

IMPLEMENTASI LOGIKA FUZZY DAN KALMAN FILTER UNTUK KENDALI LENGAN ROBOT MENGGUNAKAN GESTUR TANGAN MANUSIA

IMPLEMENTATION OF FUZZY LOGIC AND KALMAN FILTER FOR ROBOTIC ARM CONTROL USING HUMAN HAND GESTURE

Ikhsan Ismail¹, Erwin Susanto, Ph.D², Mas Sarwoko Suraatmadja Ir.,Msc.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹ikhshanmail99@gmail.com, ²erwinelektro@telkomuniversity.ac.id, ³sarwoko@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Robot adalah sebuah alat mekanik yang dapat melakukan tugas fisik, baik menggunakan pengawasan dan kendali manusia. Salah satu jenis robot yang sangat populer dan paling sederhana adalah sistem lengan robot (*robot arm system*). Lengan robot adalah suatu sistem mekanik yang digunakan dalam memanipulasi pergerakan mengangkat, memindahkan, dan memanipulasi benda kerja untuk meringankan kerja manusia.

Pada tugas akhir ini penulis akan menggunakan metode logika fuzzy dan kalman filter pada sistem lengan robot yang dikendalikan dengan memanfaatkan gestur pada tangan manusia. Sensor *accelerometer*, *gyroscope* dan *magnetometer* yang dipasang pada tangan pengguna digunakan untuk mengendalikan pergerakan *base rotation*, *elbow flex*, *wrist pitch* pada lengan robot. Sedangkan sensor *flex* yang dipasang pada jari digunakan untuk mengendalikan pergerakan *gripper*. Pada sistem ini, kalman filter digunakan untuk mendapatkan nilai yang akurat pada sensor *accelerometer* dan *gyroscope* sedangkan pada sensor *magnetometer* untuk menghindari kesalahan pengukuran pada keadaan sensor miring digunakan perhitungan kompensasi kemiringan^[16]. Sementara untuk mengendalikan kecepatan motor DC digunakan metode kontrol logika fuzzy agar mendapatkan kendali yang meminimalisir tingkat error posisi dan mempersingkat waktu respon yang dibutuhkan lengan robot untuk mencapai posisi yang diinginkan sesuai gestur tangan pengguna.

Untuk mengendalikan sudut pada robot menggunakan gesture tangan manusia, digunakan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* yang digabungkan dengan kalman filter. Setelah mendapat nilai pembacaan yang baik, data akan diproses dengan Kontroler Logika Fuzzy untuk mengatur arah dan kecepatan motor DC agar sesuai posisi yang diinginkan. Dari hasil percobaan kalman filter dan Logika Fuzzy, diperoleh nilai parameter kalman filter yang optimal adalah $Q_{accelerometer} = 0,001$; $Q_{gyroscope} = 0,003$ dan $R_{pengukuran} = 0,03$ dan pengujian logika fuzzy pada tiap joint menghasilkan error rata-rata masing-masing, 1,1% untuk *wrist*, 19,21% untuk *shoulder*, dan 12,9 % untuk *base*. Berdasarkan respon kontrol logika fuzzy dari hasil pengujian saat awal, pada perbedaan sudut di atas 40 memiliki respon yang relatif lebih baik dibandingkan dengan perbedaan sudut di bawah 40 dengan respon yang lebih lambat. Pada Pengujian magnetometer menunjukkan alat dapat berfungsi dengan baik mengukur sudut berdasarkan gerak pitch hingga kemiringan -30° dari bidang datar.

Kata kunci: Kalman Filter, Logika Fuzzy, Lengan Robot, *accelerometer*, *gyroscope*, *magnetometer*, *flex*, *base rotation*, *elbow flex*, *wrist pitch*, *gripper*.

Abstract

Robot is a mechanical device that can perform physical tasks, using either the supervision and control of the human. One of the types of robots that are very popular and simplest is the robotic arm system. Robotic arm is a mechanical system which is used in manipulating the movement of lifting, moving, and manipulating the workpiece to lighten the work of man.

In this final project the author will use fuzzy logic method and kalman filter method on the robotic arm system that is controlled by human hand gesture. Accelerometer, gyroscope and magnetometer sensors were mounted on human hand so that the user can control the movement of the base rotation, shoulder, wrist pitch on robotic arm. The Flex sensor that has been mounted on the finger is used to control the movement of the gripper.

In this system, kalman filter is used to get an accurate value on accelerometer and gyroscope sensors while magnetometer sensor is used to avoid measurement errors on the state of the sensor tilt using a tilt compensation^[16]. As for controlling the speed of a DC motor, a fuzzy logic control method was used in order to minimize the position error rate and shorten the response time required for robotic arm when it reaches the desired position according to the user's hand gestures.

To acquire controlled angle of the robot using human hand gestures, an accelerometer and gyroscope sensor were used in combination with Kalman filter. After obtaining the value of a good reading, the data will be processed by the fuzzy logic controller to set the direction and speed of a DC motor to match the desired position. From the experimental results Fuzzy Logic and Kalman filter, an optimal Kalman filter parameter values that has been obtained are Q accelerometer = 0,001; Q gyroscope = 0.003 and $R = 0.03$, and fuzzy logic testing at each joint has an average error, 1.1% for the wrist, 19.21% for the shoulder, and 12.9% for the base. Based on an initial test result of fuzzy logic control respons; relatively, on a differences above 40 has a better response compared to a differences below 40 which has a slower response. On a magnetometer experimental showed that the sensor can function well in measuring the pitch angle based on motion to tilt 30° from the plane.

Keywords: Kalman filter, Fuzzy Logic, Arm Robot, accelerometer, gyroscope, magnetometer, flex, base rotation, flex elbow, wrist pitch, gripper.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang Masalah

Salah satu perkembangan teknologi yang populer adalah teknologi bidang robotika. Robot mengambil peran yang penting dalam menangani tugas-tugas yang biasanya ditangani oleh manusia. Semua orang berlomba-lomba untuk mengembangkan robot dengan berbagai fungsi. Misalnya dalam dunia industri kimia, robot digunakan untuk memindahkan barang yang berbahaya ke tempat penyimpanan sehingga dapat mengurangi resiko pada manusia. Selain itu robot memiliki kelebihan yang tidak dimiliki manusia yaitu menghasilkan output yang sama ketika mengerjakan suatu pekerjaan secara berulang-ulang, tidak lelah, dapat diprogram ulang sehingga dapat difungsikan untuk beberapa tugas yang berbeda, serta berbagai keuntungan lainnya.

Salah satu aplikasi yang dapat memudahkan pengguna yaitu mengendalikan robot dengan menggunakan gestur tangan. Gestur tangan yang merupakan salah satu media alami manusia dalam berkomunikasi dapat diterapkan pada interaksi manusia dengan mesin agar mampu memberikan keleluasaan pada pengguna dalam mengendalikan sistem. Pada tugas akhir akan digunakan lengan robot dengan 3 DOF dan *gripper* yang pergerakan *elbow flex* dan *wrist pitch* lengan robot dapat dikendalikan oleh pengguna dengan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* yang diletakkan pada punggung tangan dan diantara pergelangan tangan sampai siku. Serta sensor *magnetometer* digunakan untuk menggerakkan *base rotation* pada lengan robot dan sensor *flex* digunakan untuk mengendalikan pergerakan *gripper*. Pada sistem kontrol ini menggunakan metode logika fuzzy agar mendapatkan kendali yang meminimalisir tingkat error posisi dan mempersingkat waktu respon serta kalman filter digunakan untuk meminimalisir noise yang dihasilkan dari pembacaan sensor *accelerometer* dan *gyroscope*. Pada sensor *magnetometer* untuk menghindari kesalahan pengukuran pada keadaan sensor miring digunakan perhitungan kompensasi kemiringan. Dengan rancangan sistem kontrol ini diharapkan menciptakan lengan robot yang mampu meniru pergerakan tangan manusia.

1.2 Tujuan

Tujuan pembuatan tugas akhir ini adalah:

1. Merancang dan merealisasikan kendali lengan robot menggunakan gestur tangan berbasis sensor *accelerometer*, *gyroscope*, *magnetometer*, dan *flex*.
2. Dapat memperbaiki respon sistem dengan menggunakan metode logika *fuzzy* pada kendali lengan robot melalui gestur tangan manusia.
3. Meminimalkan *noise* yang dihasilkan dari pembacaan sensor *accelerometer* dan *gyroscope*.

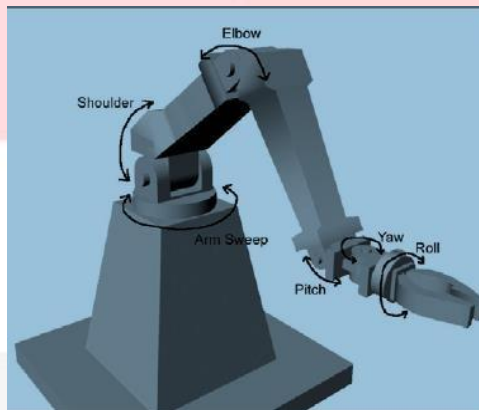
1.3 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah pada tugas akhir ini adalah perancangan kendali lengan robot berbasis gestur tangan menggunakan sensor *accelerometer, gyroscope, flex, magnetometer*.

2. Dasar Teori dan Perancangan

2.1 Lengan Robot

Lengan robot adalah sejenis robot yang berfungsi seperti lengan kita, lengan manusia. Lengan robot memiliki 5 bagian, yaitu dasar dari lengan robot (base), siku (*elbow*), pergelangan (*wrist*), bahu (*shoulder*), dan bagian untuk memegang/menjepit benda (*grip*).



Gambar 2.1 Lengan Robot

2.2 Kalman Filter

Kalman filter merupakan *recursive digital filter* yang dapat mengestimasi kondisi proses apapun dengan sangat efektif. *Kalman filter* digunakan sebagai algoritma untuk menyediakan kondisi estimasi yang dapat dipercaya dari keadaan proses. *Kalman filter* juga digunakan untuk mengontrol sistem yang sensitive terhadap *noise* dari lingkungan karena meminimalkan *square error*. Filter ini dapat mengurangi pengukuran yang terkena *noise* dari sensor-sensor sebelum masuk kedalam sistem kontrol. Dalam algoritma yang diterapkan pada mikrokontroler dengan perangkat lunak, digunakan persamaan matematika diskrit. Sistem yang akan diukur harus dimodelkan oleh sistem linier. Dapat dijelaskan dengan perhitungan :

$$x_k = Ax_{k-1} + Bx_{k-1} + u_{k-1} \tag{2.1}$$

$$y_k = Cx_k + v_k \tag{2.2}$$

Persamaan (1) merepresentasikan persamaan *process state*. A dan B menyatakan *state matrices*, u_{k-1} menyatakan *process noise*. Pada persamaan (2) merepresentasikan persamaan *output state*. y_k adalah nilai yang terukur dari sensor, dan v_k menyatakan *noise* pengukuran. Pengambilan data dari sistem diperoleh secara sampling diskrit. Keadaan dari proses atau sistem berpengaruh terhadap hasil pengukuran.

Proses *noise* dan *noise* pengukuran merupakan variabel acak *noise* bebas (tidak berhubungan satu sama lain). Proses *noise* dan *noise* pengukuran dapat dipresentasikan oleh matriks kovarian Σ_x dan Σ_v :

$$\Sigma_x = E [x_k x_k^T]$$

$$\hat{x}_k = E [\hat{x}_k]$$

Disini \hat{x}_k adalah *matrix transpose* dan E merupakan nilai estimasinya. *Process noise covariance* (\hat{Q}) *matrix* dan *measurement noise covariance* (\hat{R}) merupakan komponen penting dalam kualitas hasil dari keluaran Kalman filter.

Kalman filter memperkirakan proses dengan menggunakan skema umpan balik. Pertama, filter akan memperkirakan keadaan sistem pada sebuah waktu, lalu mengambil nilai pengukuran yang terkontaminasi *noise* dalam bentuk umpan balik. Maka perhitungan dari *kalman filter*, terbagi menjadi dua bagian yaitu *Time Update Step* (kondisi prediksi) dan *Measurement Update Step* (kondisi koreksi).

2.3 Logika Fuzzy

Pada dasarnya teori himpunan *fuzzy* merupakan perluasan dari teori himpunan klasik (crisp), keberadaan suatu elemen pada suatu himpunan A hanya akan memiliki 2 kemungkinan 2 keanggotaan, yaitu menjadi anggota A atau tidak menjadi anggota A. Dalam teori himpunan crisp ini batasan-batasan antara anggota dan bukan anggota jelas sekali.

Didalam struktur dasar sistem pengendalian pada fuzzy logic control, terdapat empat komponen atau bagian utama yang sangat penting. struktur dasar dari pengendali *fuzzy logic control*, yang terdiri dari Fuzzifikasi, *Fuzzy Rule Base*, Inferensi dan Defuzzifikasi. Fuzzifikasi adalah suatu proses untuk mengubah nilai crisp input menjadi nilai fuzzy input. Proses evaluasi rule mengolah *fuzzy input* sehingga menghasilkan *fuzzy output*. Fuzzy Rule base mempunyai fungsi penting dalam pengendalian dengan logika fuzzy karena semua proses: **fuzzifikasi**, **inferensi** dan **defuzzifikasi** bekerja berdasarkan pengetahuan yang ada pada fuzzy rule base. Inferensi adalah proses mensimulasikan pengambilan keputusan manusia berdasarkan konsep fuzzy. Defuzzifikasi mengubah *fuzzy output* menjadi nilai *crisp output*. Sebelum defuzzifikasi, harus dilakukan proses composition, yaitu agregasi hasil clipping dari semua aturan *fuzzy* sehingga didapatkan satu fuzzy set tunggal. Ada dua metode defuzzifikasi yang diterapkan yaitu center of area (COA) dan mean of maxima (MOM)

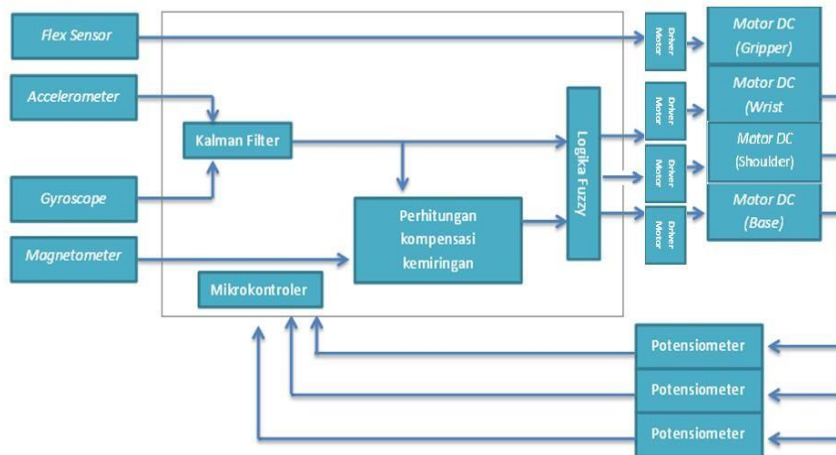
2.4 Gyroscope

Gyroscope adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur atau mempertahankan orientasi dari sebuah objek. Gyroscope merupakan sebuah roda berat yang berputar pada jari-jarinya. Sebuah gyroscope mekanis terdiri dari sebuah roda yang diletakkan pada sebuah bingkai. Roda ini berada di sebuah batang besi yang disebut dengan poros roda (spin axis). Ketika gyroscope digerakkan, maka ia akan bergerak mengitari porosnya. Poros tersebut terhubung dengan lingkaran-lingkaran yang disebut gimbal. Gimbal tersebut juga terhubung dengan gimbal lainnya pada dasar lempengan. Jadi saat piringan itu berputar, unit gyroscope itu akan tetap menjaga posisinya seperti pada saat pertama kali gyroscope diputar. Gyroscope memiliki output yang peka terhadap kecepatan sudut dari arah sumbu x yang nantinya akan menjadi sudut phi (roll), dari sumbu y nantinya menjadi sudut theta (pitch), dan sumbu z nantinya menjadi sudut psi (yaw).

2.5 Accelerometer

Accelerometer adalah perangkat yang berfungsi untuk mengukur akselerasi. Akselerasi yang diukur dengan accelerometer belum tentu memiliki laju perubahan velositas. Sebaliknya, accelerometer mendapatkan akselerasi yang dimaksud dengan fenomena berat yang dialami oleh uji massa pada kerangka acuan perangkat accelerometer. Sebagai contoh, accelerometer di permukaan bumi akan mengukur akselerasi $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ lurus ke atas karena beratnya. Sebaliknya, accelerometer jatuh bebas ke bumi mengukur nol untuk akselerasinya.

2.6 Perancangan Sistem



Gambar 2.2 Blok Diagram Sistem

Gambaran umum sistem ini adalah sistem kendali lengan robot melalui gesture tangan manusia dengan menggunakan metode logika fuzzy. Lengan robot dikendalikan berdasarkan bacaan sensor *accelerometer*, *gyroscope*, dan *magnetometer* dan pemroses Arduino Mega 2560.

Berdasarkan gambar 3.1 *Input* dari sensor *accelerometer* dan *gyroscope* yang dipasang pada tangan pengguna akan digunakan untuk mengetahui gerakan masing-masing joint(Elbow, Wrist). Sensor *magnetometer* dibutuhkan didalam sistem untuk mengendalikan arah pergerakan *base* dimana arah pergerakannya dipengaruhi berdasarkan sudut arah mata angin yang dihasilkan oleh *magnetometer*. Untuk mendapatkan data sensor yang akurat dan rendah *noise* maka digunakan algoritma kalman filter pada sensor *accelerometer*, *gyroscope*, dan *magnetometer*. Setelah nilai sudut didapat dengan baik, nilai yang masih berupa analog dihubungkan pada pin input mikrokontroler Arduino Mega 2560 dan diubah menjadi sinyal digital lalu data diproses dengan algoritma *kalman filter*. Nilai dari sensor potensiometer yang ada pada lengan robot (*actual*) akan digunakan sebagai *feedback* untuk mengetahui nilai *error*. Parameter yang di gunakan sebagai input pada pengontrol logika fuzzy adalah nilai *error* yang didapatkan dari selisih antara nilai *set point* (posisi lengan pengguna) dan nilai *present value* (posisi lengan target). Input yang kedua yaitu nilai *delta error* (*error – last error*). Output dari proses proses logika fuzzy berupa nilai PWM (*pulse width modulation*) yang akan mengatur pergerakan motor dari posisi lengan robot.

2.7 Perancangan kalman filter

Filter Kalman merupakan salah satu solusi optimal dalam memfilter data dari sinyal pada suatu proses yang linier. Pada Proses perhitungan Kalman dan penggabungan dibutuhkan 3 input yaitu sudut dari accelerometer, kecepatan sudut gyroscope, waktu sampling yang digunakan dan dengan noise yang terdapat pada sensor yang telah diketahui berdasarkan referensi *Q_angle*, *Q_bias*, dan *R*. Pada langkah pertama dilakukan proses estimate state, sudut yang digunakan berasal dari pembacaan sensor *accelerometer* dan rate dari pembacaan sensor *gyroscope*. Kalman filter dimodelkan dalam persamaan linier seperti pada persamaan 3.1, yaitu:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_k \tag{2.3}$$

Dengan x_k

$$x_k = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}_k \tag{2.4}$$

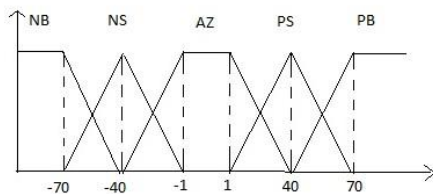
Dimana θ merupakan variable state yang terdiri dari θ yang merupakan sudut dari *accelerometer* dan $\dot{\theta}$ yang merupakan kemenclegan bias dari *gyroscope*. Variabel u merupakan masukan yang dalam hal ini adalah rate dari *gyroscope*.

2.8 Perancangan Logika Fuzzy

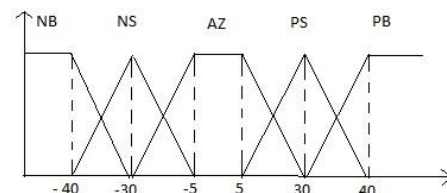
Pada perancangan kontrol Logika Fuzzy dalam Tugas Akhir ini menggunakan 2 parameter *input* yaitu *error* dan *delta error* dan 1 output yaitu berupa nilai pwm yang mengatur pergerakan lengan robot. Perangkat sensor dalam sistem ini digunakan sebagai *setpoint* untuk menggerakkan arah lengan robot. Selisih nilai dari *setpoint* dengan potensiometer menghasilkan nilai *error* yang digunakan sebagai *input* logika fuzzy. Sedangkan *delta error* merupakan selisih antara *error* sekarang dengan *error* sebelumnya. *Output* dari proses *logika fuzzy* berupa nilai PWM (*pulse width modulation*) yang akan mengatur pergerakan motor dari posisi lengan robot (*actual*). Dalam merancang kontroler fuzzy ada beberapa tahap yang harus dilakukan:

a. Fuzzifikasi

Pada sistem ini terdapat dua buah *input* yaitu *error* dan *delta error*. *Input error* mempunyai 5 variabel linguistik, yaitu Negative Big (NB), Negative Small (NS), Almost Zero (AZ), Positive Small (PS), dan Positive Big (PB). Selain itu *delta error* juga mempunyai 5 variabel linguistik, yaitu Negative Big (NB), Negative Small (NS), Almost Zero (AZ), Positive Small (PS), dan Positive Big (PB). Berikut ini merupakan fungsi keanggotaan input *error* yang ditunjukkan pada gambar 3.3 dibawah ini:

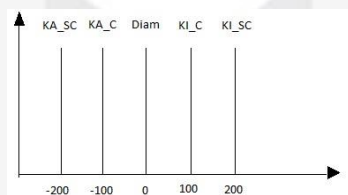


Gambar 2.3. Fungsi Keanggotaan Error



Gambar 2.4 Fungsi keanggotaan delta error

Output Pada sistem ini menggunakan model fungsi keanggotaan model Sugeno. Fungsi keanggotaan *output* nilai PWM terdiri dari 5 himpunan, yaitu kanan sangat cepat (kanan_SC), kanan cepat (Kanan_C), diam (Diam), kiri cepat (Kiri_C) dan kiri sangat cepat (kiri_SC).



Gambar 2.5 Fungsi Keanggotaan Keluaran Singleton

b. Fuzzy Rule

Setelah menentukan fungsi keanggotaan masing-masing masukan dan keluaran, selanjutnya ditentukan *rules* (aturan) yang akan diterapkan pada kontroler.

de \ e	NB	NS	AZ	PS	PB
NB	Ka_SC	KA_C	STOP	KI_C	KI_SC
NS	Ka_SC	KA_C	STOP	KI_C	KI_SC
AZ	Ka_SC	KA_C	STOP	KI_C	KI_SC
PS	Ka_SC	KA_C	STOP	KI_C	KI_SC
PB	Ka_SC	KA_C	STOP	KI_C	KI_SC

Gambar 2.6 Fuzzy Rule

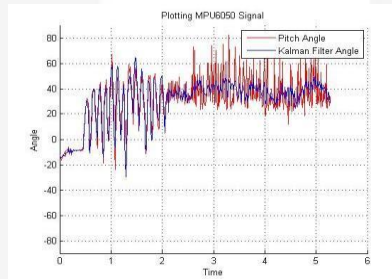
c. Defuzzification

Proses terakhir yaitu defuzzifikasi, yaitu mengubah himpunan fuzzy keluaran menjadi keluaran tegas (crisp). Pada sistem ini untuk melakukan defuzzifikasi menggunakan metode *weight average* dengan output dari proses defuzzifikasi berupa nilai PWM berfungsi untuk mengatur kecepatan dan arah motor DC.

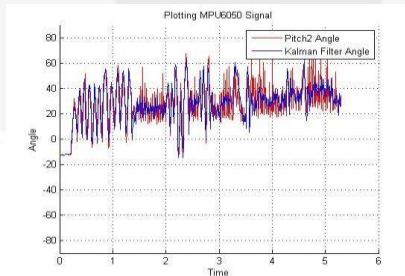
$$0 \text{ } \text{?} \text{ } \text{?} \text{ } \text{?} \text{ } \text{?} = \frac{\text{?} \cdot \text{?} + \text{?} \cdot \text{?}}{\text{?} + \text{?}}$$

3. Pembahasan

Sensor IMU yang digunakan pada tugas akhir ini adalah 2 buah sensor accelerometer dan gyroscope MPU6050 serta magnetometer HMC5883L. Pengujian kalman filter bertujuan untuk melihat mencari nilai dan yang optimal. Penentuan nilai dan dilakukan dengan cara trial and error hingga ditemukan nilai yang paling optimal. Untuk mencari nilai optimal dari dan yaitu dengan cara membandingkan keluaran sudut dari accelerometer dengan sudut dari kalman filter.



Gambar 3.1 Perbandingan Sudut Pitch Dan Sudut Kalman Filter(mpu6050)

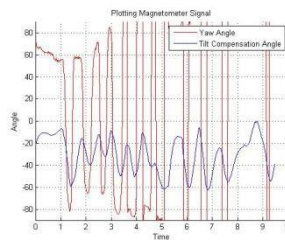


Gambar 3.2 Perbandingan Sudut Pitch2 Dan Sudut Kalman Filter2(mpu60502)

Dari beberapa percobaan yang dilakukan, didapatkan nilai dan yang optimal sesuai dengan gambar 6 dan 7. Nilai optimal dan yang didapat adalah Q_angle ($Q_accelerometer$) = 0.001; Q_bias ($Q_gyroscope$) = 0.003; dan $R_measure$ = 0.03.

Pengujian pengkompensasi kemiringan bertujuan untuk mengetahui besarnya kesalahan pengukuran arah hadap pada saat muatan roket mengalami kemiringan terhadap bidang datar. Pengujiannya adalah

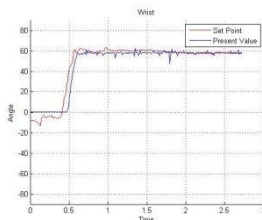
sensor dimiringkan terhadap bidang datar kemudian diputar berlawanan arah jarum jam sekitar 50° . Berikut dibawah ini merupakan hasil keluaran sudut pada sensor magnetometer



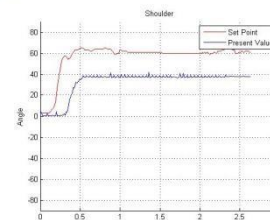
Gambar 3.4 Perbandingan Sudut Yaw Dengan Kompensasi Kemiringan

Berdasarkan gambar 3.4 keluaran sensor dengan kompensasi kemiringan dapat menghasilkan arah hadap yang cukup baik hingga kemiringan kira-kira 50° dari bidang datar sedangkan keluaran sensor tanpa kompensasi kemiringan hasilnya sangat tidak memuaskan dan jauh dari keadaan sebenarnya

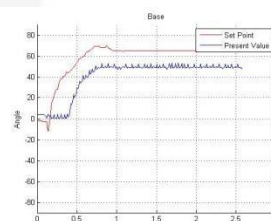
Pengujian algoritma logika *fuzzy* dilakukan untuk mengetahui apakah sistem sudah bekerja dengan baik. Proses pengujian dilakukan dengan cara menentukan *set point* pada nilai yang berbeda. Untuk memudahkan melihat hasil respon pada motor, digunakan bantuan software matlab untuk melihat tampilan grafik. Pada grafik akan muncul grafik respon untuk *set point* yang digambarkan dengan garis merah, sedangkan untuk respon dari pergerakan motor akan ditampilkan menggunakan garis biru.



Gambar 3.5 Respon Wrist Lengan Robot



Gambar 3.6 Respon Shoulder Lengan Robot



Gambar 3.7 Respon Base Lengan Robot

Berkurangnya *rise time* pada percobaan ini juga dipengaruhi oleh sudut yang ditunjukkan oleh lengan *actual*, karena semakin besar sudut yang ditunjukkan oleh lengan *actual* maka PWM sistem diatur semakin besar sehingga lengan pengikut bergerak semakin cepat dalam mengikuti pergerakan lengan *actual*.

4. Kesimpulan dan Saran

- Pemilihan nilai Q dan R pada kalman filter sangat berpengaruh pada nilai keluaran sudut dari sensor IMU. Nilai Q dan R yang optimal setelah melakukan beberapa percobaan adalah Q accelerometer = 0,001; Q gyroscope = 0,003 dan R pengukuran = 0,03.
- pengujian saat *start up* awal dari titik 0, pada perbedaan sudut di atas 40 memiliki respon yang relatif lebih baik dibandingkan dengan perbedaan sudut di bawah 40 dengan respon yang lebih lambat.

5. Daftar Pustaka

- [1] Royyan Zahir, Muhammad. 2015. Implementasi Kalman Filter Dan Kontroler PID Untuk Robot Pendulum Terbalik. Tugas Akhir: Jurusan Teknik Elektro Universitas Telkom, Bandung:2015.
- [2] Ozyagcilar, Talat.2012. Implementing a Tilt-Compensated eCompass using Accelerometer and Magnetometer Sensors, (6-7).
- [3] Budiono,Adhi.2011.Robot Lengan Dengan Pengendali Lengan Manusia. <http://core.ac.uk/download/pdf/12344599.pdf>. [10 Mei 2015].

