

STABILISASI ROBOT BERKAKI 6 (HEXAPOD) PADA BIDANG MIRING MENGGUNAKAN 9 DOF IMU BERBASIS INVERS KINEMATIC

Muhammad Asrofi^{*)}, Sumardi, and Budi Setiyono

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

^{*)}E-mail : asrofi.muhammad770@gmail.com

Abstrak

Robot merupakan alat yang dikembangkan dengan pesat dewasa ini. Salah satu jenis robot itu adalah robot berkaki 6 (*Hexapod*). Permasalahan yang sering timbul pada robot berkaki 6 ini adalah ketika dihadapkan pada permukaan yang miring. Ini akan mengakibatkan pergerakan robot terhambat dikarenakan titik beban robot yang tidak seimbang. Pada penelitian ini dilakukan perancangan dan pembuatan sistem stabilisasi *hexapod* pada bidang miring menggunakan sensor 9 DOF IMU berbasis *invers kinematic*. Sensor IMU terbagi atas sensor *accelerometer*, *gyroscope* dan *magnetometer*. Sensor ini akan memberikan masukan sudut kemiringan dan *heading* robot sehingga akan diolah dalam controller fuzzy-pid untuk dapat mempertahankan *body* robot tetap datar pada bidang miring. Sebagai controller pergerakan robot dirancang sebuah *invers kinematic*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa robot akan bergerak translasi depan apabila sumbu x invers di ubah dari posisi semula, bergerak translasi samping apabila sumbu y diubah dan bergerak translasi ke atas apabila sumbu z diubah terhadap nilai awal di *invers kinematic*. Pada pengujian sensor IMU didapat bahwa nilai RMSE total sumbu *pitch* adalah 1,73%, *roll* =1,67% dan *yaw* = 1,24%. Pada pengujian keseluruhan sistem didapat respon yang paling stabil yaitu dengan konstanta defuzzyfikasi Kp yaitu $k_1=0,5$, $k_2=1$, $k_3=3$, Ki yaitu memiliki nilai $k_1=0,5$, $k_2=0,5$, $k_3=0,5$ dan pada Kd memiliki $k_1=0,25$, $k_2=0,35$ dan $k_3=0,45$.

Kata kunci : *Hexapod*, *IMU*, *Fuzzy-PID*

Abstract

Robot is toll which developed very fast now. One of type of robot is 6 legged robot (Hexapod). The Problem from this robot is if hexapod find the tilt surface. This is will result the movement of robot can be late and the center of gravity not balanced. In this research makes a designed stabilization hexapod in tilt surface with 9 DOF IMU based on invers kinematic. IMU sensor devided by accelerometer, gyroscope and magnetometer. This sensor will gave the input of tilt degree and heading of robot so can be processed in fuzzy-pid controller to can balance the body of robot in tilt surface. As the controller of the movement hexapod is design to invers kinematic. The results show that the robot will move forward when the x-axis translation inverse changed from its original position, move aside when the y-axis translational modified and move in up and down if the translation to the z-axis was changed. From the testing of IMU get the total of RMSE pitch is 1,73%, roll =1,67% and yaw = 1,24%. In controller fuzzy-pid get the good respon is on the value Kp have $k_1=0,5$, $k_2=1$, $k_3=3$, Ki have $k_1=0,5$, $k_2=0,5$, $k_3=0,5$ and Kd have $k_1=0,25$, $k_2=0,35$ dan $k_3=0,45$.

Keyword : *Hexapod*, *IMU*, *Fuzzy-PID*

1. Pendahuluan

Robot merupakan barang yang sudah tidak asing lagi bagi mahasiswa elektro khususnya konsentrasi Kontrol dan Instrumentasi. Pengembangan robot sangat pesat dengan berbagai macam system baru yang ditemukan. Salah satu jenis robot yang juga banyak dikembangkan adalah Robot Berkaki 6 (*Hexapod*). Robot ini bergerak berdasarkan kinematic gerak yang diterapkan pada tiap-tiap kaki yang disusun oleh motor-motor servo^[1].

Beberapa kekurangan dari robot ini adalah ketika menemui permukaan bidang miring. Pada bidang miring, pergerakan robot akan mempengaruhi titik beban body robot, hal ini dikarenakan pembagian beban yang tidak seimbang di keseluruhan motor servo. Perpindahan titik beban body robot ini akan mengakibatkan pembebanan pada salah satu motor servo. Hal ini akan menyebabkan motor servo yang diberikan beban tertinggi mengalami kerusakan yang lebih cepat^[1].

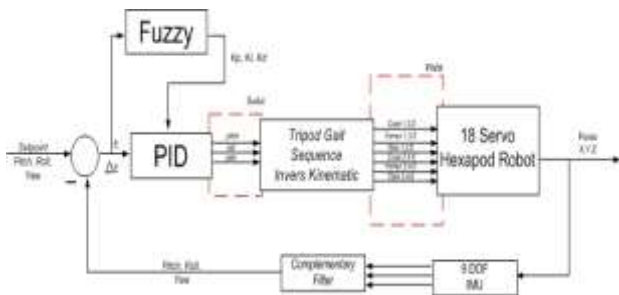
Oleh karena itu pengontrolan body robot yang dapat mempertahankan posisi tetap datar perlu diperlukan sehingga dalam kondisi bidang miring robot dapat mempertahankan dan menyeimbangkan body robot. Salah satu cara untuk dapat membuat titik beban tetap seimbang adalah dengan mengembangkan Invers Kinematic. Invers Kinematic merupakan ragam gerak robot berorientasi jarak tempuh lengan. Kinematic ini akan menghasilkan pergerakan berbasis jarak terhadap sumbu translasi X, Y, Z dan sudut rotasi Pitch, Roll, Yaw. Koordinat dan sudut inilah yang akan dikontrol^[2].

Selain kinematic gerak, diperlukan sensor yang dapat menghasilkan data sudut sebagai pembanding dan memberikan data SetPoint yang kita inginkan. Salah satu sensor itu adalah IMU 6 DOF MPU-6050^[5] dan HMC 5883^[14]. Sensor ini merupakan gabungan 3 sensor, yaitu Accelerometer, Gyroscope dan Magnetometer. Metode control PID-FUZZY dapat digunakan untuk dapat memberikan data setpoint dan mempertahankan robot pada *setpoint* yang diinginkan^[13].

2. Metode

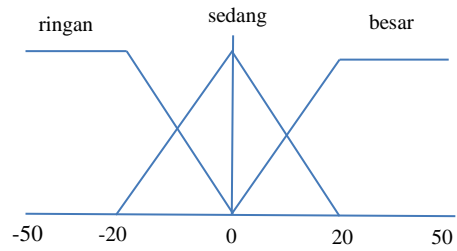
2.1 Pengendali Fuzzy-PID

Dalam penelitian Stabilisasi Robot Berkaki dalam Bidang Miring ini menggunakan controller fuzzy tuning PID. Nilai membership function dari controller fuzzy diperoleh dari data sensor yang sebelumnya sudah di uji pada beberapa derajat kemiringan. *Membership function* inilah yang nantinya akan menjadi parameter penentuan konstanta pada controller PID. Secara umum, diagram blok controller ditunjukkan oleh gambar dibawah ini :

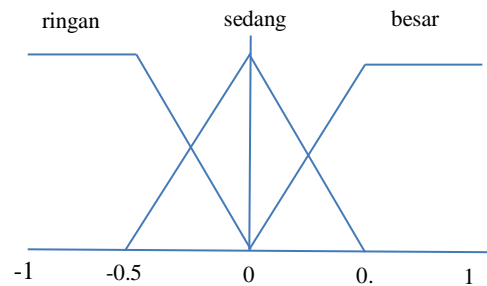


Gambar 1. Diagram blok controller

Masukan dari controller fuzzy adalah error dan delta error seperti gambar himpunan *membership function* fuzzy sebagai berikut :



Gambar 2. Himpunan keanggotaan masukan error



Gambar 3. Himpunan keanggotaan masukan delta error

Membership function kemudian dibentuk dalam basis aturan fuzzy seperti dibawah ini :

Tabel 1 Basis aturan fuzzy tuning Kp

ΔE \ E	Ringan	Sedang	Besar
Ringan	0.5	0.5	0.5
Sedang	0.5	1	1
Besar	0.5	1	3

Tabel 2 Basis aturan fuzzy tuning Ki

ΔE \ E	Ringan	Sedang	Besar
Ringan	0.5	0.5	0.5
Sedang	0.5	0.5	0.5
Besar	0.5	0.5	0.5

Tabel 3 Basis aturan fuzzy tuning Kd

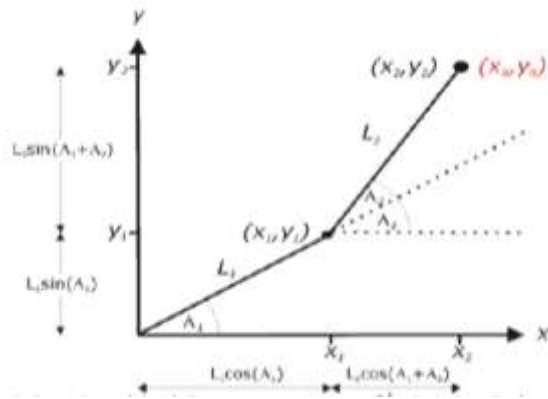
ΔE \ E	Ringan	Sedang	Besar
Ringan	0.25	0.25	0.25
Sedang	0.25	0.35	0.35
Besar	0.25	0.35	0.45

Nilai-nilai pada *rule base* diatas merupakan nilai keluaran *singleton output* yang akan masuk dalam controller PID sebagai konstanta controller.

2.2 Invers Kinematic

Inverse Kinematics mendefinisikan bagaimana cara mencapai posisi lengan yang diinginkan, dengan melakukan pencarian ataupun perhitungan terhadap rotasi dan pergeseran titik dari sendi dan tulang. Pada robot berkaki 6 digunakan *Invers Kinematic* dengan 3 derajat kebebasan (*Degree of Freedom*). Dimana *Degree of Freedom* (DOF) adalah sebuah konfigurasi suatu *system* mekanik yang mengumpamakan seberapa jauh *system* tersebut dapat mengikuti suatu *track/lajur*^[2].

Berikut adalah gambar grafik representasi sendi gerak pada lengan robot yang digunakan dalam perhitungan *Invers Kinematic* pada robot berkaki 6



Gambar 4. Grafik representasi sendi gerak pada lengan robot^[2]

Ada dua cara yang digunakan untuk dapat menyelesaikan permasalahan pada *Invers Kinematic*, yaitu *Algebra Sollution* dan *Geometric Sollution*. Keduanya sama-sama dapat menyelesaikan permasalahan, namun penulis hanya menggunakan satu metode penyelesaian, yaitu *Algebra Sollution*^[2].

Diketahui bahwa terdapat persamaan dalam *Forward Kinematic* sesuai dengan gambar 4 diatas diperoleh nilai untuk titik x_2 dan y_2 sebagai berikut :

$$x_2 = L_1 \cos(A_1) + L_2 \cos(A_1 + A_2) \quad (1)$$

$$y_2 = L_1 \sin(A_1) + L_2 \sin(A_1 + A_2) \quad (2)$$

Untuk mendapatkan keluaran berdasarkan jarak yang diinginkan, maka perhitungan akan mencari nilai A_1 dan A_2 sebagai berikut:

Mengkuadratkan x dan y pada persamaan (1) dan (2) didapat :

$$[x_2]^2 = [L_1 \cos(A_1) + L_2 \cos(A_1 + A_2)]^2 \quad (3)$$

$$x_2^2 = L_1^2 \cos^2(A_1) + 2L_1L_2 \cos(A_1) \cos(A_1 + A_2) + L_2^2 \cos^2(A_1 + A_2) \quad (4)$$

$$[y_2]^2 = [L_1 \sin(A_1) + L_2 \sin(A_1 + A_2)]^2 \quad (5)$$

$$y_2^2 = L_1^2 \sin^2(A_1) + 2L_1L_2 \sin(A_1) \sin(A_1 + A_2) + L_2^2 \sin^2(A_1 + A_2) \quad (6)$$

Menjumlahkan x dan y yang sudah di kuadratkan di persamaan (4) dan (6):

$$x_2^2 + y_2^2 = L_1^2 [\sin^2(A_1) + \cos^2(A_1)] + L_2^2 [\sin^2(A_1 + A_2) + \cos^2(A_1 + A_2)] + 2L_1L_2 [\sin(A_1) \sin(A_1 + A_2) + \cos(A_1) \cos(A_1 + A_2)] \quad (7)$$

Dimana seperti yang kita ketahui bahwa :

$$\sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) = 1 \quad (8)$$

Didapat persamaan yang lebih sederhana dari persamaan (7) yaitu:

$$x_2^2 + y_2^2 = L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 [\sin(A_1) \sin(A_1 + A_2) + \cos(A_1) \cos(A_1 + A_2)] \quad (9)$$

Diperoleh persamaan sebagai penyederhanaan ke-2 rumus *invers kinematic* sebagai berikut :

$$\frac{x_2^2 + y_2^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} = \sin(A_1) \sin(A_1 + A_2) + \cos(A_1) \cos(A_1 + A_2) \quad (10)$$

Perhitungan selanjutnya didapat :

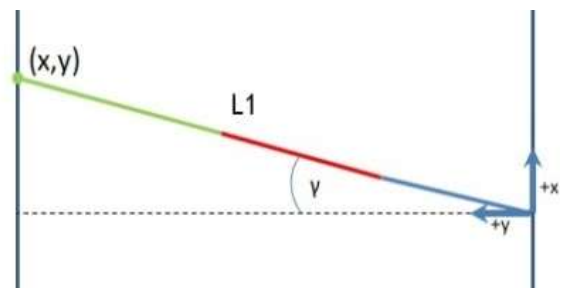
$$\cos(A_2) = \frac{x_2^2 + y_2^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \quad (11)$$

Dari persamaan (10) dan persamaan (11) menghasilkan persamaan akhir sebagai berikut:

$$A_2 = \cos^{-1} \left\{ \frac{x_2^2 + y_2^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \right\} \quad (12)$$

$$A_1 = \cos^{-1} \left\{ \frac{[L_1 + L_2 \cos(A_2)] x - [-L_2 \sin(A_2)] y}{[L_1 + L_2 \cos(A_2)]^2 + [-L_2 \sin(A_2)]^2} \right\} \quad (13)$$

A_1 dan A_2 adalah persamaan *Invers Kinematic* untuk bagian *Femur* dan *Tibia*. Perhitungan untuk masukan sudut *Coxa* di dapat dari rumus sederhana menggunakan prinsip trigonometri dimana pergerakan *Coxa* adalah terhadap sumbu X (translasi depan) dan Y (translasi samping) sesuai dengan gambar 5 Dibawah ini



Gambar 5. representasi pergerakan sendi coxa

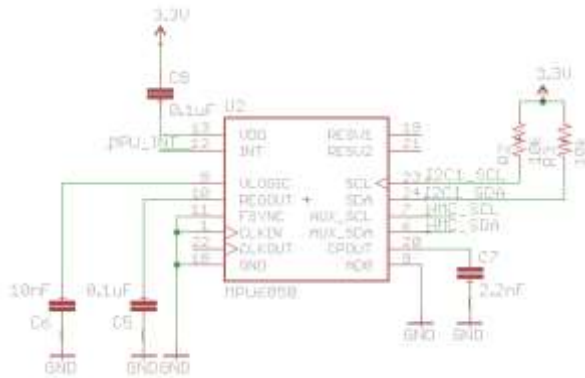
Gambar 2.2 merupakan representasi pergerakan sendi *coxa*, dimana servo akan bergerak terhadap koordinat x dan y sehingga sudut γ atau A_0 dirumuskan sebagai berikut :

$$A_0 = \text{Atan2}(X, Y) \quad (14)$$

$$(2.6)$$

2.3 Modul MPU 60506 DoF IMU

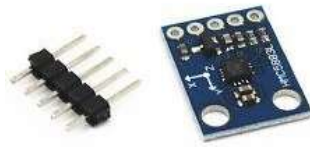
Sensor MPU-6050 merupakan gabungan dari 2 macam sensor yaitu sensor accelerometer dan gyroscope yang diproduksi oleh invensense dengan antarmuka komunikasi I2C. MPU-6050 ini menggabungkan antara accelerometer dan gyroscope di dalam satu board^[5]. Sensor ini dapat mendeteksi percepatan dalam 3 axis (x, y, dan z) dan kecepatan sudut dalam 3 axis (x, y, dan z)[5]. Konfigurasi pin MPU-6050 ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Razor 6 DoF IMU.

2.4 Modul Sensor Magnetometer HMC5883

HMC5883L adalah sensor magnet terkemas dalam surface mount 3.0x3.0x0.9 mm 16-pin leadless chip carrier (LCC). HMC5883L tersusun atas sensor resistif magnet beresolusi tinggi, penghilang offset dan ADC 12-bit untuk pengukuran medan magnet bumi dengan resolusi tinggi. Menggunakan teknologi anisotropic magneto-resistive (AMR) Honeywell, HMC5883L menyediakan kepresisian lebih pada sensitifitas dan linieritas sumbu dan dirancang untuk mengukur kedua arah dan medan magnet bumi^[14].

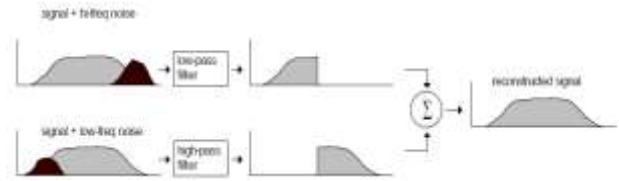


Gambar 7. Bentuk fisik HMC 5883

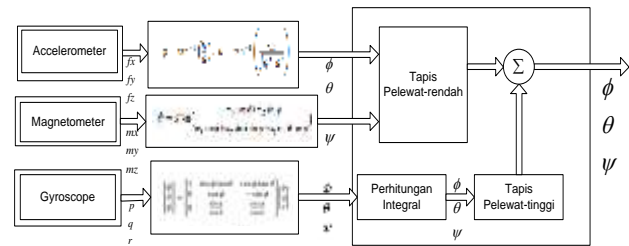
2.6 Tapis Komplementer

Dua buah masukan yang salah satunya memiliki derau dengan frekuensi tinggi dan masukan yang lain memiliki frekuensi derau rendah. Masukan yang memiliki frekuensi derau tinggi ditapis dengan tapis pelewat-rendah, sedangkan masukan yang memiliki frekuensi derau rendah ditapis dengan tapis pelewat-tinggi. Hasil rekonstruksi kedua sinyal yang masing-masing telah

ditapis tersebut merupakan variabel yang ingin dibaca tanpa adanya derau yang sebelumnya terasosiasi dengan sensor.



Gambar 8. Prinsip kerja tapis komplementer.

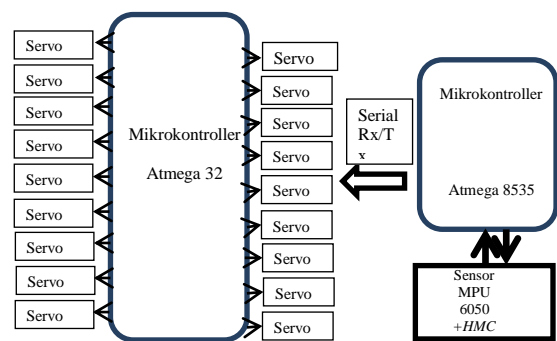


Gambar 9. Diagram tapis komplementer pada sudut orientasi.

$$\phi = (K_{giroskop}) \times (\phi + \phi_{giroskop} \times dt) + (K_{AkslMag}) \times (\phi_{AkslMag}) \quad (15)$$

2.8 Perancangan Perangkat-Keras

Secara umum perancangan perangkat keras dalam Stabilisasi Robot Berkaki 6 (Hexapod) pada Bidang Miring Menggunakan 9 DOF IMU Berbasis Invers Kinematic ditunjukkan oleh blok diagram pada gambar 3.1



Gambar 10. Blok diagram perancangan perangkat-keras.

Gambar 3.1 menunjukkan bahwa data dari sensor akan diolah oleh mikrokontroler pertama yaitu ATmega 8535 sebagai master yang kemudian akan dikirimkan ke mikrokontroler kedua yaitu ATmega 32 (mikrokontroler slave) sebagai nilai sudut orientasi pergerakan robot. Data pada mikrokontroler pertama juga dapat di kirim ke komputer untuk menampilkan data pengolahan nilai

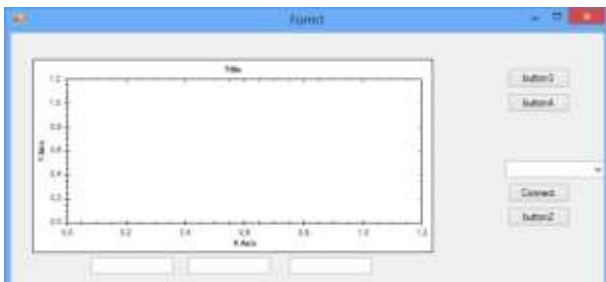
sensor dan juga dapat digunakan untuk menyesuaikan parameter yang digunakan dalam pergerakan robot berkaki 6. Gambar 3.1 juga menunjukkan komponen-komponen yang digunakan termasuk juga koneksi tiap-tiap komponen kedalam mikrokontroller. Komunikasi antara mikrokontroller pertama (ATMega 8535) dengan mikrokontroller kedua (ATMega 32) menggunakan UART serial (Tx/Rx).

2.9 Perancangan Perangkat-Lunak

Perancangan perangkat-lunak merupakan perancangan algoritma program untuk merealisasikan sistem stabilisasi *hexapod* pada bidang miring menggunakan sensor *9 DoF IMU*. Perancangan perangkat-lunak pada sistem stabilisasi *hexapod* berbasis *invers kinematic* meliputi dua hal yaitu perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler dan perancangan perangkat lunak pada komputer.

Perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler merupakan perancangan yang dilakukan agar mikrokontroler dapat mengambil, mengolah, dan mengirim data sudut orientasi dari sensor *6 DoF IMU* dan sensor magnetometer 3 aksis yang kemudian di konversi dalam posisi *body* robot yang berupa keluaran PWM motor servo. Perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler dilakukan dengan bahasa C dan menggunakan *Integrated Development Environment (IDE) CodeVisionAVR (CVAVR)*. Perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler meliputi perancangan pewaktuan program, perancangan program *invers kinematic*, perancangan antarmuka dengan sensor, perancangan tapis *complementary* dan perancangan fuzzy-pid di dalam cv avr.

Perancangan perangkat lunak pada komputer dilakukan agar data orientasi *body* robot dari mikrokontroler dapat diterima, diolah dan ditampilkan di komputer. Perancangan perangkat lunak pada komputer dibuat menggunakan IDE Microsoft Visual Studio 2013 dengan bahasa C#. Perancangan perangkat lunak pada komputer terdiri dari perancangan penerimaan data serial, perancangan pengolahan data, dan penampilan data.



Gambar 11. Tampilan perancangan GUI.

3. Hasil dan Analisa

3.1 Pengujian Motor Servo

Pengujian motor servo dilakukan dengan mengubah posisi *body* robot terhadap koordinat x, y dan z pada init awal robot diam ke perubahan jarak yang diinginkan pada sistem invers kinematic. Setiap PWM pada motor servo diambil untuk dibandingkan dengan PWM motor servo saat init awal (diam).

Tabel 4 Nilai PWM Servo saat init

Servo No	Nilai PWM
1	135
2	169
3	167
4	125
5	169
6	167
7	125
8	169
9	167
10	124
11	80
12	82
13	124
14	80
15	82
16	124
17	80
18	82

Tabel 5 Nilai PWM Servo pengujian posisi *body* robot terhadap sumbu X

Servo no	Pengujian Posisi <i>body</i> Robot Terhadap Sumbu X					
	15	20	25	-15	-20	-25
1	118	113	108	155	162	169
2	165	163	161	167	165	163
3	142	133	124	183	187	191
4	99	91	83	151	160	169
5	169	169	169	169	169	169
6	164	162	160	164	162	160
7	104	97	90	141	146	151
8	167	165	163	165	163	161
9	183	187	191	142	133	124
10	145	152	159	108	103	98
11	82	84	86	84	86	88
12	66	62	58	107	116	125
13	150	158	166	98	89	80
14	80	80	80	80	80	80
15	85	87	89	85	87	89
16	141	146	151	104	97	90
17	84	86	88	82	84	86
18	107	116	125	66	62	58

Tabel 5 diatas menunjukkan perubahan PWM motor servo terhadap perubahan *body* terhadap sumbu X. Dapat dilihat bahwa semakin besar perubahan posisi *body* robot di sumbu X terhadap titik awal init robot yang diberikan maka pergerakan servo no.1 akan semakin besar. Diambil contoh servo no.1 dengan nilai PWM awal = 135, PWM servo pada perubahan posisi di sumbu x sejauh 15mm menjadi 118, pada x sejauh 20mm menjadi 113 dan pada x sejauh 25mm menjadi 108. Hal ini dikarenakan pengubahan posisi *body* robot terhadap sumbu x

inverskinematic akan mengakibatkan badan robot bergerak translasi ke depan.

Pengubahan posisi *body* robot terhadap sumbu Y akan mempengaruhi perubahan tibia atau servo no.3

Pengubahan posisi *body* robot terhadap sumbu Z akan mempengaruhi terhadap perubahan femur dan tibia atau servo no.2 dan servo no.3

3.2 Pengujian Sudut *Pitch*, *Roll* dan *Yaw*

Metode analisis dilakukan dengan mengambil 50 sampling data dimana setiap sampling bernilai 100 milidetik. Setelah mendapatkan nilai dari tiap sudut *pitch*, *roll* dan *yaw*, selanjutnya adalah menghitung nilai error. Nilai error hasil pengujian didapatkan dengan mengurangkan nilai sudut uji dengan sudut percobaan kemudian dibagi 180 derajat dan dikalikan dengan nilai 100%. Pada tiap error yang didapat dari sudut yang berbeda selanjutnya akan menjadi error total untuk *pitch*, *roll* dan *yaw*. Nilai hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 6, tabel 7 dan table 8

Tabel 6 Pengujian sudut *pitch*

NO	Pengujian sudut (derajat)						
	0	10	15	20	-10	-15	-20
1	-0.89	10.63	15.17	20.23	-10.60	-15.75	-20.19
2	-0.55	10.49	15.23	20.25	-10.15	-15.52	-20.15
3	-0.89	10.31	15.35	20.37	-10.09	-15.62	-19.68
4	-0.75	10.42	15.34	20.44	-10.17	-15.47	-18.93
5	-0.79	10.73	14.90	20.43	-10.18	-15.89	-18.95
RMSE (%)	0.43	0.28	0.11	0.19	0.13	0.36	0.23

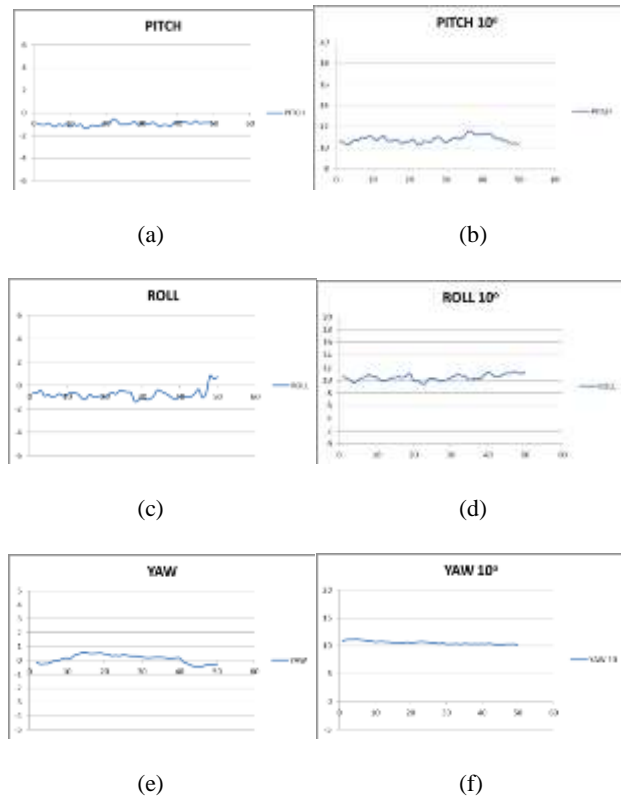
Tabel 7 Pengujian sudut *roll*

NO	Pengujian sudut (derajat)						
	0	10	15	20	-10	-15	-20
1	-0.63	10.51	14.25	20.54	-10.85	-15.49	-20.17
2	-0.66	10.37	14.78	21.03	-10.86	-15.51	-20.23
3	-0.42	9.99	15.38	20.50	-10.44	-15.85	-20.12
4	-0.90	9.64	15.23	20.56	-10.77	-15.94	-19.69
5	-0.79	9.94	14.25	20.43	-10.85	-15.23	-19.74
RMSE (%)	0.37	0.05	0.12	0.34	0.41	0.33	0.05

Tabel 8 Pengujian sudut *yaw*

NO	Pengujian sudut (derajat)						
	0	10	15	20	-10	-15	-20
1	-0.15	10.76	15.06	20.32	-10.71	-15.41	-20.17
2	0.13	10.71	15.01	20.28	-10.64	-15.47	-20.14
3	0.14	10.61	15.04	20.33	-10.54	-15.52	-20.02
4	0.35	10.54	15.34	20.24	-10.43	-15.45	-20.01
5	0.44	10.77	15.40	19.92	-10.29	-15.34	-19.97
RMSE (%)	0.10	0.37	0.09	0.12	0.29	0.24	0.03

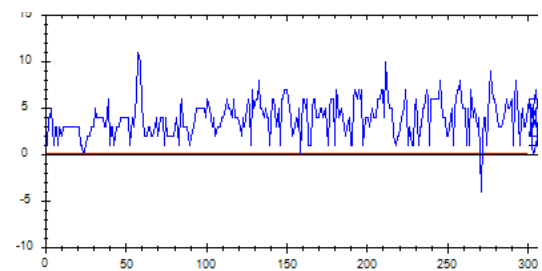
Dari tabel 6, tabel 7 dan tabel 8 dapat diketahui bahwa RMSE total dari *pitch* = 1.73 % , *roll* = 1.67% dan *yaw* = 1.24%.



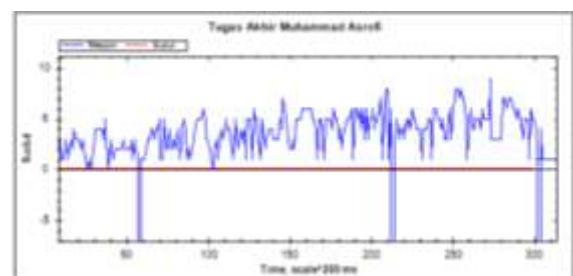
Gambar 12. Grafik sudut (a) *pitch* 0°, (b) *pitch* 10°, (c) *roll* 0°, (d) *roll* 10°, (e) *yaw* 0°, (f) *yaw* 10°

3.3 Pengujian dengan gangguan *pitch* ke atas

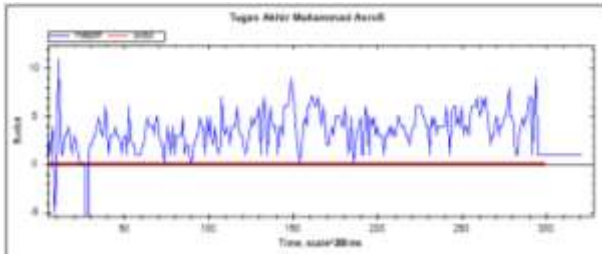
Pengujian pertama dengan variasi nilai konstanta yang digunakan sebagai singleton output pada tahap defuzzyfikasi



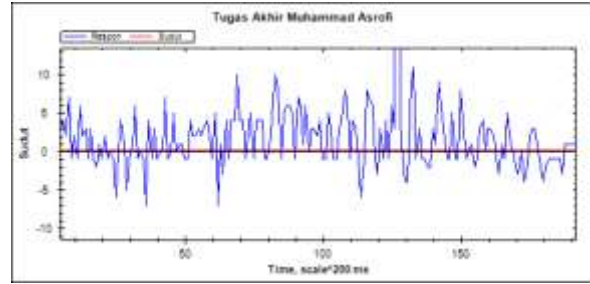
(a)



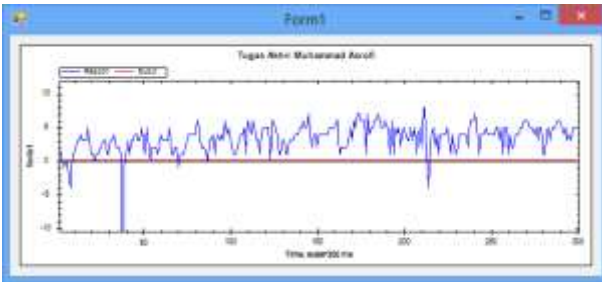
(b)



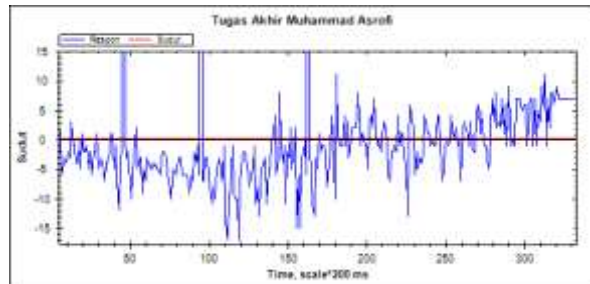
(c)



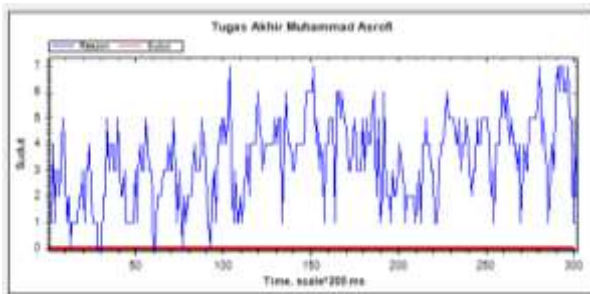
(a)



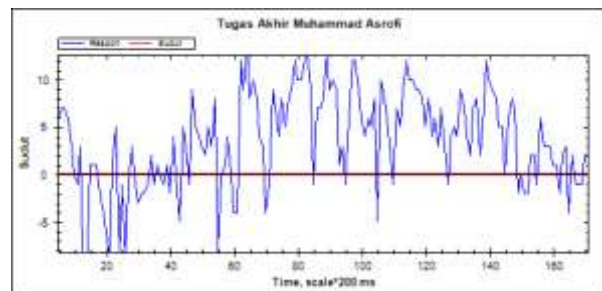
(d)



(b)



(e)



(c)

Gambar 13. Pengujian terhadap sudut *pitch* ke atas dengan variasi *singleton output fuzzy*.

Hasil menunjukkan respon yang paling baik yaitu variasi ke 4/ gambar 13 (d). Grafik menunjukkan osilasi yang sedikit dibandingkan dengan respon lainnya. Hasil dari gambar 13 (d) diperoleh dengan variasi nilai untuk *singleton output* parameter K_p sebesar $k_1=0,5$, $k_2=1$, $k_3=3$, untuk parameter K_i sebesar $k_1=0,5$, $k_2=0,5$, $k_3=0,5$ dan untuk parameter K_d sebesar $k_1=0,25$, $k_2=0,35$, $k_3=0,45$.

3.4 Pengujian dengan gangguan *Pitch* ke bawah

Kontroller yang dirancang tidak hanya dapat berguna untuk kemiringan ke atas tetapi juga kemiringan kebawah. Hal ini di upayakan dikarenakan robot berkaki 6 mempunyai kelemahan saat berjalan pada bidang miring oleh karena itu, kontroller dibuat untuk mengurangi kelemahan robot tersebut.

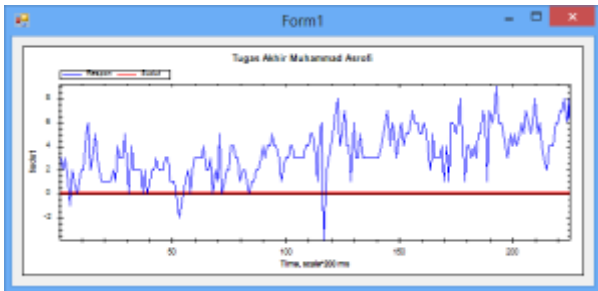
Gambar 14. Respon sistem terhadap gangguan *pitch* kebawah dengan (a) kemiringan 3° , (b) kemiringan 5° dan (c) kemiringan 10° .

Gambar 14 menunjukkan bahwa (a) dan (b) masih mampu beresilasi pada sudut 0° . Hal ini menunjukkan robot masih dapat mempertahankan posisi *body* pada kondisi datar di kemiringan sampai 5° . Pada kemiringan 10° menunjukkan bahwa robot tidak dapat mencapai sudut 0° . Hal ini dikarenakan pada sudut 10° jarak tinggi teratas dengan tinggi terbawah mencapai 5 cm. Hal ini melebihi *offset* tinggi yang dapat dicapai robot berkaki 6 yaitu hanya 2,5cm. Oleh karena itu grafik menunjukkan osilasi yang cukup besar serta tidak dapat mencapai kesetabilan di sudut 0°

3.5 Pengujian dengan gangguan *Pitch + Roll*

Pengujian dengan gangguan *pitch+ roll* dilakukan dengan memberikan kemiringan 5° ke samping dan 5° posisi miring ke depan. Hal ini dilakukan untuk menguji

kestabilan robot pada bidang miring translasi samping. Berikut data yang diperoleh hasil pengujian :

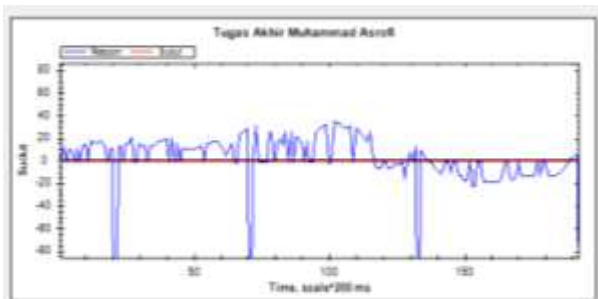


Gambar 15. Respon sistem dengan gangguan *pitch + roll*

Gambar 15 Menunjukkan bahwa walaupun diberikan gangguan kemiringan kesamping, kontroller dapat mempertahankan body robot menuju titik set point walaupun tidak menuju pada sudut 0° yaitu pada sudut 2° pada kemiringan awal dan 3° pada kemiringan puncak yaitu *pitch* 5° dan *roll* 5° .

3.6 Pengujian dengan gangguan *Pitch + Roll + Yaw*

Pengujian dengan gangguan ketiga output sensor dari IMU 6 DOF + HMC 5883 dilakukan untuk mengetahui orientasi heading robot saat berjalan. Heading inilah yang menentukan pergerakan robot lurus atau tidak. Hasil pengujian heading sesuai dengan gambar dibawah ini :



Gambar 16. Respon sistem dengan gangguan *pitch + roll + yaw*

Gambar 16 Menunjukkan hasil heading robot berkaki 6. Data menunjukkan terjadi osilasi. Osilasi yang terjadi tidak terlalu berpengaruh pada orientasi robot berjalan dikarenakan kontroller dapat mengembalikan ke sudut 0° sehingga robot pada lintasan tetap terlihat berjalan lurus sesuai dengan set point orientasi yang diberikan.

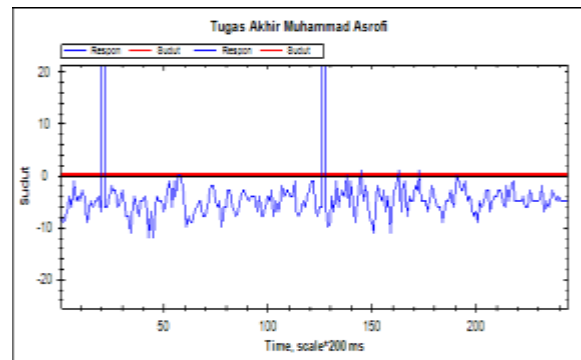
Dengan serangkaian pengujian diatas baik terhadap sudut *pitch*, *pitch + roll* dan *pitch + roll + yaw* berikut adalah gambar posisi akhir robot pada bidang miring :



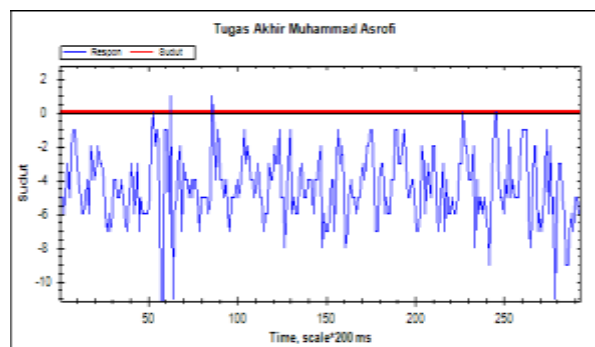
Gambar 17. Posisi akhir robot pada bidang miring

3.6 Pengujian keseluruhan lintasan / track

Pada pengujian keseluruhan lintasan (track), di ujikan terhadap 2 kali variasi derajat kemiringan keatas, yaitu 5° dan 7° . Robot berjalan dari titik awal tanpa derajat kemiringan hingga lintasan akhir yaitu kemiringan ke bawah. Berikut hasil yang diperoleh



(a)



(b)

Gambar 18. Grafik Robot berjalan (a) kemiringan awal 5° (b) kemiringan awal 7°

Gambar 18 menunjukkan bahwa respon robot mengalami osilasi yang sangat besar ketika kemiringan diperbesar. Pada kemiringan 5° robot masih mampu mencapai titik *setpoint*, sedangkan pada kemiringan 7° robot mengalami osilasi yang besar. Hal ini dikarenakan pada kemiringan 7° jarak antara titik tinggi maksimal dengan titik terendah mencapai 4cm sedangkan maksimal yang dapat dicapai robot berkaki pada penelitian ini yaitu 2,5cm.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis diketahui bahwa Pengubahan terhadap sumbu X pada invers kinematic akan mempengaruhi pergerakan coxa, pengubahan terhadap sumbu Y pada invers kinematic akan mempengaruhi pergerakan tibia dan pengubahan terhadap sumbu Z pada invers kinematic akan mempengaruhi pergerakan femur dan tibia. Nilai RMSE total sudut orientasi masing masing sumbu adalah 1,73% untuk sumbu pitch, 1,67% untuk sumbu roll, dan 1,24% untuk sumbu yaw. *Singleton output* pada kontroler fuzzy yang memiliki kesetabilan paling baik yaitu pada Kp memiliki $k_1=0,5$, $k_2=1$, $k_3=3$ pada Ki memiliki $k_1=0,5$, $k_2=0,5$, $k_3=0,5$, dan pada Kd memiliki $k_1=0,25$, $k_2=0,35$, $k_3=0,45$ dikarenakan *singleton output* pada metode defuzzyfikasi tersebut memiliki grafik kesetabilan pada bidang miring yang paling dibaik dibandingkan dengan pengujian dengan nilai lainnya. Gangguan sudut roll tidak terlalu bermasalah terhadap kesetabilan robot pada bidang miring sedangkan gangguan sudut roll + yaw akan berpengaruh pada orientasi heading robot yang berosilasi saat berjalan.

Referensi

Journal

- [1]. Yoo, Tae Suk, Sung Kyung Hong, Hyok Min Yoon, Sungsu Park, Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System, Open Access, Inc, 2011.
- [2]. 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.
- [3]. Kusuma, Johan Wijaya, Penerapan *Invers Kinematic Terhadap Pergerakan Kaki pada Robot Hexapod*, STMIK GI MDP, 2013

Textbook

- [4]. Bejo, Agus., C&AVR Rahasia Kemudahan Bahasa C dalam Mikrokontroler ATMega8535. Graha Ilmu, Yogyakarta, 2008.
- [5]. Setiawan, Iwan., Kontrol PID untuk Proses Industri, Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [6]. Jang, Jyh Shing Roger, Chuen Tsai Sun, Eiji Mizutani. *Neuro Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall International, Inc, 1997

Patent

- [7]. Turner, Peter, *Mathematic Requirements for Robot Motion*. Tribotix
- [8]. Susilo, Tri Bagus, Pengukuran Sudut Kemiringan Benda dengan Sensor Percepatan, Penelitian Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2011.
- [9]. Kurniawan, David, Kontrol *Mobile Robot* Penjejak Objek Bergerak Berbasis Logika Fuzzy, Penelitian Teknik Elektro Universitas Diponegoro, Semarang, 2007.

Thesis

- [10]. Ronnback, Sven, "*Development of a INS/GPS navigation loop for an UAV*", Masters Thesis Lulea University of Technology, 2000.