

SISTEM STABILISATOR *SHOOTING POINT* KAMERA PADA GIMBAL 3 AXIS DENGAN METODE FUZZY

Alfrian Dwi Vamiko ^{*)}, Aris Triwiyatno, and Budi Setyono

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

^{*)Email : Demangalfrian@yahoo.co.id}

Abstrak

Gimbal merupakan salah satu perangkat sinematografi yang digunakan untuk menjaga posisi kamera agar kamera dapat mengambil gambar dengan baik pada suatu sudut pandang tertentu. Pada tugas akhir ini, dibuat sebuah gimbal dengan sensor IMU untuk mengetahui sudut kemiringan gimbal, kendali fuzzy sebagai pengendali otomatis, dan tiga buah motor servo sebagai aktuator. Sensor IMU digunakan terdiri dari sebuah gyroscope 3 axis dan accelerometer 3 axis. Pengukuran kemiringan pada accelerometer menggunakan metode direct cosine matriks. Untuk meredam gangguan pada sensor, digunakan filter digital complementary filter dan filter moving average. Metode kendali yang ditanamkan pada sistem terdiri dari 3 sistem fuzzy dengan metode mamdani untuk menangani sudut pan dan tilt. Sudut tilt terdiri dari pitch dan roll. Aktuator dipasang pada 3 titik gimbal, titik-titik aktuator tersebut apabila ditarik garis lurus akan berpotongan pada sebuah titik dimana kamera akan diletakkan. Hasil pengukuran menunjukkan sistem cukup stabil dengan waktu respon 720 milidetik pada tilt, 580 milidetik pada roll, dan 440 milidetik pada pan. Filter digital yang digunakan dapat mengurangi gangguan pada sensor.

Kata Kunci : Gimbal, IMU, Fuzzy, Direct Cosine Matriks.

Abstract

Gimbals represent one of cinematography peripheral used to take care camera position so that camera can take picture better at one particular certain viewpoint. This final project, made a gimbals with IMU sensor to know inclination angle of gimbals, fuzzy controller as automatic controller, and three motor of servo as actuator. IMU sensor consist of a 3 axis gyroscope and 3 axis accelerometer. To measurement inclination angle of accelerometer, use direct matrix cosine method. To weaken sensor noise, used digital filter complementary filter and average moving filter. Control method which embed in system consist of 3 fuzzy control with mamdani method to handle error angle of pan and tilt. angle of Tilt consist of and pitch of roll. Aktuator attached by 3 points gimbals, that points of aktuator is pulled by straight line will be proportioned at a point where camera will be put down. The result of measurement show system stabilize enough with 720 milisecond time respon at tilt, 580 milisecond at roll, and 440 milidetik at pan. Digital Filter which used can lessen sensor error.

Keywords: Gimbal, IMU, Fuzzy, Direct Cosine Matriks.

1. Pendahuluan

Semakin majunya industri film membuat produser film berlomba-lomba dalam membuat film dengan kualitas terbaik, faktor penting yang menentukan kualitas film tersebut diantaranya kamera dan perangkat pendukungnya. Karena alasan tersebut teknologi kamera dan perangkat pendukungnya terus ditingkatkan. Perangkat pendukung yang sering digunakan saat pengambilan gambar adalah gimbal. Gimbal merupakan alat pengendali gerakan kamera yang dapat menggerakkan kamera pada sumbu x, y, dan z ^[1]. Salah

satu kegunaan dari gimbal adalah untuk mempertahankan sudut pandang kamera pada arah tertentu. Gimbal sangat cocok jika digunakan pada sistem yang umum dipakai pada kamera. Sistem kamera sering disebut dengan *Pan Tilt Zoom (PTZ)*. *Pan* merupakan pengendalian sumbu *yaw* kamera. *Tilt* merupakan pengendalian kemiringan kamera baik berupa sumbu *pitch* maupun *roll*. *Zoom* merupakan pengendalian perbesaran gambar pada kamera^[2]. Pada sistem PTZ, gimbal digunakan untuk menggerakkan kamera pada sudut *pitch*, *roll*, dan *yaw*, sehingga kamera dapat mempertahankan sudut pandang.

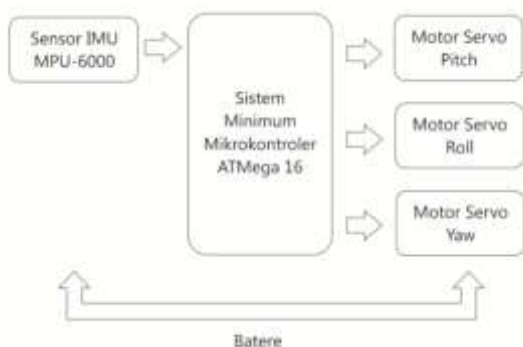
Ada dua macam cara pengambilan gambar dalam dunia sinematografi, yaitu *aerial* sinematografi yaitu kamera berada di udara, dan *on the ground* sinematografi yaitu kamera berada di darat. Pada *aerial* sinematografi, kamera bergerak dengan tiga derajat kebebasan untuk menstabilkan posisi, sedangkan pada *on the ground* sinematografi menggunakan dua derajat kebebasan.^[1]

Untuk mengetahui sudut pada gimbal dapat digunakan sensor *IMU* yang terdiri dari sebuah *accelerometer* dan *gyroscope*. Sensor *accelerometer* dapat mengukur sudut dengan baik saat diam, dan sensor *gyroscope* dapat mengukur sudut saat benda bergerak. Penggabungan data pengukuran dapat dilakukan dengan *complementary* filter. Dengan penggabungan dua sensor tersebut dimungkinkan untuk mengukur sudut gimbal saat gimbal diam atau sedang bergerak.^[3]

Gimbal menggunakan motor servo sebagai penggerak. Motor servo dipasang pada tiga titik gimbal, apabila titik tersebut ditarik garis lurus akan bersinggungan pada sebuah titik. Pada titik tersebut, kamera akan diletakkan^[4]. Untuk mengendalikan gimbal dibutuhkan metode kontrol yang dapat bekerja dengan baik. Metode kontrol yang dipilih adalah metode kontrol fuzzy. Dalam perancangannya, kontrol logika fuzzy didasarkan pada suatu model logika yang merepresentasikan proses berfikir seorang operator ketika sedang mengontrol suatu sistem. Di sini terjadi suatu pergeseran dari pemodelan sistem yang dikontrol menjadi pemodelan cara berfikir operator^[5]. Kontrol fuzzy akan ditanamkan pada mikrokontroler ATmega 16 buatan ATMEL dengan *compiler* Code Vision AVR.

2. Metode

2.1. Perancangan Perangkat Keras



Gambar 1 Diagram blok perancangan perangkat keras.

Perancangan perangkat keras meliputi perancangan sistem minimum mikrokontroler ATmega 16 dan perancangan gimbal yang terdiri dari sensor *IMU* dan motor servo. Diagram blok perancangan perangkat keras dapat dilihat

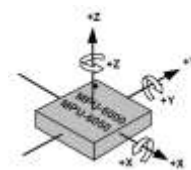
pada gambar 1. Bagian-bagian dari blok diagram sistem adalah sebagai berikut:

1. Sensor *IMU* MPU-6000 digunakan untuk mendapatkan informasi sudut gimbal.
2. Mikrokontroler ATmega 16 digunakan untuk memproses hasil pengukuran sensor *IMU* dengan kendali fuzzy dan memberikan sinyal kepada motor servo.
3. Webcam digunakan sebagai kamera yang dapat menampilkan hasil video dari objek yang direkam.
4. Motor servo *pitch* merupakan aktuator untuk menggerakkan gimbal pada sudut *pitch*.
5. Motor servo *roll* merupakan aktuator untuk menggerakkan gimbal pada sudut *roll*.
6. Motor servo *yaw* merupakan aktuator untuk menggerakkan gimbal pada sudut *yaw*.
7. Baterai merupakan catu daya untuk menyalakan sistem.

2.1.1. Modul Sensor IMU MPU-6000

Modul sensor yang digunakan pada sistem ini adalah sensor *IMU* MPU-6000. Sensor MPU merupakan sensor *IMU* 6 derajat kebebasan yang terdiri dari *accelerometer* 3 derajat kebebasan, *gyroscope* 3 derajat kebebasan dan sebuah prosesor gerakan digital (DMP). Modul ini menggunakan protokol I2C untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler. *Gyroscope* MPU-6000 dapat diprogram untuk bekerja pada skala 250, 500, 1000 dan 2000 %/detik, untuk *accelerometer* dapat diprogram pada skala 2g, 4g, 8g, dan 16g. Data dari sensor konversi DMP dengan 16 bit ADC.

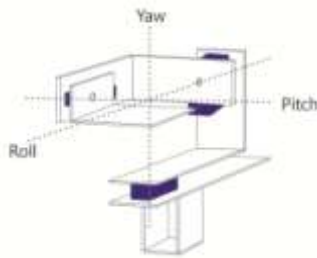
Tegangan yang dibutuhkan sensor untuk dapat bekerja adalah antara 2,375 hingga 3.46 volt. Sensor ini dapat digunakan pada percepatan dibawah 10.000 g.



Gambar 2 Orientasi sensor MPU-6000

2.1.2. Perancangan Gimbal

Gimbal digunakan untuk menggerakkan kamera. Gimbal memiliki tiga motor servo yang diletakkan pada tiga titik rotasi rangka yang terbuat dari akrilik sehingga gimbal dapat berotasi pada sumbu *pitch*, *roll* dan *yaw*. Motor servo yang digunakan pada gimbal adalah jenis mikro servo.



Gambar 3 Rancang bangun gimbal

2.2. Perancangan Perangkat Lunak

Perangkat lunak pada sistem digunakan untuk proses kontrol dengan membuat program yang akan ditanamkan pada mikrokontroler ATmega 16. Perancangan program digunakan *compiler* Code Vision AVR. Code Vision AVR merupakan *compiler* bahasa C yang merupakan bahasa tingkat tinggi, sehingga memudahkan pengguna dalam membuat program, akan tetapi penggunaan bahasa tingkat tinggi dalam pembuatan program memiliki kerugian yaitu ukuran program menjadi lebih besar karena semua register yang digunakan dan tidak digunakan, secara otomatis akan diinisialisasi oleh *compiler*.



Gambar 4 Flowchart perangkat lunak

2.2.1 Pengukuran Sudut Kemiringan

Nilai sudut kemiringan didapatkan dari data percepatan gravitasi dari setiap sumbunya. Nilai percepatan gravitasi dinormalisasi agar hasil pembacaan maksimalnya sesuai dengan besar percepatan gravitasi bumi (1g). Kemudian sudut kemiringan dihitung berdasarkan pada rumus *Direct Cosine Matrix*.

Rumus perhitungan normalisasi pembacaan gravitasi di tiap sumbu dapat dilihat pada persamaan 1.

$$|A| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$A_x = \frac{a_x}{|A|}$$

$$A_y = \frac{a_y}{|A|}$$

$$A_z = \frac{a_z}{|A|}$$

dimana,

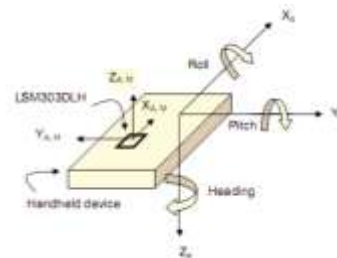
- |A| = Resultan percepatan gravitasi
- $a_{x,y,z}$ = Percepatan gravitasi axis X,Y,Z terukur
- $A_{x,y,z}$ = Percepatan gravitasi axis X,Y,Z ternormalisasi

Setelah pembacaan nilai percepatan gravitasi tiap sumbu dinormalisasi, perhitungan sudut kemiringan dilakukan dengan memanfaatkan *Direct Cosine Matrix* sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} X_b^i \\ Y_b^i \\ Z_b^i \end{bmatrix} = R_\gamma R_\rho R_\psi \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \rho \cos \psi & \cos \rho \sin \psi & -\sin \rho \\ \cos \psi \sin \rho \sin \gamma - \cos \gamma \sin \psi & \cos \gamma \cos \psi + \sin \rho \sin \gamma \sin \psi & \cos \rho \sin \gamma \\ \cos \psi \sin \rho \cos \gamma + \sin \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \cos \psi + \sin \rho \cos \gamma \sin \psi & \cos \rho \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} \dots\dots(2)$$

Pada posisi awal sensor sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5 Posisi Awal Sensor [6]

didapatkan nilai pembacaan awal *accelerometer* adalah $X_b = Y_b = 0, Z_b = +1g$.

Sehingga persamaan di atas akan menjadi persamaan 3.

$$\begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{y1} \\ A_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \rho \cos \psi & \cos \rho \sin \psi & -\sin \rho \\ \cos \psi \sin \rho \sin \gamma - \cos \gamma \sin \psi & \cos \gamma \cos \psi + \sin \rho \sin \gamma \sin \psi & \cos \rho \sin \gamma \\ \cos \psi \sin \rho \cos \gamma + \sin \gamma \sin \psi & -\sin \gamma \cos \psi + \sin \rho \cos \gamma \sin \psi & \cos \rho \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots(3)$$

Dengan demikian, sudut *pitch* dan *roll* dapat dihitung sebagai berikut:

$$Pitch = \rho = \arcsin(-Ax1) \dots\dots\dots(4)$$

$$Roll = \gamma = \arcsin(Ay1/\cos \rho) \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

Pitch = ρ = Sudut angguk (sudut antara axis X relatif terhadap badan alat)
Roll = φ = Sudut gulung (sudut antara axis Y relatif terhadap badan alat)

2.2.2. Program Mengakses Sensor IMU MPU-6000

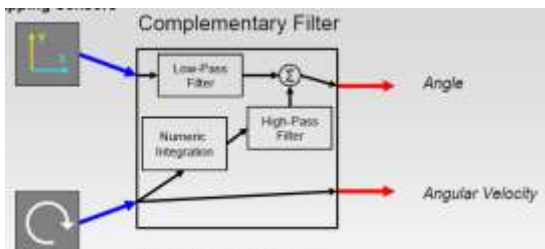
Sensor MPU-6000 memiliki chip DMP, chip ini digunakan untuk berkomunikasi dengan mikrokontroler. Protokol komunikasi yang digunakan DMP adalah protokol komunikasi I2C. Port yang digunakan dalam komunikasi diantaranya port SCL dan port SDA. Chip DMP akan memproses informasi dari sensor dengan ADC 16bit, kemudian informasi tersebut dikirim. Untuk mendapatkan informasi sudut dari *accelerometer*.

2.2.3. Filter Digital

Filter digital adalah semua filter elektronik yang bekerja dengan menerapkan operasi matematika digital atau algoritma pada suatu pemrosesan sinyal. Salah satu batasan utama pada filter digital adalah dalam hal keterbatasan kecepatan pemrosesan/waktu komputasi yang sangat tergantung dengan kemampuan komputer.^[13]

2.2.3.1. Complementary Filter

Accelerometer dapat memberikan pengukuran sudut kemiringan yang akurat ketika sistem sedang diam (statis). Bila sistem sedang bergerak, *accelerometer* tidak hanya dipengaruhi oleh gravitasi bumi tetapi dipengaruhi juga oleh pergerakan, sehingga dapat mengganggu pembacaan kemiringan sudut dan memiliki *noise*. *Gyroscope* dapat membaca data dari kecepatan sudut yang dinamis. Setelah integrasi data dari waktu ke waktu, perpindahan sudut atau sudut kemiringan dapat dihitung. Tetapi sudut ini akan menjadi tidak akurat dalam jangka panjang karena efek bias yang dihasilkan oleh *gyroscope*. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah filter digital yang dapat menghilangkan efek dari kekurangan sensor-sensor tersebut. Salah satunya adalah dengan menggunakan *complementary filter*.^[14]



Gambar 6 Blok diagram *complementary filter* ^[14]

$$Angle = a * (Angle + gyro * dt) + (1 - a) * (xacc) \dots \dots \dots (6)$$

2.2.3.2. Filter Moving Average

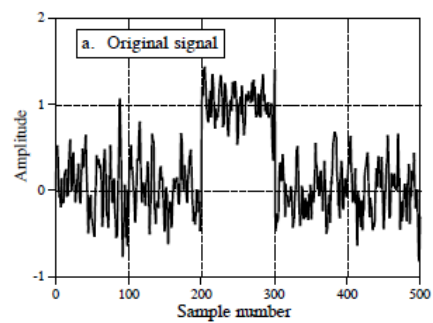
Filter *Moving average* merupakan filter yang paling umum dalam pengolahan sinyal digital, karena filter ini dinilai sebagai filter digital yang mudah dalam perancangan dan realisasinya. Walaupun sederhana, filter *moving average* dapat mengurangi gangguan acak dengan optimal.^[13]

Sesuai dengan namanya, filter ini bekerja dengan mengambil nilai rata-rata dari beberapa sampel sinyal yang berdekatan ^[15]. Hasil nilai rata-rata yang diperoleh kurang lebih adalah sinyal aslinya. Persamaan umum filter *moving average* ditunjukkan pada persamaan 7.

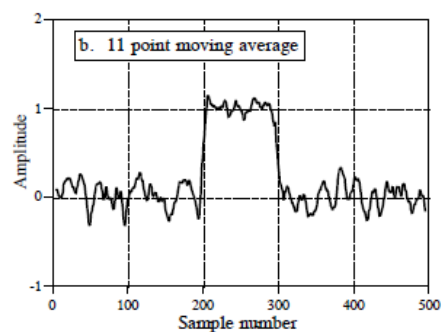
$$Y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \dots \dots \dots (7)$$

Dimana,

- x[] = sinyal masukan.
- y[] = sinyal keluaran.
- M = jumlah tundaan yang akan dirata-rata.



Gambar 7 Sinyal dengan gangguan acak ^[13]



Gambar 8 Sinyal dengan filter *moving average* 11 tundaan ^[13]

2.2.4. Program Kendali Fuzzy

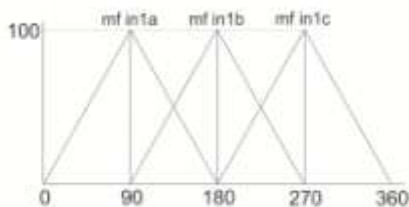
Perancangan Pengontrol Fuzzy bertujuan agar keluaran pengontrol seperti yang diinginkan sehingga diperoleh keluaran yang diharapkan. Dalam hal ini diinginkan

bahwa gangguan rotasi dapat diminimumkan. Dengan kata lain sinyal kontrol yang dihasilkan dari Pengontrol Fuzzy digunakan untuk meredam gangguan yang ada.

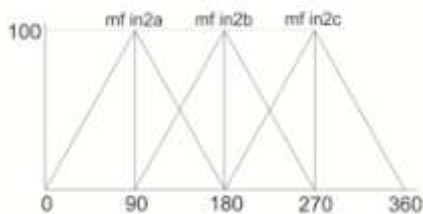
Sebelum membuat program, dilakukan simulasi dengan matlab untuk menentukan bentuk diagram fuzzy dan mengetahui nilai input dan output dari kendali fuzzy. Penentuan bentuk diagram kendali fuzzy menggunakan acuan cara kerja gimbale yang diinginkan, yaitu dapat menstabilkan posisi kamera dari gangguan rotasi. *Flow chart* Fuzzy seperti pada gambar 9.



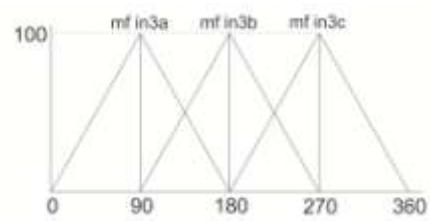
Gambar 9 *Flowchart* Fuzzy



Gambar 10 MF input sumbu X



Gambar 11 MF input sumbu Y

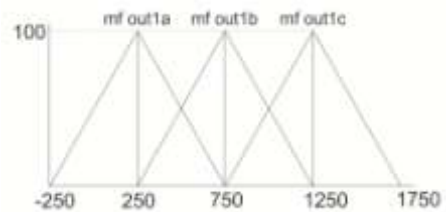


Gambar 12 MF input sumbu Z

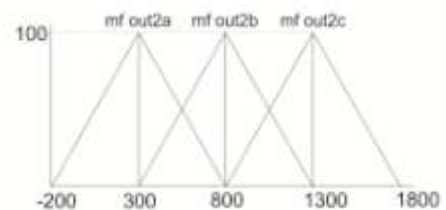
Langkah pertama, dilakukan fuzzyfikasi dengan tujuan mengubah nilai crisp masukan menjadi nilai fuzzy dengan himpunan seperti pada gambar 10, 11, dan 12. Setelah fuzzyfikasi, dilakukan proses *rule base* dengan aturan seperti pada tabel 1.

Tabel 1 Rule base

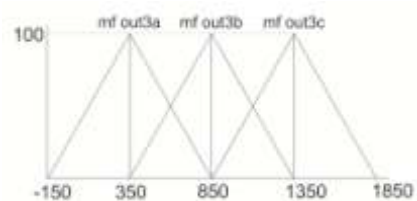
No.	Masukan	Keluaran
1	MF IN 1A	MF OUT 1C
2	MF IN 1B	MF OUT 1B
3	MF IN 1C	MF OUT 1A
4	MF IN 2A	MF OUT 2C
5	MF IN 2B	MF OUT 2B
6	MF IN 2C	MF OUT 2A
7	MF IN 3A	MF OUT 3C
8	MF IN 3B	MF OUT 3B
9	MF IN 3C	MF OUT 3A



Gambar 13 *Membership function out 1*



Gambar 14 *Membership function out 2*



Gambar 15 *Membership function out 3*

MF out yang digunakan, seperti pada gambar 13, 14, dan 15. Pada metode Mamdani, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antara aturan. Metode yang digunakan dalam melakukan inferensi, yaitu *max*, karena menggunakan implikasi min, maka metode komposisi ini sering disebut dengan nama *MAX-MIN*.

Setelah didapat nilai *fuzzy output*, dicari nilai *crisp* dengan metode *weighted average*, secara umum dirumuskan :

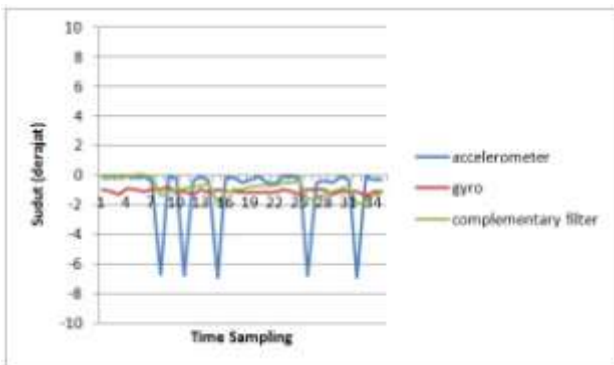
$$Z^* = \frac{\int_z zu(z)dz}{\int_z u(z)dz} \dots\dots\dots(8)$$

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^n zju(z_j)}{\sum_{j=1}^n u(z_j)} \dots\dots\dots(9)$$

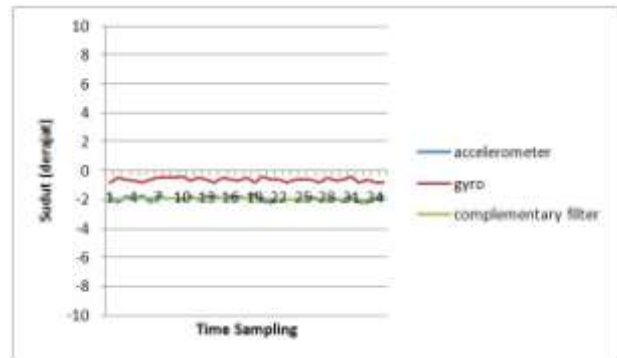
3. Pengujian dan Analisis

3.1. Pengujian sensor IMU

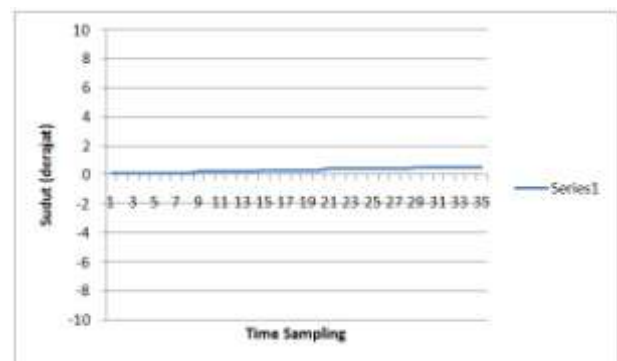
Pengujian sensor dilakukan untuk mendapatkan nilai sensor *IMU* yang terdiri dari *accelerometer* dan *gyroscope*. Pengujian pertama dilakukan pada saat sensor diam pada sudut x=0 derajat dan sudut y=0 derajat. Hasil pembacaan sumbu x pada sensor dapat dilihat pada gambar 16, sedangkan pembacaan sumbu y dapat dilihat pada gambar 17, dan pembacaan sumbu z dapat dilihat pada gambar 18.



Gambar 16 Pengukuran sensor sumbu x



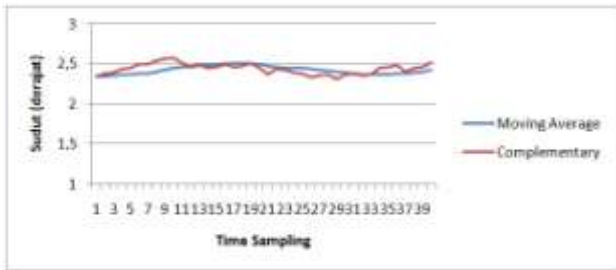
Gambar 17 Pengukuran sensor sumbu y



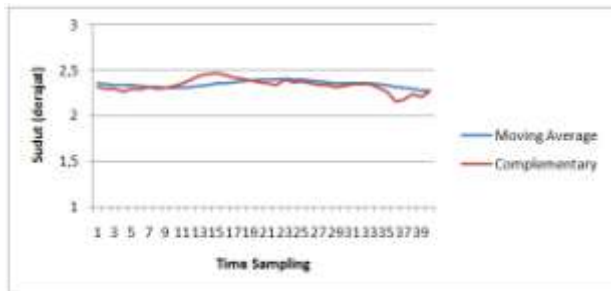
Gambar 18 Pengukuran sensor sumbu z

Dari gambar pengukuran sensor pada sumbu x terlihat bahwa terdapat gangguan acak pada *accelerometer* dan gangguan bias pada *gyroscope*. Sama halnya dengan pengukuran pada sumbu x, pengukuran pada sumbu y juga menghasilkan gangguan pada *accelerometer* dan *gyroscope*. Akan tetapi hal ini dapat diatasi dengan penggunaan *complementary filter* seperti terlihat dari grafik *complementary filter* yang nilainya lebih stabil jika dibandingkan dengan pembacaan *accelerometer* maupun pembacaan *gyroscope*. Pada sumbu grafik pengukuran sumbu z terlihat bahwa sensor *gyroscope* memiliki gangguan bias.

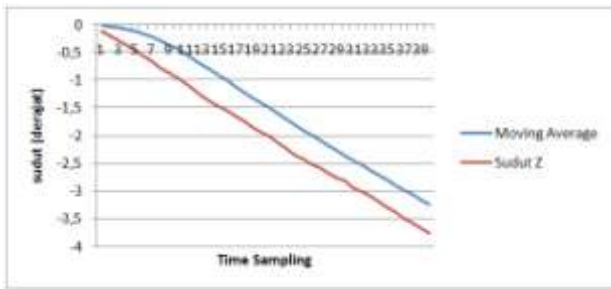
Hasil pengukuran sensor dengan *complementary filter* masih memiliki gangguan meskipun nilainya tidak terlalu besar. Untuk memperkecil nilai gangguan tersebut, digunakan filter MA. Hasil pengukuran sensor dengan filter MA dapat dilihat pada gambar 19, gambar 20, dan gambar 21.



Gambar 19 Grafik perbandingan MA dan *complementary filter* sumbu x



Gambar 20 Grafik perbandingan MA dan *complementary filter* sumbu y



Gambar 21 Grafik MA dan sumbu z

Dari gambar terlihat bahwa pengukuran dengan menggunakan filter MA menghasilkan nilai pengukuran lebih stabil.

Tabel 2 Pengukuran Sensor dengan filter digital.

No.	Sudut Ukur (derajat)	Sumbu x	Sumbu y	Sumbu Z
1	90°	87.693°	87.583°	90.3°
2	80°	79.063°	78.655°	80.31°
3	70°	70.000°	68.730°	70°
4	60°	59.679°	60.569°	59.59°
5	50°	50.304°	50.304°	49°
6	40°	40.768°	40.339°	40.52°
7	30°	30.191°	30.846°	29.85°
8	20°	20.053°	19.941°	18.82°
9	10°	10.531°	9.928°	9.57°
10	0°	0.367°	-0.45°	-0.78°
11	-10°	-10.197°	-8.465°	-10.42°
12	-20°	-20.205°	-20.591°	-20.4°
13	-30°	-29.920°	-30.287°	-31°
14	-40°	-39.992°	-40.539°	-40.6°
15	-50°	-50.354°	-50.462°	-50.67°
16	-60°	-60.614°	-60.636°	-60.57°
17	-70°	-68.239°	-69.545°	-70.55°
18	-80°	-78.968°	-78.567°	-80.35°
19	-90°	-87.856°	-87.543°	-90.71°

3.2. Pengujian Motor Servo

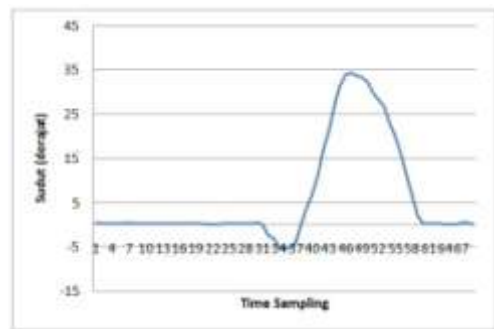
Untuk mendapatkan sistem yang sesuai, dibutuhkan kalibrasi motor servo agar dapat diketahui nilai sinyal motor servo untuk bergerak pada posisi tertentu. Motor servo membutuhkan sinyal kendali dari mikrokontroler untuk dapat bekerja. Sinyal yang digunakan berbentuk pulsa gelombang kotak dengan lebar minimal 20 milidetik.

Tabel 3 Kalibrasi motor servo.

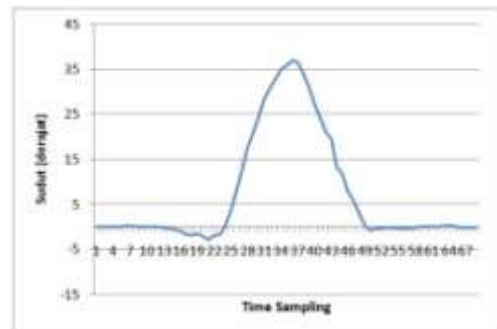
No	Motor Servo	Posisi 0 Derajat	Posisi 90 Derajat	Posisi 180 Derajat
1	Servo 1	250	750	1250
2	Servo 2	300	800	1300
3	Servo 3	350	850	1350

3.3. Pengujian Alat

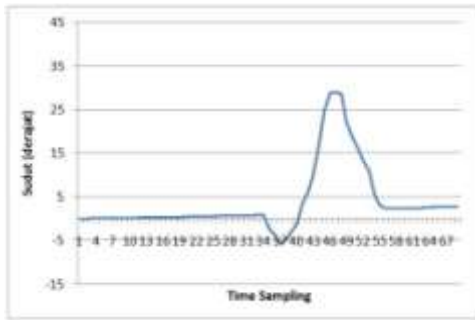
Sistem diuji dengan membuat alat berotasi pada sumbu x, sumbu y, dan sumbu z sebesar 45 derajat. Saat alat berotasi, sistem akan menstabilkan posisi kamera menuju titik 0 derajat pada sumbu x, 0 derajat pada sumbu y dan 0 derajat pada sumbu z. Kemudian diamati sudut yang terukur dengan alat ukur kemiringan. Alat ukur kemiringan menggunakan sensor dan metode pengukuran yang sama dengan alat. Sensor alat ukur diletakkan dibelakang kamera. Pengukuran menggunakan busur yang ditempel di tembok dengan referensi sudut 90 derajat dari pendulum.



Gambar 22 Grafik respon sumbu Y



Gambar 23 Grafik respon sumbu X



Gambar 24 Grafik respon sumbu Z

Grafik pengukuran menunjukkan bahwa sistem memiliki nilai yang cukup stabil pada sumbu x dan sumbu y, dengan *recovery time* pada sumbu x sebesar 720 milidetik, pada sumbu y sebesar 580 milidetik, dan pada sumbu z sebesar 440 milidetik.

Tabel 4 Data pengukuran gerakan *pitch*

No.	Sudut Ukur (derajat)	Kesalahan (derajat)					Jumlah (derajat)	Rata-rata (derajat)
		1	2	3	4	5		
1	60	3,3	0,6	-0,1	3,7	1,3	8,8	1,76
2	50	0,9	1,4	-0,8	2,7	3,3	7,5	1,5
3	40	2,3	0,5	-0,3	3	-0,6	4,9	0,98
4	30	2,3	0,4	0,9	1,1	3,1	7,8	1,56
5	20	1,5	0,3	0,7	-0,8	1,7	3,4	0,68
6	10	0,7	1,3	-0,4	0,9	2	4,5	0,9
7	0	0,2	0,3	1,4	0,7	1,1	3,7	0,74
8	-10	-1	-0,7	-2,3	-0,2	-0,9	-5,1	-1,02
9	-20	-0,9	-3,4	-2,4	0,2	-4,6	-11,1	-2,22
10	-30	-3,6	-2,9	-0,2	-3,9	-0,7	-11,3	-2,26
11	-40	0,3	-2,8	-0,4	-3,5	1,5	-4,9	-0,98
12	-50	-0,8	-3,7	-2,5	-2,9	0,5	-9,4	-1,88
13	-60	-2,6	-0,6	0,7	-3,1	-0,4	-6	-1,2
Kesalahan rata-rata (derajat)								-0,11077

Tabel 5 Data pengukuran gerakan *roll*

No.	Sudut Ukur (derajat)	Kesalahan (derajat)					Jumlah (derajat)	Rata-rata (derajat)
		1	2	3	4	5		
1	60	0,4	2,1	-1,7	-0,2	-3,2	3,8	0,76
2	50	1,2	0,3	0,7	1,3	0,5	4	0,8
3	40	0,4	1,5	0,9	1,3	0,8	4,9	0,98
4	30	1,2	0,2	-1,4	2,3	1,8	4,1	0,82
5	20	3,2	0,4	1,5	0,8	-0,4	5,5	1,1
6	10	0,3	3,2	-0,7	2,2	0,4	5,4	1,08
7	0	0,8	0,5	1,5	-2,3	1,8	2,3	0,46
8	-10	-2,3	-0,5	-0,7	-1,2	0,3	-4,4	-0,88
9	-20	-0,3	-1,9	1,1	-2,4	-0,5	-4	-0,8
10	-30	-3,2	-1,2	-4,7	-0,6	0,2	-9,5	-1,9
11	-40	1,8	-0,1	-2,3	-1,2	-3	-4,8	-0,96
12	-50	-2,1	-3,9	2	-0,2	-0,5	-4,7	-0,94
13	-60	-0,8	-1,2	1,5	1,4	2,8	3,7	0,74
Kesalahan rata-rata (derajat)								0,096923

Tabel 6 Data pengukuran gerakan *yaw*

No.	Sudut Ukur (derajat)	Kesalahan (derajat)					Jumlah (derajat)	Rata-rata (derajat)
		1	2	3	4	5		
1	60	0,2	1,9	0,8	0,2	1,7	4,8	0,96
2	50	-0,2	0,2	0,5	0,3	1,4	2,2	0,44
3	40	0,8	3,2	2,2	1,3	0,6	8,1	1,62
4	30	0,1	2,2	1,2	0,7	0,3	4,5	0,9
5	20	2,1	1,9	0,5	0,9	1,3	6,7	1,34
6	10	0,4	1,5	-0,1	0,7	0,9	3,4	0,68
7	0	0	-0,4	-0,8	-0,5	-1,4	-3,1	-0,62
8	-10	-3,2	-2,4	-0,2	-1,2	0,2	-6,8	-1,36
9	-20	0,5	-0,1	-1,2	-0,7	-3,4	-4,9	-0,98
10	-30	0,7	-3,8	-0,2	-3,8	-0,9	-8	-1,6
11	-40	-3,2	0,2	-2,3	-0,9	-1,7	-7,9	-1,58
12	-50	-1,2	-3,6	-1,7	-1,1	-0,1	-7,7	-1,54
13	-60	-3,7	-0,2	-0,8	-0,5	-2,1	-7,3	-1,46
Kesalahan rata-rata (derajat)								-0,24615

Sistem memiliki kesalahan rata-rata pada gerakan *pitch* sebesar $-0,11$ derajat, pada gerakan *roll* sebesar $0,096$ derajat, dan pada gerakan *yaw* sebesar $-0,246$ derajat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa Sensor *IMU* memiliki nilai kesalahan rata-rata pada sumbu x sebesar $0,638^\circ$, pada sumbu y sebesar $0,829^\circ$, dan pada sumbu z sebesar $0,404^\circ$. Penggunaan filter *moving average* dapat meredam derau dari sensor, dengan demikian hasil pengukuran menjadi lebih stabil. Sistem memiliki *recovery time* pada saat diberikan gangguan 45 derajat sebesar 720 milidetik pada sumbu x, 580 milidetik pada sumbu y, dan 440 milidetik pada sumbu z. Terjadi kesalahan rata-rata sistem sebesar $-0,11^\circ$ pada gerakan *pitch*, $0,096^\circ$ pada gerakan *roll*, $-0,246^\circ$ pada gerakan *yaw*.

Untuk pengembangan sistem lebih lanjut, maka ada beberapa saran yang dapat dilakukan yaitu Penggunaan *magnetometer* untuk mengoreksi hasil pengukuran sudut *yaw*, sehingga ke depan alat ini dapat mengoreksi *gyroscope* sumbu z. Sensor dapat diganti dengan sensor yang lebih stabil, sehingga tundaan pada filter *moving average* dapat diperkecil atau bahkan tidak perlu menggunakan filter untuk meredam gangguan. Dibuat sistem dengan dua pilihan pengontrolan yaitu secara manual dan secara otomatis. Pengontrolan secara manual dimaksudkan agar sudut referensi dapat diatur oleh operator. Penggunaan metode kendali lain seperti metode jaringan syaraf tiruan, kendali adaptif atau MPC.

Daftar Pustaka

- [1]. Lewis, Mike. "Stabilization, Steering, and Gimbal Technology as it relates to Cinematography". Toronto, PV-Labs Inc, 2012.
- [2]. Goh, A. H. W., Y. S. Yong, C. H. Chan, S. J. Then, L. P. Chu, S. W. Chau, dan H. W. Hon. "Interactive PTZ Camera Control System Using Wii Remote and Infrared Sensor Bar", World Academy of Science, engineering and Technology 46, 2008.
- [3]. Laksana, Andra. "Balancing Robot Beroda Dua Menggunakan Metode Kendali Proporsional Integral". Semarang, Universitas Diponegoro, 2012.
- [4]. Tiimus, K. dan Tamre, M. "Camera Gimbal Control System for Unmanned Platforms", 7th International DAAAM Baltic Conference, 2010.
- [5]. Sumardi. "Perancangan Sistem Suspensi Semi-Aktif dengan Peredam Nonlinier Menggunakan Pengontrol". Bandung, ITB, 1998.
- [6]. -----, AN3192 Application Note, http://www.pololu.com/file/download/LSM303DLH-compass-appnote.pdf?file_id=0J434, September 2012.
- [7]. Kusumadewi, sri dan Purnomo, hari. "Aplikasi Logika Fuzzy untuk Pendukung Keputusan". Jogjakarta, graha ilmu, 2010.
- [8]. LA Zadeh. "Fuzzy sets". Information and Control 8:338–353, 1965.
- [9]. S Assilian, EH Mamdani. "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", 1974.
- [10]. PN Paraskevopoulos. "Digital Control Systems". London: Prentice Hall, 1996.
- [11]. Rahman Alma'i, Vidi. "Aplikasi Sensor Accelerometer Pada Deteksi Posisi". Semarang, Universitas Diponegoro, 2009.
- [12]. Seifert, K. dan Camacho, O. "Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers", Freescale Semiconductor, 2007.
- [13]. Smith, S.W. "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing", 1st edition, CA: C
- [14]. Colton, Shane, "The Balance Filter: A Simple Solution for Integrating Accelerometer and Gyroscope Measurements for a Balancing Platform", <http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf>, September 2011.
- [15]. Widada, Wahyu. "Digital Moving Average Filter untuk Peningkatan Akurasi Pengukuran Sensor Dinamik Roket Berbasis Microprocessor". LAPAN, 2008.
- [16]. -----, ATmega 8535 Data Sheet, <http://www.atmel.com>, April 2011.
- [17]. -----, PS-MPU-6000A, <http://www.invensense.com>, November 2012