise Analysis in an IMU using Kalman Filter*, International Journal of Hybrid Information Technology Vol.7, No.3 (2014), 39-48.
- Shu-Chih Yang dkk, 2012. *Handling Nonlinearity in an Ensemble Kalman Filter: Experiments with the Three-Variable Lorenz Model*, jurnal Mon. Wea. Rev., 140, 2628-2646, Agustus.

- T. Lee, 2013. *Robust Adaptive Attitude Tracking on so (3) with an Application to a Quadrotor UAV*, IEEE Transactions on Control System Technology, vol. 21, no. 5, 1924–1930.
- Wahyudi, 2012. *Metode Kalibrasi Sensor rate-Gyroscope Untuk IMU Roket*, Jurnal Teknologi Dirgantara, Vol.10 No.2 Desember.
- [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADX L335.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADX_L335.pdf) (1-03-2015).
- www.atmel.com/images/doc2467.pdf (1-03-2015).
- www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Gyro/PS-ITG-3200-00-01.4.pdf (1-03-2015).
- Xiaodong Zhang, Xiaoli Li, Kang Wang, and Yanjun Lu, 2014. *A Survey of Modelling and Identification of Quadrotor Robot*, Applied Analysis Volume 2014 (2014), Article ID 320526, 16 pages.
- Xue Guang-Yue, Ren Xue-Mei and Xia Yuan-Qing, 2013. *Multi-rate Sensor Fusion-Based Adaptive Discrete Finite-Time Synergetic Control For Flexible-Joint Mechanical Systems*, Journal Chinese Phys. B 22 100702 Issue 10.
- Xunyuan Yin, 2013. *Positioning Errors Predicting Method of Strapdown Inertial Navigation Systems Based on PSO-SVM*, Jurnal Applied Analysis Volume 2013.