

PENGEMBANGAN MULTISENSOR IMU (*INERTIAL MEASUREMENT UNITS*) UNTUK ROKET KENDALI

(*MULTISENSOR IMU (INERTIAL MEASUREMENT UNITS) DEVELOPMENT FOR GUIDED ROCKET*)

Sri Kliwati

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jln Raya LAPAN Rumpin Bogor Indonesia
Pos El : sri.kliwati@lapan.go.id

Abstrak

Inertial Measurement Unit (IMU) berfungsi untuk mengukur laju dan kecepatan angular pada 3 sumbu yang merupakan bagian penting dalam sistem kontrol navigasi roket. Pergerakan ini memiliki jangkauan laju dan akselerasi angular yang sangat lebar pada sumbu forward saat sensor dengan sensitivitas tinggi memiliki jangkauan sempit dalam pengukuran, dan sebaliknya. Guna mendapatkan sensitivitas yang optimum pada semua sensor, sistem multi sensor harus diaplikasikan pada IMU. Komponen utama pada IMU adalah mikrokontroler, giroskop, akselerometer dan XBee-PRO. Mikrokontroler menerima data laju dan akselerasi angular pada sumbu x dari dua sensor dan tiga sensor secara berurutan, sedangkan data laju dan akselerasi angular pada kedua sumbu y dan z berasal dari dua sensor. Algoritma seleksi dari sensor digunakan untuk mendapatkan enam derajat kebebasan (6-DOF) dari roket. IMU dites menggunakan simulator pergerakan 3 sumbu ST-3176-TC-10 dan menunjukkan bahwa metode yang diajukan memberikan data laju dan kecepatan angular dengan sensitivitas yang lebih tinggi.

Kata Kunci: IMU, multi sensor, algoritma seleksi, sensitivitas

Abstract

Inertial Measurement Unit (IMU) to measure the angular rate and acceleration in three axis is an important part of the rocket navigation control system. This motion has very wide range of angular acceleration and rate in forward axis while a sensor with high sensitivity has a short range of measurement, and vice versa. To get the optimum sensitivities of all sensors, multi-sensor system should be applied in IMU. The main components of IMU are microcontroller, gyroscope, accelerometer, and XBee-PRO. Microcontroller received acceleration and angular rate data in x axis from two sensors and three sensors respectively, and acceleration and angular rate data in both y and z axis from two sensors. Selecting algorithm of sensor are used to obtain six Degree of Freedom (6-DOF) of rocket. IMU was tested using three-axis motion simulator ST-3176-TC-10 and shown that the proposed method gives the angular rate and acceleration data with the higher sensitivity.

Keywords: IMU, multisensor, selecting algorithm, sensitivity

1. PENDAHULUAN

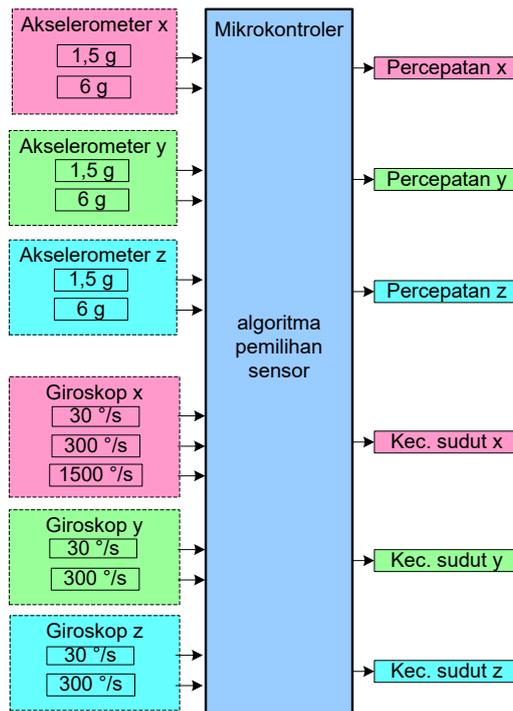
Roket kendali membutuhkan sensor IMU untuk menghasilkan posisi dan *attitude* roket ketika terbang. Informasi dari IMU dalam 3 sumbu, yaitu 6 derajat kebebasan digunakan untuk menentukan keberadaan roket pada saat dikendalikan. Roket kendali menggunakan 2 tipe sistem pendorong roket, yaitu *booster* dan *sustainer*. *Booster* digunakan untuk menggerakkan roket sampai ketinggian dan kecepatan tertentu, sedangkan *sustainer* digunakan untuk menggerakkan roket pada saat dikendalikan. Percepatan gerak roket yang disebabkan oleh penggerak *booster* lebih besar jika dibandingkan dengan penggerak *sustainer*, sehingga roket mempunyai jangkauan percepatan yang cukup lebar. Jika pada pengukuran percepatan gerak roket digunakan suatu sensor dengan jangkauan yang lebar, maka hasil pengukurannya akan kurang teliti dan jika digunakan suatu sensor dengan ketelitian yang lebih tinggi, maka jangkauan pengukurannya akan tidak dapat memenuhi untuk jangkauan gerak roket. Suatu sensor dengan jangkauan yang lebar biasanya mempunyai sensitivitas rendah, sedangkan suatu sensor yang mempunyai sensitivitas tinggi biasanya mempunyai jangkauan pengukuran yang sempit. Hasil pengukuran sensor IMU yang kurang teliti akan menyebabkan roket sulit untuk dikendalikan. IMU merupakan komponen utama dalam sistem navigasi, dimana untuk mendapatkan data posisi, kecepatan, dan ketinggian suatu benda diperlukan sensor akselerometer dan giroskop [1]. Ada dua cara dalam merancang IMU yang terdiri dari enam derajat kebebasan [2]. Cara pertama terdiri dari tiga sensor

akselerometer dan tiga sensor giroskop, dan cara ini merupakan cara yang dikembangkan dalam penelitian ini, karena untuk mendapatkan data tersebut diperlukan sedikit proses integral. Cara kedua hanya menggunakan sensor akselerometer saja, sehingga cara ini juga disebut sebagai IMU tanpa giroskop (*gyro-free* IMU). Cara pertama dengan melakukan integral sekali terhadap data keluaran giroskop untuk mendapatkan data rotasi dan melakukan integral dua kali terhadap data keluaran akselerometer untuk mendapatkan data posisi. Pada cara kedua, untuk mendapatkan data rotasi dan posisi diperlukan integral sekali atau dua kali terhadap data keluaran akselerometer, tergantung dari konfigurasi yang digunakan, misalnya menggunakan sembilan sensor akselerometer [3]. Penelitian IMU yang digunakan untuk mengetahui posisi sistem navigasi telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya sebagai sistem monitoring kendaraan [4], sistem navigasi pesawat terbang [5], sistem navigasi helikopter [6], sistem navigasi kendaraan di dalam air [7], menentukan posisi robot [8], eskalator [9], dan untuk peluncuran roket [10,11]. Ada beberapa penelitian dasar yang menjelaskan bagaimana suatu IMU dibuat, diantaranya adalah perancangan sistem akuisisi data dan sistem pemrosesan pada IMU [12], perancangan filter pada sensor akselerometer dan sensor giroskop [13], dan buku teks tentang roket kendali dan sistem kontrol [14].

Tulisan ini membahas IMU untuk roket kendali dengan menggunakan multi sensor. Sensor yang digunakan adalah akselerometer dan giroskop pada tiga sumbu. Simulasi dan analisis telah dilakukan dengan menggunakan rancangan multi sensor yang terdiri dari akselerometer dan giroskop.

2. MULTI SENSOR IMU

Komponen utama pada perancangan IMU terdiri atas sensor akselerometer, sensor giroskop, mikrokontroler, dan komputer. Gambar 2-1 menunjukkan hubungan antara sensor dan mikrokontroler.



Gambar 2-1 Hubungan antara sensor dan mikrokontroler.

Sensor akselerometer digunakan untuk mendeteksi percepatan linier pada sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. Sensor giroskop digunakan untuk mendeteksi kecepatan sudut pada sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. Mikrokontroler digunakan untuk mengubah data analog dari sensor menjadi data digital dengan menggunakan ADC internal, mengolah data sensor akselerometer dan sensor giroskop untuk mendapatkan percepatan dan kecepatan sudut pada ketiga sumbu, serta komputer digunakan untuk menampilkan hasil pengolahan data sensor. Berdasarkan gerak roket, percepatan roket pada ketiga

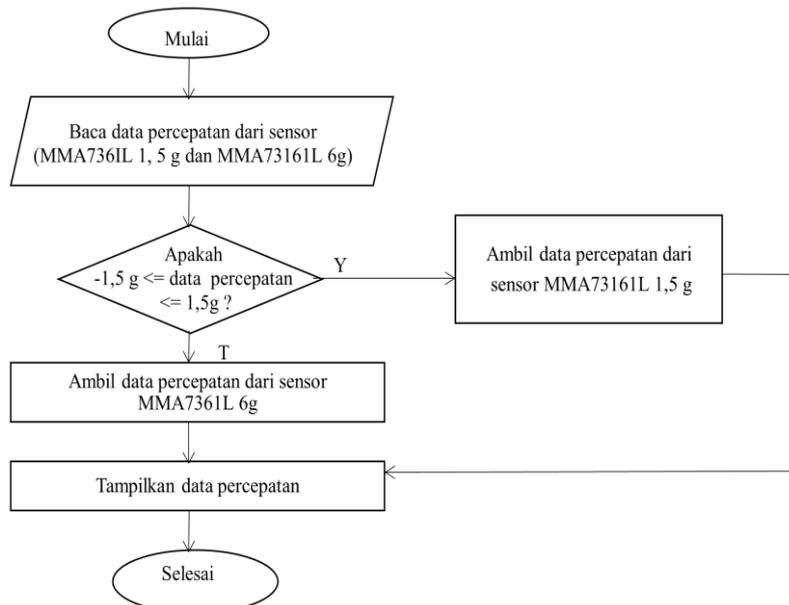
sumbu dapat dipasang sensor akselerometer dengan 2 tingkat percepatan yaitu 1,5 g dan 6 g. Kecepatan sudut pada sumbu x dipasang sensor giroskop dengan 3 tingkat kecepatan sudut yaitu 30°/s, 300°/s, dan 1500°/s, sedangkan pada sumbu y dan z dipasang 2 tingkat kecepatan sudut yaitu 30°/s dan 300°/s. Hubungan sensor akselerometer dan giroskop dengan mikrokontroler diperlihatkan pada gambar 2-1. Port A dan port B pada mikrokontroler XMega128A1 difungsikan sebagai ADC 12 bit dan digunakan untuk mengubah tegangan analog keluaran sensor akselerometer dan sensor giroskop menjadi data digital. Kedua ADC mempunyai tegangan referensi yang terpisah dan diberi tegangan referensi dari luar, sehingga pada port A0 dan port B0 masing-masing diberi tegangan referensi sebesar 3,3V. Kedua jenis ADC dioperasikan dengan menggunakan mode yang sama yaitu mode *unsign*, sehingga tegangan keluaran sensor akselerometer dan sensor giroskop direpresentasikan dalam besaran ADC yang bernilai antara 0 sampai dengan 4095. Sensor akselerometer dan giroskop dilengkapi dengan rangkaian filter LPF (*Low Pass Filter*) analog orde satu yang terdiri atas komponen resistor dan kapasitor. Filter tersebut digunakan untuk menghilangkan derau keluaran sensor. Filter pada akselerometer menggunakan resistor sebesar 32 k Ω dan kapasitor 3,3 nF, sehingga frekuensi *cutoff* sebesar 1507 Hz. Sensor giroskop diberikan filter dengan nilai resistor sebesar 33 k Ω dan kapasitor sebesar 0,1 μ F, sehingga frekuensi *cutoff* sebesar 48 Hz.

Mikrokontroler mengirimkan data sensor akselerometer dan sensor giroskop pada ketiga sumbu ke komputer dilakukan secara serial, baik dengan menggunakan kabel maupun secara nirkabel. Tidak semua pin pada modul Xbee-Pro digunakan. Pin yang digunakan dalam berkomunikasi dengan mikrokontroler ada 4, yaitu DOUT, DIN, CTS, dan RTS, sedangkan pin lain yang digunakan adalah pin untuk catu tegangan.

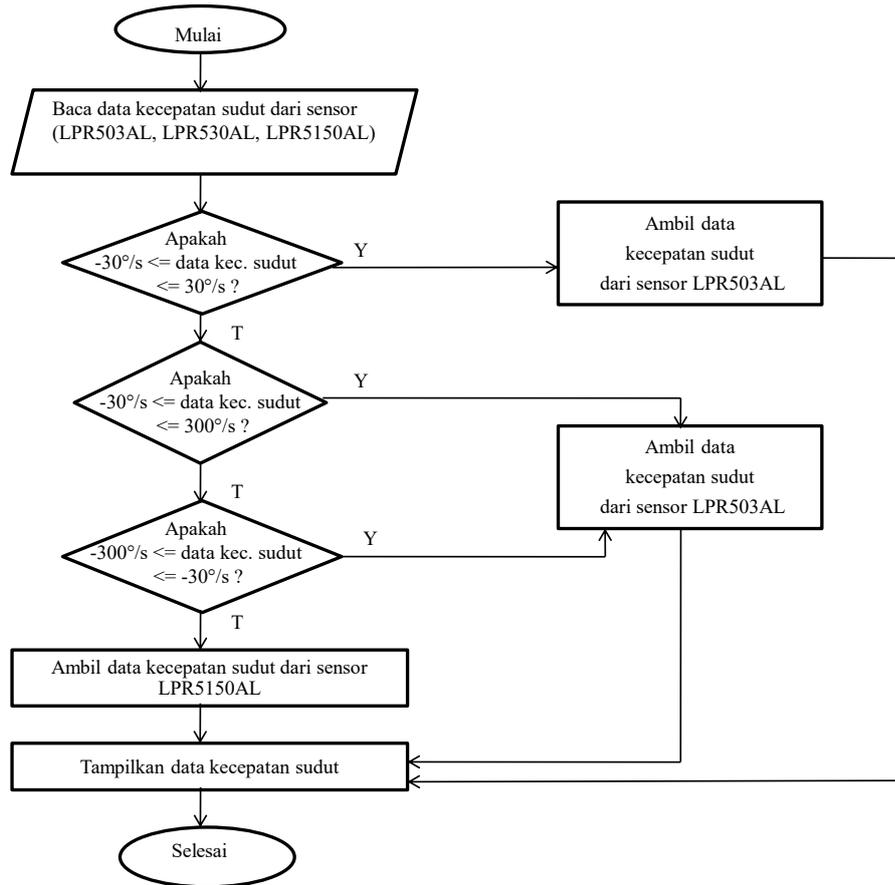
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi gerak roket dilakukan dengan memberi percepatan dan kecepatan sudut yang dihasilkan oleh sensor IMU. Pemberian percepatan merepresentasikan gerak translasi roket dan kecepatan sudut merepresentasikan gerak putaran roket.

Penggunaan multisensor pada IMU menghasilkan beberapa data percepatan dan data kecepatan sudut pada masing-masing sumbu, sehingga diperlukan algoritma untuk memilih data sensor. Roket kendali membutuhkan data inersia yang cepat, sehingga algoritma pemilih data sensor harus memerlukan waktu sesingkat mungkin. Algoritma Pemilih Data Sensor (PDS) yang bertujuan untuk memilih data sensor percepatan dan data sensor kecepatan sudut dengan sensitivitas yang lebih tinggi diterapkan pada setiap sumbu. Secara diagram, algoritma PDS dtunjukkan pada gambar 3-1 dan gambar 3-2 yang masing-masing untuk data percepatan dan data kecepatan sudut.

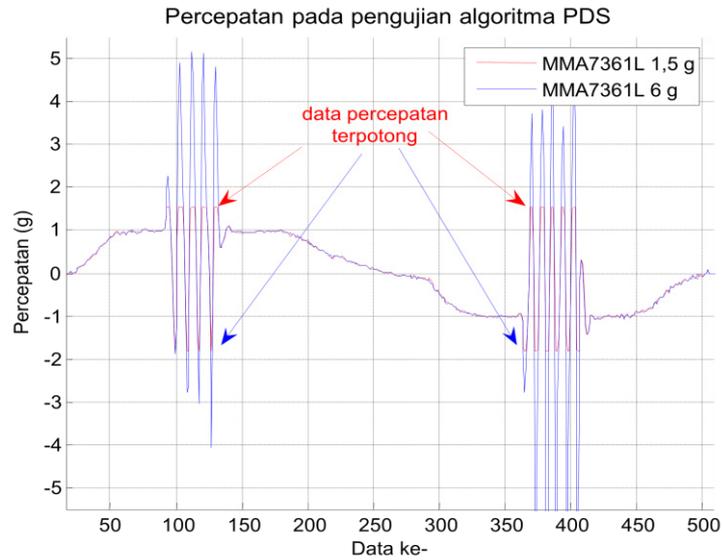


Gambar 3-1 Diagram alir algoritma PDS untuk data percepatan.

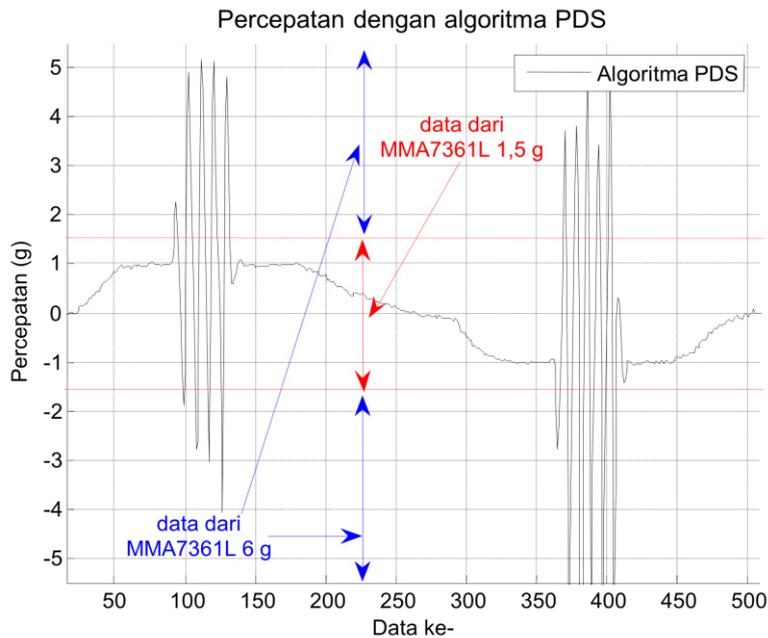


Gambar 3-2 Diagram alir algoritma PDS untuk data kecepatan sudut.

Simulasi gerak translasi roket dilakukan dengan memberikan percepatan tertentu pada sensor IMU sehingga percepatannya lebih kecil dari percepatan minimum sensor MMA7361L 1,5 g dan lebih besar dari percepatan maksimum sensor MMA7361L 1,5 g. Simulasi putaran roket dilakukan dengan memberikan kecepatan sudut pada sensor IMU sehingga kecepatan sudutnya lebih kecil dari kecepatan sudut minimum sensor LPR503AL dan lebih besar dari kecepatan sudut maksimum sensor LPR503AL. Gambar 3-3 memperlihatkan keluaran kedua akselerometer saat diberi percepatan tertentu. Pengujian dilakukan dengan memberi percepatan pada sensor IMU sebesar 1 g dan -1 g, kemudian diberi percepatan tambahan sehingga data akselerometer MMA7361L 1,5 g terpotong. Gambar 3-3 memperlihatkan bahwa sensor MMA7361L 1,5 g terpotong pada nilai tertentu, sedangkan sensor MMA7361L 6 g masih dapat mendeteksi nilai percepatan yang diberikan. Hasil pemilihan data percepatan dari gambar 3-3 dengan menggunakan algoritma PDS diperlihatkan pada gambar 3-4.



Gambar 3-3 Percepatan pada pengujian algoritma PDS.



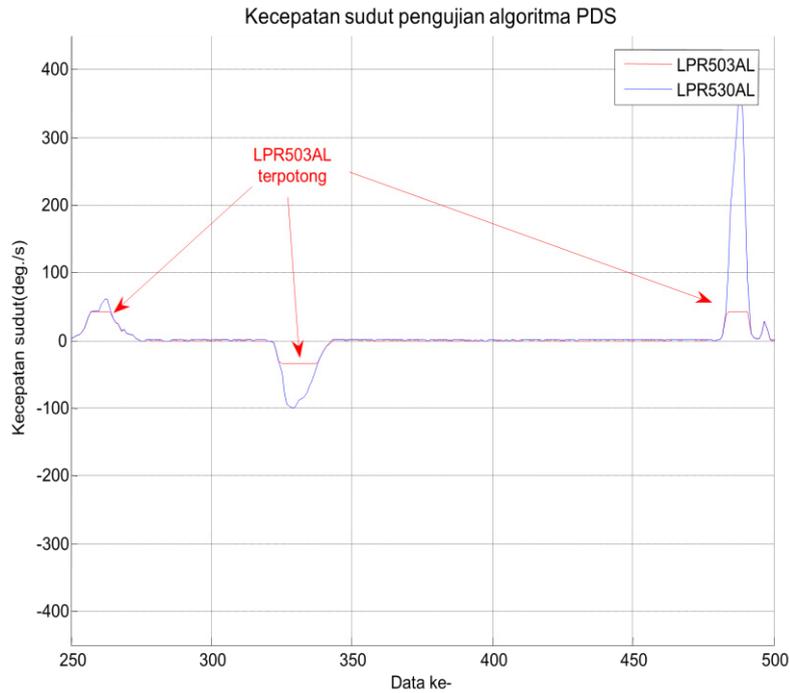
Gambar 3-4 Data percepatan dengan algoritma PDS.

Algoritma PDS memilih data dari sensor MMA7361L 1,5 g pada saat data percepatan berada di antara -1,5 g dan 1,5 g. Ketika kedua sensor dapat mendeteksi percepatan yang berada di antara -1,5 g dan 1,5 g, algoritma PDS memilih data dari sensor yang mempunyai sensitivitas lebih tinggi. Pada saat data percepatan lebih besar atau sama dengan 1,5 g atau data percepatan lebih kecil atau sama dengan -1,5 g, algoritma PDS mengambil data percepatan dari sensor MMA7361L 6 g. Dari gambar 3-4 terlihat bahwa jika percepatan kendaraan melebihi 1,5 g atau terjadi perlambatan kurang dari -1,5 g, maka sensor IMU masih dapat mendeteksi percepatan tersebut.

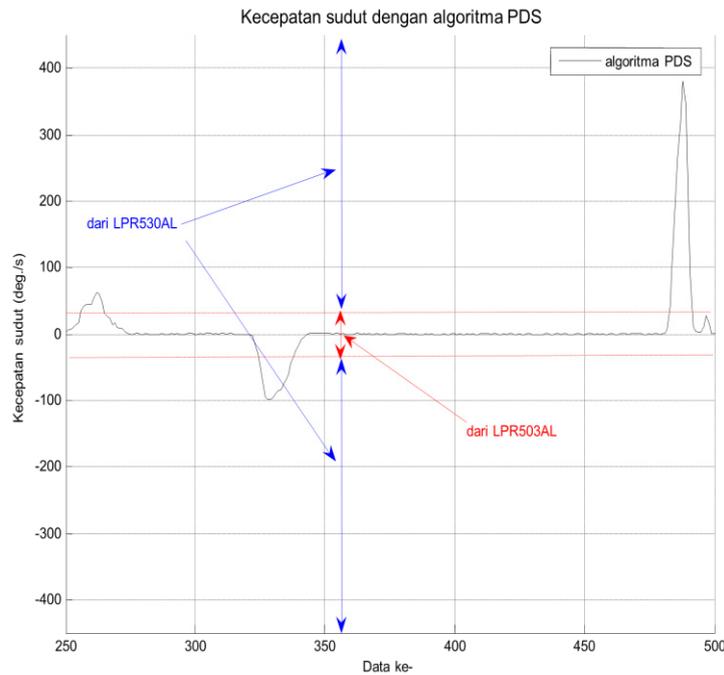
Pengujian algoritma PDS dengan kecepatan sudut tertentu dilakukan terhadap sensor LPR503AL dan LPR530AL. Pengujian dilakukan dengan memutar sensor IMU searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam dengan kecepatan sudut yang berubah-ubah, sehingga sensor LPR503AL mencapai batas minimum dan batas maksimum. Gambar 3-5 memperlihatkan data kecepatan sudut dari ketiga giroskop saat diberi kecepatan sudut tertentu. Pada gambar 3-5 terlihat bahwa pada kecepatan

sudut tertentu, sensor LPR503AL telah terpotong, sedangkan sensor LPR530AL masih dapat mendeteksi nilai kecepatan sudut yang diberikan.

Hasil pemilihan data kecepatan sudut dari gambar 3-5 dengan menggunakan algoritma PDS diperlihatkan pada gambar 3-6. Pada saat kecepatan sudut di antara $-30^{\circ}/s$ dan $30^{\circ}/s$, data kecepatan sudut diambil dari sensor LPR503AL. Pada saat kecepatan sudut lebih kecil atau sama dengan $-30^{\circ}/s$, atau lebih besar atau sama dengan $30^{\circ}/s$, data kecepatan sudut diambil dari sensor LPR530AL. Batas kecepatan sudut maksimum sensor LPR503AL adalah $41,31^{\circ}/s$, sedangkan batas kecepatan sudut minimum sensor LPR503AL adalah $-33,91^{\circ}/s$.



Gambar 3-5 Kecepatan sudut pada pengujian algoritma PDS.



Gambar 3-6 Data kecepatan sudut dengan algoritma PDS.

Selanjutnya, IMU dites dengan menggunakan simulator pergerakan 3 sumbu *ST-3176-TC-10*, seperti terlihat pada gambar 3-7 berikut.



Gambar 3-7 Simulator pergerakan 3 sumbu *ST-3176-TC-10*.

Simulator *ST-3176-TC-10* merupakan simulator gerak dengan 3 derajat kebebasan pada 3 sumbu yang digunakan untuk kalibrasi sensor. Ketiga sumbu tersebut adalah sumbu bagian dalam (*inner axis*), sumbu menengah (*middle axis*), dan sumbu bagian luar (*outer axis*). Sumbu bagian dalam berupa meja yang berbentuk lingkaran dengan diameter 650 mm. Di sisi bagian luar dari meja tersebut terdapat 4 konektor yang dapat digunakan untuk menghubungkan sensor IMU yang akan diuji dengan peralatan luar yang digunakan untuk memonitor. Simulator *ST-3176-TC-10* mempunyai akurasi yang tinggi dalam menentukan sudut dan kecepatan sudut. Simulator ini dirancang untuk digunakan dalam melakukan pengujian atau kalibrasi suatu sistem inersia dengan kinerja tinggi. Tiga parameter utama yang diatur dalam penggunaan simulator ini adalah sudut, kecepatan sudut, dan percepatan sudut. IMU yang sudah dites menunjukkan, bahwa metoda yang diajukan memberikan data laju dan kecepatan angular dengan sensitivitas yang lebih tinggi.

4. KESIMPULAN

Multisensor IMU untuk roket kendali terdiri atas 2 unit akselerometer pada masing-masing sumbu dan 3 unit giroskop pada sumbu x, serta 2 unit akselerometer dan 2 unit giroskop pada sumbu y dan z. Pemilihan data sensor dilakukan dengan algoritma PDS yang memberikan prioritas pada sensor dengan sensitivitas yang lebih tinggi. Semua sensor percepatan dan sensor kecepatan sudut harus dikalibrasi sebelum digunakan. Setiap sensor mempunyai nilai offset dan sensitivitas yang berbeda-beda, meskipun sensor tersebut mempunyai tipe yang sama. Kalibrasi giroskop dilakukan dengan

membandingkan kecepatan sudut dari simulator, sedangkan kalibrasi akselerometer dibandingkan dengan percepatan gravitasi bumi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Saya ucapkan terimakasih kepada Pustekroket yang telah memberikan fasilitas pada penelitian ini dan Dr. Wahyudi dari UNDIP atas fasilitas dan bantuan diskusi analisis data. Juga tak lupa saya ucapkan terimakasih kepada teman-teman semua, teman-teman peneliti dan dosen atas bantuan dan motivasinya.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi menjadi tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) Walchko, K.J., “*Embedded Low Cost Inertial Navigation System*”, Florida Conference on Recent Advances in Robotics, FAU, Dania Beach. 2003.
- 2) Chen, Tsung-Lin., “*Design and Analysis of Fault-Tolerant Coplanar Gyro-Free Inertial Measurement Unit*”, Department of Mechanical Engineering, National Chiao Tung University, Journal of Microelectromechanical System IEEE Xplore. 2008.
- 3) Shu-zhi, Mu., Xiong-zhu, Bu., Yong-xin, Li., “*Optimization Design and Calibration of Installation Error Coefficients for Gyroscope-Free Strapdown Inertial Measurement Unit*”, School of Mechanical Engineering, Najing University, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2006.
- 4) Batista, Pedro, Carlos Silvestre, Paulo Oliveira, and Bruno Carneira, “*Accelerometer Calibration and Dynamic Bias and Gravity Estimation: Analysis, Design, and Experimental Evaluation*”, IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 19, No. 5, 2011. pp. 1128 - 1137.
- 5) Elkaim, G.H., M. Lizzaraga, “*Comparison of Low-cost GPS/INS for Autonomus Vehicle Application*, IEEE. 2008.
- 6) Jiang, Z., Jianda Han, Yuechao Wang, Qi Song, “*Enhanced LQR Control for Unmanned Helicopter in Hover*”, Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 6. 2006. pp.-1443.
- 7) Kapaldo, Aaron J, “*Gyroscope Calibration and Dead Reckoning for an Autonomous Underwater Vehicle*”, Masters Thesis Virginia Polytechnic. 2005.
- 8) Zunaidi, I., Norihiko Kato, Yoshihiko Nomura, Hirokazu Matsui, , “*Positioning System for 4-wheel Mobile Robot: Encodebr, Gyro and Accelerometer Data Fusion with Error Model Method*”, CMU Journal, Vol.5, No.1, 2006. pp 1-14.
- 9) Ghassemi, Farhad, Shahram Tafazoli, Peter D. Lawrence, and Keyvan Hashtrudi-Zaad, “*Design and Calibration of an Integration-Free Accelerometer-Based Joint-Angle Sensor*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 57, No. 1, 2008. pp. 150 – 159.
- 10) Bekkeng, Jan K., “*Calibration of Novel MEMS Inertian Reference Unit*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 6, 2009. pp. 1967 – 1974.
- 11) Gamble, Allan E. and Jenkins, Philip N., “*Low Cost Guidance for the Multiple Launch Rocket System (MLRS) Atillery Rocket*”, US Army Aviation and Missile Command, IEEE AES Systems. 2001.
- 12) Kang, Chunpeng, Zhing Su, ”*Design of Data Acquisition and Processing System for IMU*” International Symposium on Intelligent Technology Application Workshop, IEEE Computer Society. 2008.
- 13) Wahyudi^a, Adhi Susanto, Sasongko Pramono Hadi, Wahyu Widada, ”*Design and Application of The Exponential Filter on Ratation Estimation Using The Anguler Rate Sensor (Gyroscope)*”, The 3rd Asian Physics Symposium (APS 2009), ISBN : 978-979-98010-5-0, Department of Physics, Institut Teknologi Bandung. 2009.
- 14) Siouris, Gerge M., “*Missile Guidance and Control System*” Springer-verlag New York. 2004.