

PENGARUH PELETAKKAN IMU TIDAK PADA COG TERHADAP PERILAKU TERBANG

Effendi Dodi Arisandi
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Pos El : edaslpn@yahoo.com

Abstrak

Setiap wahana terbang mempunyai titik pusat gravitasi (cog) yang sangat penting untuk analisis visualisasi wahana terbang tersebut secara 3D. Proses penentuan titik cog pada wahana terbang dapat dilakukan secara sederhana dengan melakukan penimbangan pada ujung-ujung wahana tersebut, selanjutnya dicari titik kesetimbangannya. Untuk dapat mengetahui perilaku (attitude) wahana terbang pada saat di udara, maka diperlukan informasi gerak translasi dan sudut yang akurat. Informasi gerak translasi dan sudut tersebut dapat diperoleh dari sistem IMU (inertial measurement unit). Penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh peletakkan sensor IMU tidak pada titik COG terhadap perilaku terbang. Dalam percobaan ini menggunakan pendulum sebagai pengganti wahana terbang dan IMU diletakkan pada sisi tepi dari pendulum, sehingga didapatkan persamaan matematis konversi dari titik acuan IMU ke titik acuan pendulum (wahana terbang).

Kata kunci: titik koordinat IMU, titik cog, IMU, pendulum, MEMs.

Abstract

Each air vehicle has point center of gravity (cog) which is very important for analysis visualization that air vehicle in 3D. The process of determination point cog at air vehicle can be done as simple with count the weight of lower and upper ends from that air vehicle, then looking for the balance point. For getting the attitude of the air vehicle in the air, it needed the information of the linear translation and the angle accurately. The information of linear translation and angle can be gotten from the IMU (inertial measurement unit) system. This research is to know the affect of the putting IMU sensor that is not in COG to the flying attitude. In this experiment used the pendulum as air vehicle and the IMU is putted on the edge of the turning table, thus got the mathematic formula for the conversion from IMU frame to pendulum frame (air vehicle).

Keywords: IMU frame, cog, pendulum.

1. PENDAHULUAN

Wahana terbang adalah suatu wahana yang dapat terbang di udara, seperti pesawat, roket, UAV, burung dan lain sebagainya. Pada saat wahana terbang tersebut mengudara maka diperlukan suatu informasi yang lengkap tentang perilaku wahana tersebut. Burung adalah wahana terbang yang merupakan makhluk hidup sehingga dia bisa merasakan atau mengontrol perilakunya sendiri selama terbang di udara. Sedangkan wahana terbang selain makhluk hidup seperti UAV atau roket yang dikontrol dari jarak jauh atau secara otomatis, maka informasi perilakunya selama terbang sangat diperlukan untuk analisa peningkatan performa wahana tersebut.

Setiap wahana terbang mempunyai titik pusat gravitasi. Titik pusat gravitasi tersebut dapat berguna untuk mengetahui kestabilan pada suatu wahana selama terbangnya. Pada pembuatan suatu wahana terbang seperti UAV atau roket kadang terkendala pada penempatan sistem elektroniknya, karena keterbatasan tempat atau yang lainnya. Sistem elektronika tersebut adalah sebuah sistem yang dapat memberikan informasi perilaku dari wahana tersebut. Sistem elektronika tersebut dapat berupa IMU (inertial measurement unit) atau INS (*inertial navigation system*). Perilaku wahana terbang dapat digambarkan oleh beberapa macam sensor yang ada pada IMU atau INS seperti sensor accelerometer, gyroscope, dan magnetometer.

Sensor accelerometer adalah sebuah sensor yang dapat mengukur percepatan yang berdasarkan pada percepatan gravitasi bumi. Sensor gyroscope adalah sebuah sensor yang dapat mengukur kecepatan sudut. Sensor magnetometer adalah sensor yang dapat mengetahui arah medan magnet bumi, sehingga sensor ini dapat sebagai referensi untuk menentukan arah mata angin. Untuk mendapatkan informasi jarak dari satu titik ke titik lain pada wahana terbang, maka dapat diperoleh dengan melakukan integral

2 kali dari keluaran data sensor accelerometer. Dengan mengintegrasikan satu kali pada sensor gyroscope maka akan diperoleh informasi besaran sudut yang sedang terjadi.

Penempatan IMU/INS seharusnya pada titik cog pada suatu wahana terbang, sehingga memudahkan untuk menganalisa data tersebut. Manfaat yang lain dengan penempatan IMU/INS pada titik cog adalah memudahkan dalam pembuatan *software* visualisasi pada wahana tersebut berdasarkan data dari IMU/INS. Dikarenakan penempatan sistim IMU/INS yang tidak tepat pada titik cog dari suatu wahana terbang, maka diperlukan konversi titik acuan dari sistim IMU/INS ke titik acuan cog. Adapun metode dalam penelitian ini adalah menggunakan sensor *low cost* IMU yang ditempatkan pada suatu pendulum. Pendulum ini adalah sebagai pengganti dari suatu wahana terbang. Pendulum dapat dikondisikan sebagai pitch, yaw, atau roll dengan cara merubah posisi pendulum atau sensornya. Paper ini terdiri dari beberapa bagian: bagian pertama tentang pendahuluan, bagian kedua tentang proses penentuan titik acuan koordinat, bagian ketiga tentang hasil percobaan dan diskusi, bagian keempat tentang kesimpulan dan saran.

2. PENENTUAN TITIK ACUAN KOORDINAT

Titik acuan koordinat pada setiap objek sangat diperlukan untuk diketahui, titik acuan koordinat tersebut bisa berada dimana saja berdasarkan keperluan. Titik acuan koordinat pada sensor IMU berada pada posisi tengah-tengah secara 3D dari modulnya, sedangkan titik acuan koordinat pada wahana terbang pada titik cog-nya.

2.1 Sensor IMU

Inertial measurement unit (IMU) adalah suatu sistem elektronika yang terdiri dari gabungan beberapa macam sensor yang pada umumnya dalam satu board. Sensor-sensor tersebut antara lain accelerometer, gyrocope, dan magnetometer.

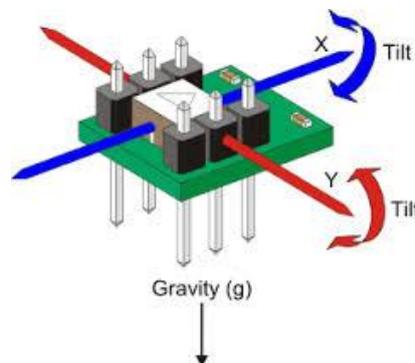
2.1.1 Sensor Accelerometer

Sensor accelerometer adalah sebuah sensor yang dapat mengukur percepatan gravitasi bumi. Percepatan gravitasi bumi adalah 9.8m/s^2 setara dengan 1g pada satuan sensor accelerometer. Perkembangan teknologi ilmu bahan yang berkembang cukup pesat sehingga dapat membuat sensor accelerometer sekecil mungkin yang sering disebut dengan MEMS [8]. Gambar 2-1 salah satu contoh sensor accelerometer yang telah memanfaatkan teknologi MEMS. Sensor accelerometer dapat dibuat dalam 1 chip untuk sumbu axis x, y, dan z. Nilai keluaran dalam satuan g dari masing-masing sumbu aksis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1. Ada beberapa hal yang harus diperhatikan pada sensor accelerometer, yaitu nilai sensitivitas, nilai threshold (*zero-g voltage*) [2].

$$R_x = (A_{dc_R_x} * V_{ref} / (2^{bit_adc} - 1) - V_{zero_R_x_g}) / sensitivity$$

$$R_y = (A_{dc_R_y} * V_{ref} / (2^{bit_adc} - 1) - V_{zero_R_y_g}) / sensitivity \quad (1)$$

$$R_z = (A_{dc_R_z} * V_{ref} / (2^{bit_adc} - 1) - V_{zero_R_z_g}) / sensitivity$$



Gambar 2-1 Sensor Accelerometer [1]

2.1.2 Sensor Gyroscope

Sensor gyroscope adalah sebuah sensor yang dapat mengukur kecepatan sudut, dimana kecepatan sudut adalah persatuan waktu [9]. Sama halnya dengan sensor accelerometer, bahwa sensor gyroscope pada saat ini sudah dapat dibuat dalam satu chip untuk tiga sumbu aksis, x, y, dan z. Ada 3 macam arah rotasi yang berdasarkan sumbu aksis tersebut, yaitu yaw dengan titik acuan sumbu z, pitch dengan titik acuan sumbu y, dan roll dengan titik acuan sumbu x. Gambar 2-2 adalah salah satu contoh sensor gyroscope 3 aksis. Nilai keluaran masing-masing pada sensor gyroscope dapat dihitung dengan persamaan 2[6].

$$\begin{aligned} \text{Rate}G_x &= (\text{AdcGyro}_x * V_{\text{ref}} / (2^n - 1) - V_{\text{zeroRate}}) / \text{Sensitivity} \\ \text{Rate}G_y &= (\text{AdcGyro}_y * V_{\text{ref}} / (2^n - 1) - V_{\text{zeroRate}}) / \text{Sensitivity} \quad (2) \\ \text{Rate}G_z &= (\text{AdcGyro}_z * V_{\text{ref}} / (2^n - 1) - V_{\text{zeroRate}}) / \text{Sensitivity} \end{aligned}$$



Gambar 2-2 Sensor Gyroscope

2.1.3 Sensor Magnetometer

Sensor magnetometer adalah sebuah sensor yang dapat mengukur medan magnet bumi. Sensor magnetometer dapat digunakan untuk menentukan arah mata angin, utara, selatan, barat, dan timur. Sensor magnetometer sangat membantu sistem IMU pada posisi heading. Gambar 2-3. adalah salah satu contoh sensor magnetometer 3 aksis.



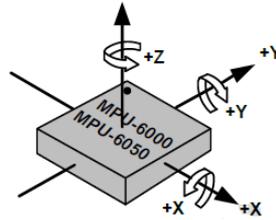
Gambar 2-3 Sensor Magnetometer

2.2 Imu Frame

Penyusunan sensor IMU pada bidang 3 dimensi, dimana masing-masing sensor mewakili ketiga sumbu koordinat x, y, dan z. Sumbu x mewakili arah terbang wahana untuk sensor accelerometer, sumbu y mewakili horizontal bumi, dan sumbu z mewakili wahana terbang terhadap bumi yang akan bernilai negative jika menuju ke arah bumi atau positif jika menjauhi bumi. Untuk mempermudah mengingat arah sumbu x, y, z tersebut, maka dapat menggunakan aturan tangan kanan. Pada aturan tangan kanan, jari telunjuk merupakan arah terbang wahana (secara umum arah utara) atau sumbu x, ibu jari searah dengan bumi (secara umum arah timur) atau sumbu y, dan jari tengah menjauhi atau menuju bumi yang mewakili sumbu z.

Sensor gyroscope juga disusun secara tegak lurus pada masing-masing sumbu koordinat x, y, dan z. Sumbu x gyroscope merupakan titik referensi gerak roll, sumbu y-gyroscope merupakan referensi gerak pitch, dan sumbu z-gyroscope merupakan referensi untuk gerak yaw. Gambar 2-4 adalah sumbu

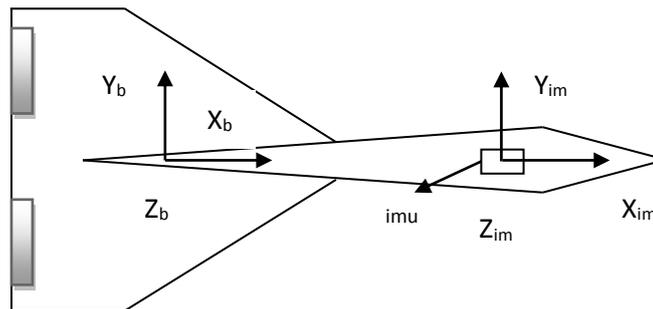
koordinat pada IMU frame, dimana sensor IMU tersebut merupakan *low cost* IMU dengan seri MPU6050 yang terdiri dari 3 aksis sensor accelerometer dan 3 aksis sensor gyroscope.



Gambar 2-4 Titik Acuan Koordinat IMU [10]

2.3 Body Frame

Cog (center of gravity) adalah pusat gravitasi pada setiap benda. Informasi letak cog sangat penting pada wahana terbang seperti roket, UAV, pesawat, dan sebagainya. Cog dapat digunakan sebagai salah satu parameter perancangan wahana terbang terutama pada roket, karena bahan bakar roket cepat habis terbakar dalam hitungan beberapa detik saja. Oleh karena itu letak cog roket akan berubah mengikuti perubahan massa total pada roket. Secara ideal penempatan sensor IMU (inertial measurement unit) sangat menguntungkan jika bisa tepat pada titik cog-nya, karena memudahkan perhitungan dan analisa perilaku wahana selama terbang. Hal ini sangat sulit dilakukan terutama pada ukuran wahana terbang yang cukup kecil seperti pada roket diameter 10cm. Sehingga diperlukan fungsi transfer dari koordinat IMU ke koordinat wahana terbang untuk mendapatkan informasi yang akurat tentang perilaku suatu wahana selama wahana tersebut terbang. Gambar 2-5 adalah salah satu contoh titik koordinat wahana terbang (*body frame*) pada roket.

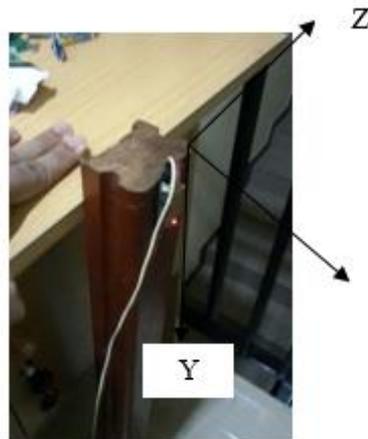


Gambar 2-5 Translasi dan Rotasi dari Kerangka IMU ke Kerangka Badan Wahana

3. HASIL PERCOBAAN DAN DISKUSI

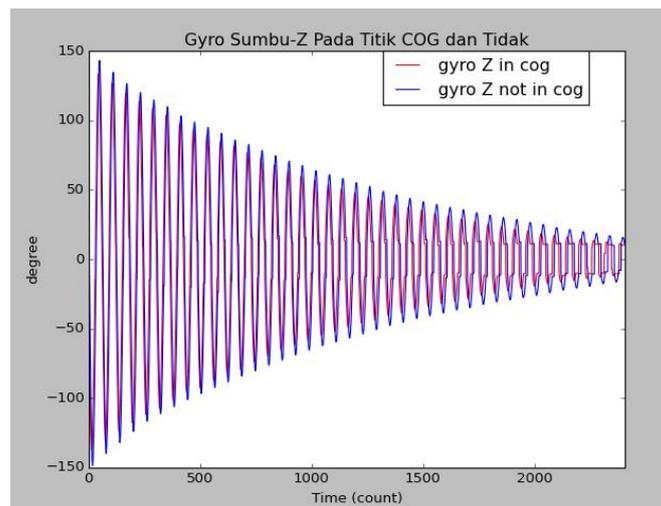
Pada percobaan ini untuk mendapatkan titik cog pada wahana terbang belum dapat dilakukan karena keterbatasan sarana dan prasarannya, maka wahana tersebut diganti dengan pendulum tanpa memperhatikan gaya gesek yang terjadi. Titik cog pada pendulum sangat mudah untuk diketahui, yaitu pada titik porosnya. Gambar 3-1 adalah titik cog pendulum. Pendulum tersebut dapat digerakkan mulai dari sudut yang diinginkan. Proses pengambilan data dilakukan dengan 2 cara, yaitu cara pertama adalah meletakkan sensor IMU pada titik cog pendulum, proses pengambilan data yang kedua adalah meletakkan sensor IMU pada jarak 20cm dari titik cog pendulum. Pengambilan data accelerometer dan gyroscope juga dilakukan pada kedua titik tersebut. Untuk data gyroscope, pendulum digerakkan mulai dari sudut 150° , data accelerometer juga diambil dengan cara menggerakkan pendulum dimulai pada sudut 45° . Gambar 3-2 merupakan pengambilan data untuk sensor gyroscope pada titik cog dan pada jarak 20cm, dari grafik tersebut didapatkan bahwa sensor gyroscope tidak terpengaruh oleh letak posisinya pada wahana terbang. Hal ini dikarenakan bahwa sensor gyroscope mengukur kecepatan sudut. Ada sedikit perbedaan nilai dari grafik antara sudut di cog dan tidak dititik cog pada Gambar 3-

2, hal ini disebabkan karena hanya perbedaan pada awal pendulum digerakkan, tetapi grafik tersebut mempunyai pola yang sama secara umum.



Gambar 3-1 Gyroscope Pada Titik Cog

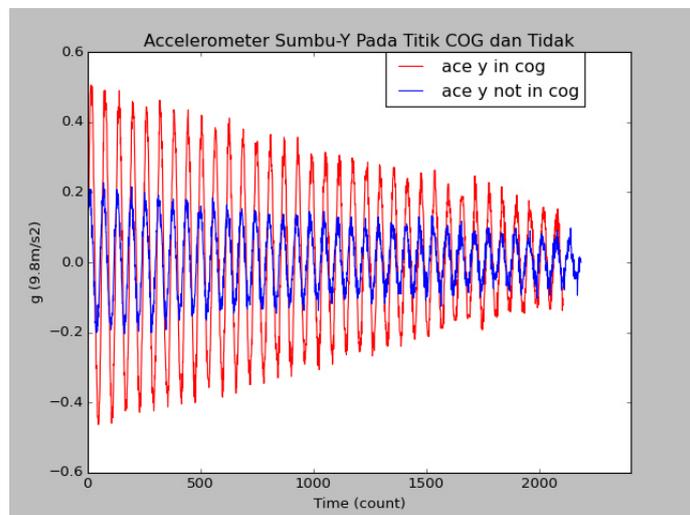
Hasil pengambilan data accelerometer pada titik cog dan jarak 20cm dari titik cog dapat dilihat pada Gambar 3-3. Pada tabel tersebut dapat diperhatikan bahwa posisi diam pada nol derajat data pada accelerometer di titik cog dan jarak 20cm adalah sama. Sedangkan pada sudut 45 derajat maupun minus 45 derajat dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan. Hal ini karena posisi IMU tidak sama antara di titik cog dan 20 cm. oleh karena itu diperlukan konversi dari titik posisi sensor ke cog.



Gambar 3-2 Data Gyroscope Sumbu-Y Pada COG dan 20cm dari COG

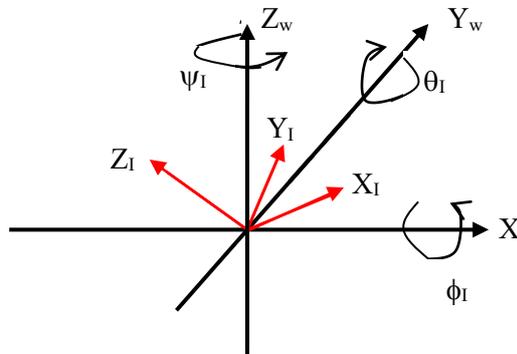


Gambar 3-3 Posisi IMU tidak Pada Titik COG



Gambar 3-3 Data Accelerometer Sumbu-Y Pada COG dan 20cm dari COG

Low cost IMU MPU-6050 terdiri dari 3 aksis sensor accelerometer dan 3 aksis sensor gyroscope [7], a_I adalah percepatan pada IMU dan ω_I kecepatan sudut pada IMU untuk semua sumbu koordinat X_I, Y_I, Z_I seperti pada Gambar 3-4. Notasi I merujuk pada sumbu koordinat IMU, jika variable tidak disertai dengan tanda I maka merujuk pada koordinat wahana. Secara umum ketergantungan pada bagaimana IMU diletakkan pada wahana, sumbu koordinat rotasi IMU relatif terhadap sumbu wahana (ϕ_I, θ_I, ψ_I) sebagaimana dijelaskan pada Gambar 3-4.



Gambar 3-4 Sudut Rotasi Kerangka IMU Terhadap Kerangka Koordinat Wahana

Berdasarkan pada Gambar 2-5 bahwa gerakan rotasi dan translasi IMU akan relatif terhadap koordinat wahana. Percepatan yang spesifik pada koordinat wahana dijelaskan oleh [3] dan [4]:

$$a_R = \omega_b \times (\omega_b \times R) \quad (2)$$

$$a_T = \alpha_b \times R \quad (3)$$

Dimana x adalah vektor cross product, $R = [R_x \ R_y \ R_z]^T$ adalah jarak dari koordinat *body* ke koordinat IMU (pusat meja putar ke titik 20cm pada penelitian ini), $\omega_w = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ adalah kecepatan sudut dari koordinat wahana dan $\alpha_w = [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z]^T$ adalah percepatan angular dari kerangka wahana. Hubungan antara beberapa macam percepatan adalah [11]:

$$a_w + a_R + a_T + a_g = K_a \cdot a_I \quad (4)$$

$$a_I = \tilde{a}_I - a_{I,n} - a_{I,o} \quad (5)$$

Dimana a_I adalah data hasil pengukuran percepatan dari IMU termasuk noise $a_{I,n}$ dan bias $a_{I,o}$ pada kerangka IMU, $K_a \in \mathbb{R}^3$ adalah penguatan dan matrik *cross correlation*, a_w adalah percepatan translasi dari kerangka wahana, a_g adalah vektor gravitasi pada kerangka wahana. Secara ideal, matrik K_a adalah matrik murni gerak rotasi [5] dihasilkan dari tiga sudut ϕ , θ , dan ψ . Koordinat IMU X_I , Y_I , Z_I mempunyai sumbu yang tidak tertata lurus, atau skala dari salah satu sumbu adalah perbedaan dari pada lainnya K_a tidak akan lama menjadi tepat matrix rasional [11].

Sensor gyroscope IMU mengukur kecepatan sudut ω_I , yang tidak terpengaruh oleh lokasi IMU relative ke cog, hanya orientasi saja yang di diberikan oleh ϕ , θ , dan ψ :

$$\omega_w = K_\omega \cdot \omega_I \quad (6)$$

$$\omega_I = \tilde{\omega}_I - \omega_{I,o} - \omega_{I,n} \quad (7)$$

Dimana K_ω adalah penguatan dari matrik cross correlation, ω_w adalah kecepatan sudut pada kerangka wahana, $\omega_{I,n}$ adalah noise dari gyroscope, $\omega_{I,o}$ adalah bias gyroscope dan $\tilde{\omega}_I$ adalah nilai gyroscope termasuk noise dan bias [11]. Penjelasan dari persamaan 2 sampai 7 dikutip dari paper dengan judul "Calibration Procedure for an Inertial Measurement Unit Using a 6-Degree-of-Freedom Hexapod" [11].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Setiap wahana terbang mempunyai titik cog yang harus diketahui dan diperhatikan untuk mengetahui kestabilan wahana tersebut selama terbang. Tulisan ini telah membahas tentang konversi dari kerangka IMU ke kerangka wahana. Penempatan sensor IMU pada titik cog pada suatu wahana secara umum sulit untuk dilakukan. Oleh karena itu diperlukan suatu konversi dari perhitungan IMU ke perhitungan koordinat wahana. Sensor accelerometer sangat terpengaruh perhitungannya berdasarkan lokasi penempatannya terhadap titik cog. Sedangkan sensor gyroscope tidak terpengaruh oleh peletakan sensor tersebut pada wahana karena sensor ini mengukur kecepatan sudut. Manfaat dari penempatan sensor IMU pada titik cog adalah untuk mempermudah perhitungan secara matematis. Analisa visualisasi secara 3D dapat dilakukan dengan benar jika kerangka IMU sudah dikonversikan ke kerangka cog.

Penelitian ini dapat dikembangkan dengan meletakkan sensor IMU pada wahana terbang yang sesungguhnya dan dilakukan pengujian dengan alat yang dapat menggerakkan wahana tersebut pada sumbu x, y, dan z.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih kepada pusat teknologi roket (PUSTEKROKET) LAPAN khususnya bidang kendali dan telemetri yang telah menyediakan fasilitas sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) <http://learn.parallax.com/KickStart/28017>. Diakses mei 2015
- 2) <http://www.instructables.com/id/Accelerometer-Gyro-Tutorial/step1/The-Accelerometer/>. Diakses april 2015.
- 3) M.D Ardema, “*Newton-Euler Dynamics*”, Springer, 2005.
- 4) A.A Shabana, “*Dynamics of Multibody Systems*”, 2nd ed. Cambridge University Press, 1998.
- 5) R.W Beard and T.W McLain, ”*Small Unmanned Aircraft Theory and Pratuce*”, Princeton Univeristy Press, 2012.
- 6) <http://www.starlino.com/store/acc-gyro>. Diakses april 2015
- 7) https://www.olimex.com/Products/Modules/Sensors/MOD-MPU6050/resources/RM-MPU-60xxA_rev_4.pdf. Diakses maret 2015
- 8) Jared B. Bancroft, “*Multiple Inertial Measurement Unit Integration for Pedestrian Navigation*”, Thesis, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, December 2010.
- 9) Lei Wang, Fei Wang, “*Intelligent Calibration Method of Low Cost MEMS Inertial Measurement Unit for an FPGS-based Navigation System*”, International Journal of Intelligent Engineering and Systems, Vol.4, No.2, 2011.
- 10) http://areacom.altervista.org/Arduino_MPU-6050_GY-521_:_giroscopio_e_accelerometro/page/116. Diakses mei 2015
- 11) Øyvind Magnussen, Morten Ottestad and Geir Hovland, “*Calibration Procedure for an Inertial Measurement Unit Using a 6-Degree-of-Freedom Hexapod*”, Faculty of Engineering and Science, Department of Engineering, University of Agder.