

Sistem Keseimbangan Robot ERISA pada Bidang Miring Menggunakan Kontrol PD dan Sensor Fusion

Novian Fajar Satria, Ali Husein Alasiry, Bambang Sumantri, dan Risma Dian Alamri
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Jl. Raya ITS - Kampus PENS Sukolilo, Surabaya 60111
e-mail: ovinmeka@pens.ac.id

Abstrak—Dunia robotika saat ini tengah berkembang, banyak robot diciptakan untuk membantu pekerjaan manusia dalam melakukan kegiatan keseharian. Berbagai jenis robot telah diciptakan, salah satunya jenis robot menyerupai tubuh manusia (humanoid). Robot humanoid berkembang di banyak negara termasuk di Indonesia. Dalam pengembangannya, teknik berjalan merupakan faktor utama dalam pembuatan robot humanoid. Robot humanoid memiliki kemampuan berjalan layaknya manusia dengan menyeimbangkan posisi tubuh saat berjalan agar tidak terjatuh. Dalam menjaga keseimbangan tersebut, diperlukan sistem pendeteksi kemiringan posisi robot dan sistem penyeimbang saat robot akan jatuh. Maka untuk mengatasi permasalahan tersebut, dilakukan implementasi dengan menggunakan metode sensor fusion pada keluaran sensor-sensor yang digunakan dalam meminimalisir noise atau gangguan nilai keluaran sensor. Sehingga keakurasian nilai keluaran sensor pada pendeteksi kemiringan sudut posisi dapat membantu robot dalam memberikan aksi penyeimbangan. Dengan mengimplementasikan sistem kontrol PD dan sensor fusion yang terdiri dari Kalman filter dan complementary filter, robot berhasil dijalankan menaiki dan menuruni bidang hingga kemiringan maksimal 12°.

Kata kunci: *robot humanoid, sistem keseimbangan, sensor fusion, kalman filter, complementary filter*

Abstract—The world of robotics is currently developing; many robots are created to help humans work in carrying out daily activities. Various types of robots have been created, one of which is a type of robot that resembles a human body (humanoid). Humanoid robots are developing in many countries, including Indonesia. In its development, the walking technique is a major factor in making humanoid robots. Humanoid robots have the ability to walk like humans by balancing their body positions while walking, so they don't fall. In maintaining this balance, a tilt detection system for the robot's position and a balancing system is needed when the robot is about to fall. So, to overcome this problem, implementation is carried out using the sensor fusion method at the output of the sensors that are used to minimize noise or interference with the sensor output value. The accuracy of the sensor output value on the position angle tilt detector can help the robot provide a balancing act. By implementing a PD control system and sensor fusion consisting of a Kalman filter and a complementary filter, the robot was successfully carried up and down the plane to a maximum slope of 12°.

Keywords: *humanoid robot, balance system, fusion sensor, kalman filter, complementary filter*

I. PENDAHULUAN

Pada era modern ini telah berkembang teknologi robot yang canggih dan mempunyai kendali otomatis yang bermanfaat dan membantu manusia. Terutama pekerjaan manusia yang memerlukan ketelitian tinggi maupun pekerjaan yang beresiko tinggi (pekerjaan yang dapat menyebabkan kematian). Bahkan robot diciptakan agar dapat menggantikan manusia untuk melakukan pekerjaan yang memerlukan kecepatan dan ketepatan. Perkembangan robot yang mendapat perhatian paling besar oleh dunia akhir-akhir ini adalah robot manusia atau yang lebih dikenal dengan sebutan robot humanoid. Robot ini didesain seperti bentuk tubuh manusia yaitu memiliki dua kaki dan dua tangan sebagai alat geraknya [1]. ERISA

(*EEPIS Robot Dancing Sense of Art*) adalah salah satu robot humanoid bentuk implementasi teknologi dalam bidang robotika yang memiliki kemampuan menari [2].

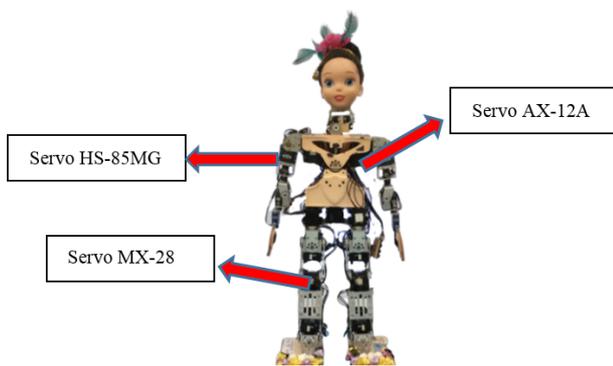
Robot ERISA sendiri juga merupakan robot yang dikompetisikan dalam ajang tahunan Ristekdikti, yaitu Kontes Robot Indonesia (KRI). Adapun dalam perlombaanannya, lapangan vinyl yang disediakan pihak panitia terkadang memiliki kemiringan tertentu (tidak benar-benar datar dengan sudut kemiringan 0°). Padahal seharusnya lapangan tersebut harus dibuat datar dengan sudut kemiringan 0°, jika sesuai dengan ketentuan Ristekdikti. Hal tersebut tentu sangat mempengaruhi keseimbangan robot, sehingga robot akan mudah terjatuh sebagaimana pernah terjadi saat KRI 2019. Kemudian dilakukan pengujian ulang, dan memang robot terjatuh

ketika sudut kemiringan bidanganya mulai 5°. Oleh karena itu posisi kemiringan dari badan robot ketika berjalan digunakan sebagai parameter sistem kontrol keseimbangannya [3]. Kemiringan robot didapatkan dari pembacaan sudut sensor, dimana pembacaan sudut tersebut ternyata juga memiliki noise, sehingga pembacaannya tidak begitu akurat seperti yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya dengan menggunakan tilt sensor saja [2]. Oleh karena itu diperlukan sistem kendali yang juga dapat mengatasi noise tersebut. Pada penelitian ini digunakan metode sensor fusion yaitu metode penggabungan beberapa jenis sensor yang berbeda untuk meminimalisir noise, yang diharapkan dapat memperbaiki pembacaan sudut tersebut sehingga bisa lebih akurat.

II. METODE

Robot humanoid yang digunakan dalam penelitian ini adalah robot ERISA, yang memiliki kemampuan menari. Robot ERISA memiliki dimensi tinggi ± 60 cm dan berat 2900 g. Komposisi berat robot ERISA didominasi oleh servo yang mengisi 2/3 dari berat keseluruhan, adapun kerangka mekanik hanya mengisi 1/3 sisanya. Untuk kerangka mekanik, robot ERISA menggunakan bahan aluminium dan PLA (Poli-Laktid Asam). Kedua bahan ini dipilih karena dianggap karakteristiknya kuat tetapi mudah dibentuk dan ringan. Adapun kepala robot ERISA menggunakan kepala boneka karet, dan ukurannya sebanding dengan tubuh robot.

Sebagai tujuan awal pembuatannya, robot ERISA dirancang sedemikian rupa sehingga menyerupai tubuh manusia lengkap dengan persendiannya. Tentunya tubuh robot ini juga memiliki sendi seperti manusia. Dalam tubuh robot, sambungan ini dapat diwakili oleh satu atau lebih motor servo. Hal mengacu pada beragam kemampuan sendi manusia. Sementara arah rotasi servo terbatas.



Gambar 1. Struktur Robot ERISA



Gambar 2. Penempatan sensor Robot ERISA

Sehingga beberapa servo terintegrasi untuk memenuhi kebutuhan ini.

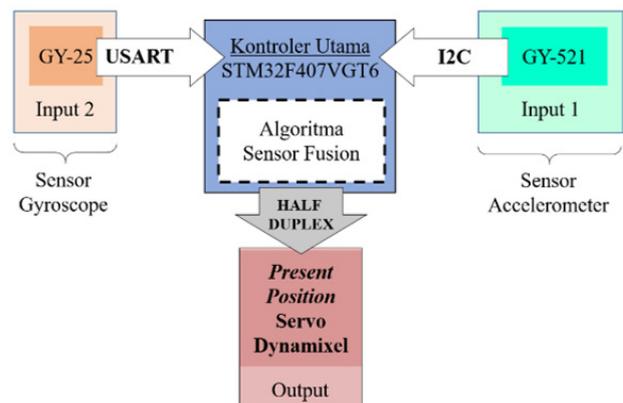
Robot ERISA menggunakan 29 servo dengan tiga jenis berbeda, yaitu Dynamixel AX-12A, Dynamixel MX-28, dan Hitec HS-85MG. Secara umum, servo Dynamixel digunakan pada bagian seperti bahu, tubuh dan kaki. Hal ini karena servo Dynamixel memiliki kemampuan untuk mendukung beban yang lebih besar daripada servo Hitec. Struktur robot ERISA seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Untuk menyederhanakan dan meminimalkan berat tubuh, *board* utama digunakan oleh robot bertindak sebagai *hardware* dan struktur pendukung robot dalam waktu yang bersamaan. Secara keseluruhan, gambaran umum konfigurasi sistem pada robot ERISA terdiri dari dua input, kontroler utama, dan output. Dua input tersebut antara lain, yaitu input pertama menggunakan sensor gyroscope GY-25, sedangkan input kedua menggunakan sensor accelerometer GY-521. Modul sensor ini dirancang untuk diletakkan di pundak robot untuk membuat sistem lebih fleksibel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Bagian kontroler utama dalam penelitian ini menggunakan platform STM32F407VGT6. STM32F407VGT6 memiliki memori flash cukup besar yang mencapai 1 Mbyte. Adapun STM32F407VGT6 juga memiliki fitur 3 ADC, 17 timer, 4 USART, 2 UART, dan dengan kecepatan clock mencapai 168 MHz. Dengan demikian, data pembacaan dari masing-masing sensor dikirim ke kontroler utama melalui komunikasi serial atau USART. Data selanjutnya yang diterima oleh kontroler utama akan menjadi kesatuan yang akan diproses oleh algoritma sensor fusion. Kemudian, data hasil sensor fusion menjadi nilai sudut yang digunakan sebagai feedback kontrol penyeimbang berupa kontrol PD dari bagian output. Blok diagram sistem pada penelitian ini dapat dilihat pada pada Gambar 3.

Kalman filter adalah penaksir linier yang memiliki kemampuan untuk mendukung varians kesalahan, sehingga keluaran filter tergantung pada kondisi saat ini dan input saat ini. Blok diagram filter Kalman dalam penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Kalman filter pada dasarnya terdiri dari dua tahap [9]. Yaitu tahap pertama digunakan untuk membuat prediksi



Gambar 3. Diagram blok sistem

tentang keadaan sistem, sedangkan tahap kedua adalah meng-update estimasi dibandingkan dengan nilai kondisi terukur sistem. Perbedaan antara keadaan juga terdiri dari perkiraan kebisingan (Q) dan kesalahan pengukuran dalam sistem (R) [13]. Nilai estimasi yang didapatkan pada Kalman Filter adalah hasil dari nilai keluaran pada proses update datanya. Sehingga nilai data yang didapatkan dari proses estimasi kemudian digunakan untuk memprediksi keadaan selanjutnya selama proses update di waktu berikutnya dan proses ini terus berulang. Perhitungan Kalman filter dijabarkan dari Persamaan (1) sampai (12) [2].

Awal mula dari algoritma ini yaitu sistem memberikan nilai inisial awal, setelah itu sistem melakukan prediksi state dengan (1).

$$\mathbf{x}'_k = \mathbf{A}\mathbf{x}'_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_k, \tag{1}$$

dari (1) maka diperoleh dalam bentuk matriks pada (2),

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \theta_b \end{bmatrix}_{(k|k-1)} = \begin{bmatrix} \theta - (\theta_b \Delta t) \\ \theta_b \end{bmatrix}_{(k-1|k-1)}, \tag{2}$$

dimana θ adalah data sensor dan θ_b bias offset sensor.

Adapun selain melakukan prediksi state sistem juga melakukan prediksi error covariance dengan (3).

$$\mathbf{P}_{(k|k-1)} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{(k-1|k-1)}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_k, \tag{3}$$

dari Ppersamaan (3) maka diperoleh dalam bentuk matriks pada (4).

$$\begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{(k|k-1)} = \begin{bmatrix} P_{00} + V & P_{01} - W \\ P_{01} - W & P_{11} + Y \end{bmatrix}_{(k-1|k-1)}, \tag{4}$$

dengan penjabaran bahwa :

$$V = \Delta t(\Delta t P_{11} - P_{01} - P_{10} + Q_\theta), \tag{5}$$

$$W = \Delta t P_{11}, \tag{6}$$

$$Y = \Delta t Q_{\theta_b}, \tag{7}$$

dimana Δt adalah waktu sampling dan $Q_{\theta_b} = noise\ covariance$ sudut sensor.

Setelah melakukan proses prediksi state, selanjutnya sistem melakukan perhitungan Kalman gain, yaitu ditunjukkan oleh (8).

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \tag{8}$$

dari Persamaan (8) maka diperoleh dalam bentuk matriks pada (9).

$$\begin{bmatrix} K_0 \\ K_1 \end{bmatrix}_k = \frac{\begin{bmatrix} P_{00} \\ P_{01} \end{bmatrix}_{(k|k-1)}}{P_{00(k|k-1)} + R}, \tag{9}$$

dimana \mathbf{R} adalah error.

Proses selanjutnya yaitu sistem melakukan update estimasi, dimana persamaan tersebut ditunjukkan (10).

$$\mathbf{x}'_k = \mathbf{x}'_k + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\mathbf{x}'_k), \tag{10}$$

dari (10) diperoleh bentuk matriks (11).

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{(k|k)} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix}_{(k|k-1)} + \begin{bmatrix} K_0 y_k \\ K_1 y_k \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Adapun sistem juga melakukan update error covariance dengan (12).

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{kp} + \mathbf{K}_k \mathbf{H}\mathbf{P}_{kp}, \tag{12}$$

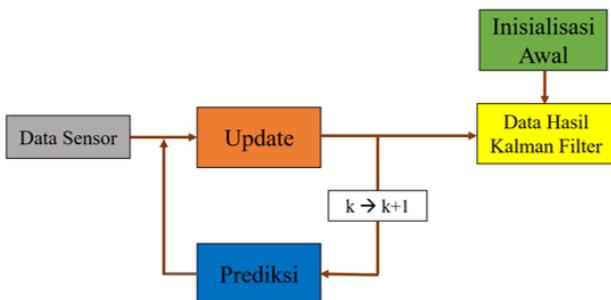
dari (12) diperoleh dalam bentuk matriks pada (13),

$$\begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{(k|k)} = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{bmatrix}_{(k|k-1)} - \begin{bmatrix} K_0 P_{00} & K_0 P_{01} \\ K_1 P_{10} & K_1 P_{11} \end{bmatrix}_{(k|k-1)}. \tag{13}$$

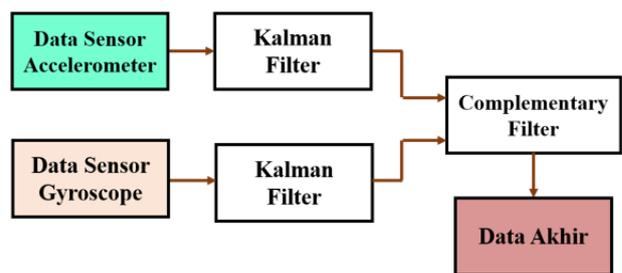
Dalam metode Kalman filter ini, ada beberapa konstanta yang harus di-tuning, yaitu Q dan R. Sehingga dari persamaan-persamaan yang telah dijabarkan, maka bisa dijadikan sebuah flowchart untuk pemrograman metode ini. Berikut merupakan flowchart dari metode ini, dimana ditunjukkan oleh Gambar 5.

Complementary filter terdiri dari filter high-pass yang berasal dari output sensor gyroscope GY-25 dan filter low-pass yang berasal dari output sensor accelerometer GY-521 yang telah diproses. Metode ini membutuhkan waktu dan nilai waktu sampling yang konstan.

Dalam metode ini, data dari sensor accelerometer GY-521 sudah dalam bentuk satuan derajat sudut, begitupun data dari sensor gyroscope GY-25. Diagram blok dari complementary filter ditunjukkan oleh Gambar 5. Berikut ini adalah persamaan dari algoritma complementary filter yang terdiri dari data sensor accelerometer dan sensor gyroscope secara umum [4].



Gambar 4. Diagram blok Kalman Filter



Gambar 5. Diagram blok sensor fusion

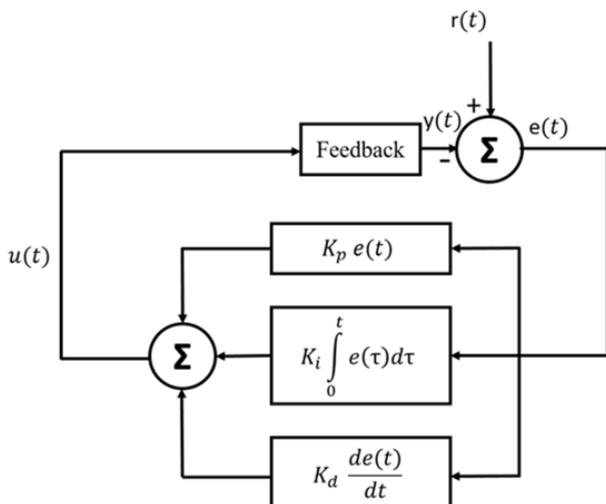
$$angle = \alpha * (gyro) + (1 - \alpha) * (accelero), \quad (14)$$

dengan α adalah koefisien filter, $angle$ merupakan hasil sudut *complementary filter*, $gyro$ data sensor *gyroscope*, dan $accelero$ sebagai data sensor *accelerometer*

Pada penelitian ini, seperti ditunjukkan pada Gambar 5, digunakan algoritma sensor fusion yang berasal dari hasil metode Kalman filter kemudian di-filter lagi dengan metode *complementary filter* pada setiap data sensor [5] [6] [7] [12]. Mekanismenya yaitu data dari sensor *accelerometer* dan sensor *gyroscope* diolah dengan metode Kalman filter, sehingga masih terdapat total dua data dari *outputnya*. Dimana terdiri dari dua data sensor *accelerometer* berupa sudut *pitch*, dan data lainnya adalah data dari sensor *gyroscope* juga berupa sudut *pitch*. Kemudian untuk mendapatkan data akhir sehingga bisa sinkron [11], maka kedua data tersebut diolah dengan metode *complementary filter* untuk tujuan utama meminimalisir *noise* [10].

Sistem kontrol adalah suatu alat yang dapat digunakan untuk mengendalikan, memerintah, dan mengatur keadaan dari suatu sistem. Penerapan sistem kontrol pada robot humanoid ERISA ini sangat dibutuhkan dengan tujuan sebagai pengontrol keseimbangan tubuh robot agar selalu mempertahankan posisinya berada di posisi mendekati 0° koordinat robot sehingga robot mampu berjalan pada bidang miring.

Pada penelitian ini, dipilihlah kontrol PD. Kontrol PID adalah pilihan yang baik jika berhubungan dengan kontrol posisi sistem [8]. Selain itu kontrol PD juga memiliki kemampuan untuk mengontrol suatu sistem dengan cepat dalam merespon suatu keadaan hingga menuju nilai dari set point. Pada kontrol PD sistem penelitian ini, data sudut *pitch* akan dijadikan sebagai *feedback* kontrol. Adapun blok diagram dari kontrol PID dapat dilihat pada Gambar 6, dimana dalam blok diagram tersebut dijelaskan bahwa kontrol PD sebenarnya merupakan gabungan dari kontrol proporsional dan kontrol *derivative* yang dipakai secara bersamaan. Berikut ini adalah persamaan kontrol PD yang ditunjukkan oleh Persamaan (15).



Gambar 6. Diagram blok kontrol PID

$$CO(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (15)$$

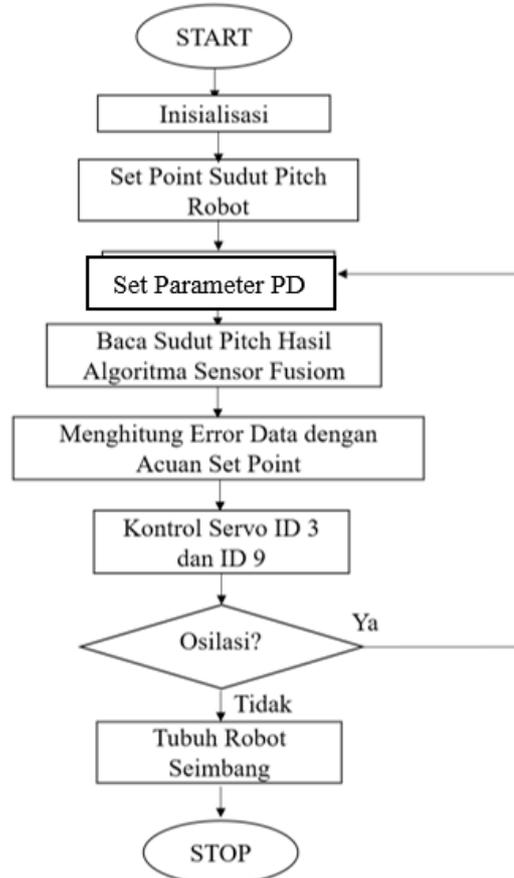
dengan $e(t)$ merupakan selisih antara *set point* dengan nilai output, K_p sebagai *gain proportional* dan K_d *gain derivative*. Sehingga secara keseluruhan maka metode yang digunakan pada penelitian ini memiliki *flowchart* seperti yang terlihat pada Gambar 7.

Adapun kontrol keseimbangan yang dimaksud berkaitan erat dengan servo Dynamixel ID 3 dan ID 9 (servo bagian pinggang dengan rotasi koordinat y robot). Untuk menjalankan robot pada bidang miring, maka perlu menggeser CoG (*centre of gravity*) dari badan robot. Adapun kedua servo tersebut juga merupakan aktuator yang letaknya berada paling dekat dengan CoG tubuh robot.

III. HASIL

Pengujian pada sistem kontrol keseimbangan ini yaitu sebagai indikator untuk mengetahui keberhasilan suatu kontrol yang telah di berikan pada robot. Sebagaimana yang telah dijelaskan pada perancangan kontrol sistem, bahwa sistem menggunakan kontrol PID. Dan kontrol PID ini digunakan untuk mengontrol keseimbangan tubuh pada robot ketika berada di bidang miring.

Adapun dalam sistem yang dibuat untuk berjalan adalah dengan pengimplementasian trajektori yang di rancang



Gambar 7. Flowchart implementasi kontrol PD dengan sensor fusion

dan dengan pembacaan data sudut *pitch* yang diperoleh dari sensor gyroscope GY-25. Pada sistem penelitian ini, sensor gyroscope GY-25 lebih dipilih menjadi yang dominan, karena sebelumnya telah dianalisa bahwa data sudut *pitch* sensor gyroscope GY-25 lebih stabil yang dimana memiliki selisih nilai sudut yang kecil dari sudut asli kemiringan bidang saat sistem dijalankan dalam keadaan dinamis (selisih pembacaan data nilai sudut kemiringan robot dalam keadaan berjalan).

Adapun hasil dari pengujian kontrol PID ini dapat dilihat pada Gambar 10. Dari analisa sebelumnya telah dipilih nilai K_p yaitu 1.10 dan K_d yaitu 0.005. Adapun dari Gambar 10 untuk pengujian pertama dengan nilai K_i adalah 0.000005, dimana hasilnya adalah garis yang berwarna biru, maka dapat dilihat bahwa sistem memiliki tidak memiliki *overshoot*, namun sedikit beresilasi pada awalnya. Adapun dari pengujian dengan penambahan kontrol integratif ini diharapkan *error steady state* bisa lebih kecil mendekati nol. Pada pengujian tuning awal ini didapatkan nilai *error steady state* 4.87% dan *rise time* sebesar 2.85 s.

Maka dari ketiga pengujian kontrol PID, secara garis besar tidak didapatkan hasil yang lebih baik dari pengujian kontrol PD sebelumnya. Sehingga dengan demikian maka pada penelitian ini hanya digunakan kontrol proporsional

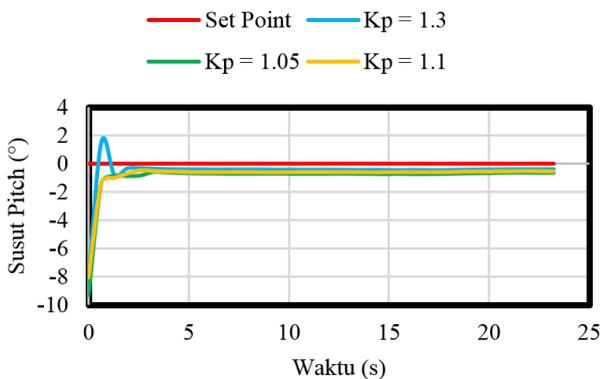
dan kontrol derivatif saja (kontrol PD), tanpa kontrol integratif.

Pada pengujian kali ini merupakan pengujian secara menyeluruh namun dengan sistem dalam keadaan dinamis. Adapun parameter PD yaitu sebagaimana yang sudah didapatkan sebelumnya dimana $K_p = 1.10$ dan $K_d = 0.0005$. Sedangkan untuk parameter Kalman filter sensor gyroscope GY-25 yaitu $Q = 0.01$ dan $R = 0.012$, serta untuk parameter Kalman filter sensor accelerometer GY-521 yaitu $Q = 0.02$ dan $R = 0.014$. Untuk *alpha complementary filter* yaitu di-set 0.5. Baik parameter Kalman filter maupun *complementary filter*, antara lain parameter yang meliputi nilai Q , R , dan $alpha$, ketiga nilai parameter tersebut didapatkan dari proses tuning secara *trial and error* [14] [15].

Sebelum melakukan pengujian robot berjalan menaiki dan menuruni bidang miring, maka perlu dilakukan pengujian terlebih dahulu bagaimana respon sistem setelah diimplementasikan kontrol PD dengan penambahan algoritma sensor fusion.

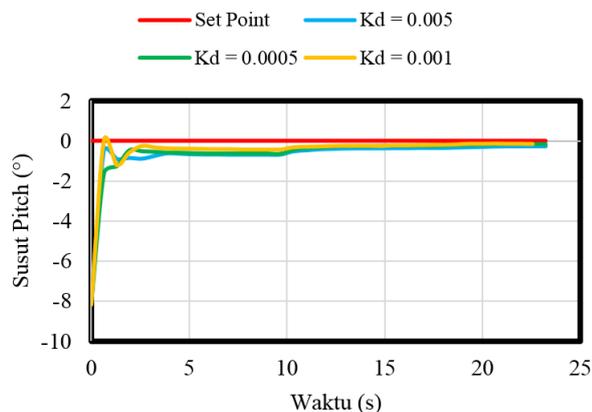
Dengan memanfaatkan trajektori berjalan sebelumnya, kemudian dikombinasikan dengan menggunakan Kontrol PD dengan sensor fusion yang ditanamkan pada kontroler utama STM32F407VGT6, didapatkan hasil robot dapat berjalan dengan kestabilan yang baik. Untuk hasil pengujian ditunjukkan oleh garis berwarna hijau pada Gambar 12 Garis berwarna hijau ini didapat dari respon sudut *pitch* terhadap set point 0° , yang dibaca oleh sensor gyroscope GY-25 dan sensor accelerometer GY-521 yang menjadi kesatuan sensor fusion pada robot. Adapun data yang ditunjukkan terdapat sensor gyroscope GY-25 dan sensor accelerometer GY-521.

Pengujian Kontrol Proporsional



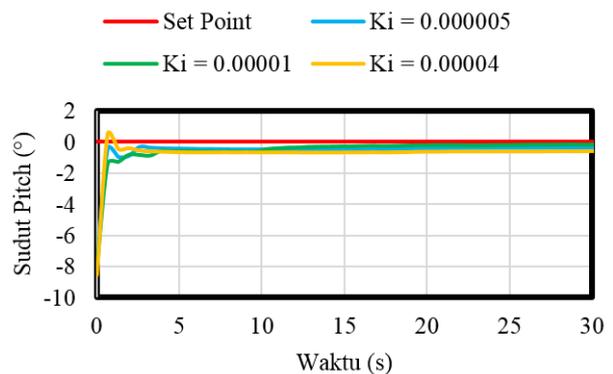
Gambar 8. Hasil pengujian sistem setelah diberi kontrol P

Pengujian Kontrol Derivatif

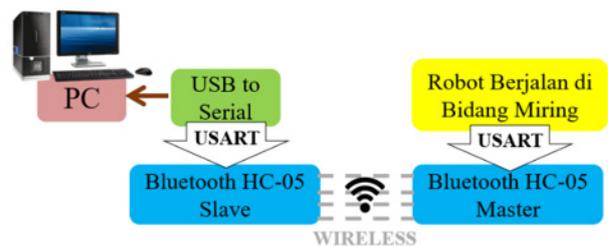


Gambar 9. Hasil pengujian sistem setelah diberi kontrol PD

Pengujian Kontrol Integratif



Gambar 10. Hasil pengujian sistem setelah diberi kontrol



Gambar 11. Diagram blok pengujian sistem dinamis

Pada penelitian ini didapatkan nilai parameter terbaik dari sistem (dilakukan secara *trial and error* sampai didapatkan nilai respon yang mendekati nilai *set point*) yaitu K_p sebesar 1.10 dan K_d sebesar 0.0005. Pada penelitian ini juga didapatkan hasil respon sistem kontrol PD yang ditunjukkan oleh Gambar 12. Dimana pada Gambar 12 tersebut merupakan hasil pengujian saat robot dijalankan menaiki bidang dengan kemiringan 3° .

Dari hasil pengujian yang ditunjukkan oleh Gambar 13, maka bisa dilihat bahwa robot bisa mempertahankan keseimbangannya dan benar-benar tidak terjatuh. Dari hasil pengujian ini maka bisa diketahui bahwa respon sistem setelah diberi kontrol memiliki *rise time* 0.65 s. Selisih sudut *pitch* maksimal pada hasil pengujian ini yaitu sebesar 17.82° . Adapun berikut ini adalah hasil pengujian robot dijalankan menaiki bidang dengan kemiringan 8° , dimana ditunjukkan oleh Gambar 14.

Kemiringan 8° ini merupakan kemiringan maksimal kemampuan robot bisa menaiki bidang, dimana juga didapatkan hasil bahwa selisih sudut *pitch* dalam pengujian ini sebesar 9.16° . Adapun ketika robot diuji dengan kemiringan lebih dari 8° , hasil yang didapatkan yaitu robot tidak dapat mempertahankan keseimbangannya, sehingga terjatuh. Adapun baik hasil yang ditunjukkan oleh Gambar 13 maupun Gambar 14, keduanya terlihat masih memiliki *noise* yang cukup besar.

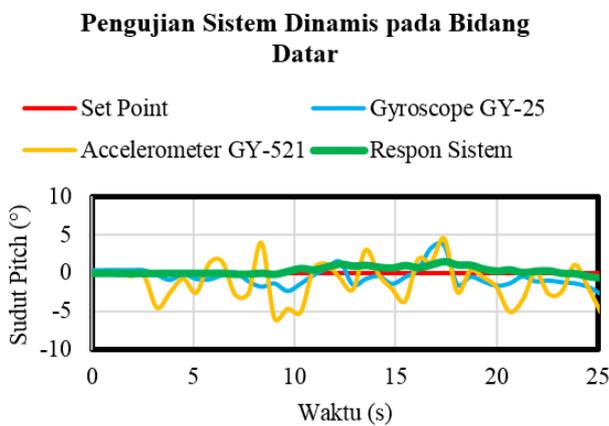
Berikut ini adalah hasil pengujian saat robot dijalankan menaiki bidang dengan kemiringan 3° dan 8° yang ditunjukkan oleh Gambar 15 dan Gambar 16. Pada pengujian ini dilakukan penambahan algoritma sensor

fusion.

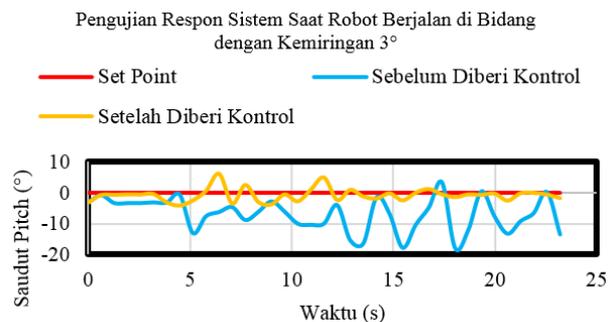
Dari hasil yang didapat pada Gambar 15 dan Gambar 16, maka bisa dilihat bahwa *noise* yang terjadi pada Gambar 8 dan Gambar 9 menjadi berkurang. Adapun respon sistem yang ditunjukkan oleh garis hijau pada Gambar 15 dan Gambar 16 terlihat lebih stabil.

Selain melakukan pengujian robot dijalankan menaiki bidang dengan kemiringan 3° dan 8° , implementasi metode-metode pada penelitian ini juga berhasil untuk kasus robot dijalankan menaiki dan menuruni bidang dengan kemiringan 12° . Adapun hasil pengujiannya ditunjukkan oleh Gambar 16 dan Gambar 17. Pengujian pada kasus dilakukan ini dengan penambahan algoritma sensor fusion pada control PD. Telah dipaparkan bahwa sensor fusion yang diimplementasikan pada robot ERISA terdiri dari Kalman filter dan *complementary filter*. Untuk parameter Kalman filter sensor gyroscope GY-25 yaitu $Q = 0.01$ dan $R = 0.012$, serta untuk parameter Kalman filter sensor accelerometer GY-521 yaitu $Q = 0.02$ dan $R = 0.014$. Sedangkan untuk parameter *alpha complementary filter* yaitu di-*set* sebesar 0.5.

Dari pengujian-pengujian yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa selama robot berjalan, data sudut *pitch* robot yang diterima kontroler utama STM32F407VG mengalami *noise*. *Noise* ini terbaca dengan rata-rata selisih

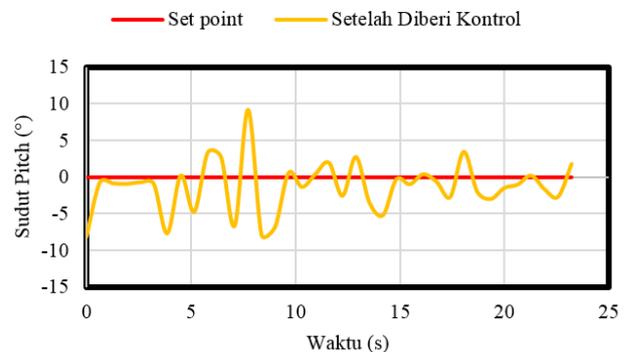


Gambar 12. Hasil pengujian sistem dinamis pada bidang datar



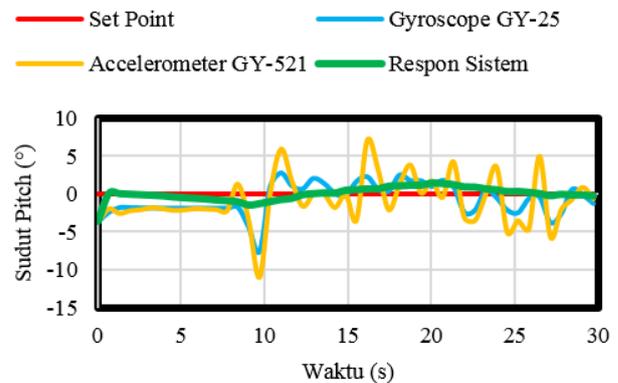
Gambar 13. Hasil pengujian respon sistem saat robot berjalan menaiki bidang dengan kemiringan 3°

Pengujian Respon Sistem Saat Robot Berjalan di Bidang dengan Kemiringan 8°



Gambar 14. Hasil pengujian respon sistem saat robot berjalan menaiki bidang dengan kemiringan 8°

Pengujian Sistem Dinamis Robot Menaiki Bidang Miring 3°



Gambar 15. Hasil pengujian sistem dinamis robot menaiki bidang miring 3°

maksimal perubahan setiap langkah terhadap *set point* pada robot sebesar $9,65^\circ$ untuk sensor gyroscope GY-25 dan $16,45^\circ$ untuk sensor accelerometer GY-521.

Adapun setelah dilakukan pengimplementasian kontrol PD dengan sensor fusion, maka didapatkan hasil yang lebih baik yaitu selisih sudut pitch respon sistem dengan set point hanya sebesar $2,07^\circ$ saja. Dengan demikian, maka bisa dikatakan bahwa kontrol PD dengan algoritma sensor fusion telah berhasil diimplementasikan dengan baik untuk penelitian kali ini karena robot berhasil berjalan menaiki dan menuruni bidang dengan kemiringan hingga 12° .

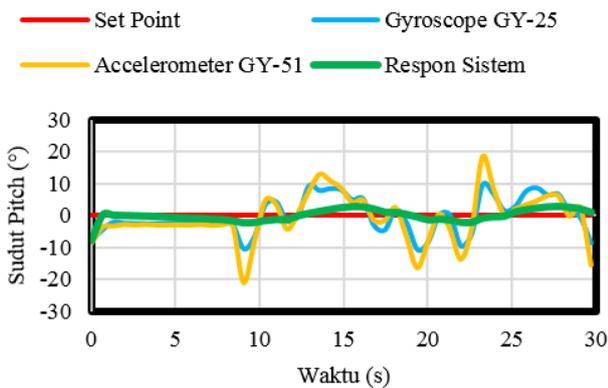
Dari Gambar 19, pada saat robot mendeteksi kemiringan, maka robot dengan cepat mengubah postur tubuhnya menjadi condong kedepan. Hal ini dilakukan untuk menggeser CoG (*centre of gravity*) ke depan agar robot tetap pada posisi seimbang. Perubahan postur tubuh robot ini terjadi cukup cepat yaitu dalam waktu yang kurang dari 1 s. Dengan robot mencondongkan tubuhnya ke depan, maka posisi CoG robot menjadi kembali ke posisi *default* saat di bidang datar. Saat berjalan di bidang datar, yaitu bidang dengan kemiringan 0° , dapat diamati posisi *default* tubuh robot sedikit condong kedepan dengan

kemiringan sudut tertentu (θ). Lalu robot di jalankan pada bidang dengan kemiringan 12° , maka robot berusaha membuat posisi tubuhnya menjadi *default* kembali sebagaimana saat berada pada bidang datar.

Adapun mekanisme robot menuruni bidang miring yang ditunjukkan oleh Gambar 20, mula-mula saat robot mendeteksi kemiringan 12° , maka robot dengan cepat mengubah postur tubuhnya menjadi condong ke belakang hingga kembali ke posisi default. Setelah itu robot berusaha tetap mempertahankan posisi tersebut sampai selesai melangkah. Hal ini berbeda dengan saat robot menaiki bidang miring pada Gambar 19, maka postur tubuh akan condong ke depan. Jika diamati lebih lanjut, maka hal ini merupakan bentuk reaksi robot untuk menggeser CoG ke belakang agar robot tetap pada posisi seimbang. Karena ketika menuruni bidang miring tanpa kontrol keseimbangan, postur robot menjadi condong ke depan.

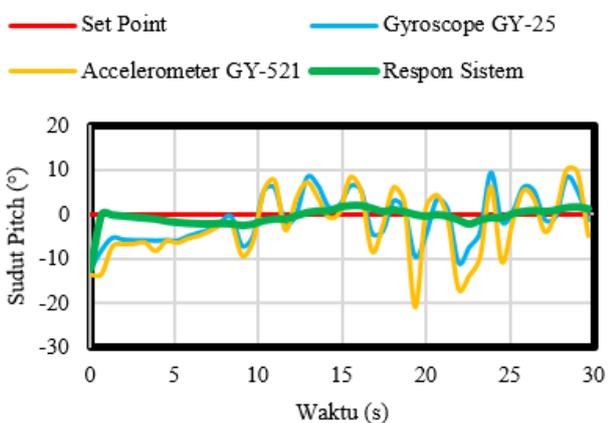
Adapun perubahan postur tubuh robot ini terjadi cukup cepat yaitu dalam waktu yang juga kurang dari 1 s. Dengan robot mencondongkan tubuhnya ke belakang tersebut, maka posisi CoG robot menjadi kembali ke posisi *default*. Saat robot berjalan di bidang datar (kemiringan 0°), maka posisi default tubuh robot sedikit condong ke belakang dengan kemiringan sudut tertentu (γ) terhadap sumbu y tegak. Posisi *default* ini dibuat berbeda dengan posisi default saat robot menaiki bidang miring. Posisi *default* yang digunakan saat robot menaiki bidang miring tidak bisa digunakan untuk pengujian menuruni bidang miring ini. Karena jika pada pengujian ini tetap menggunakan

Pengujian Sistem Dinamis Robot Menaiki Bidang Miring 8°



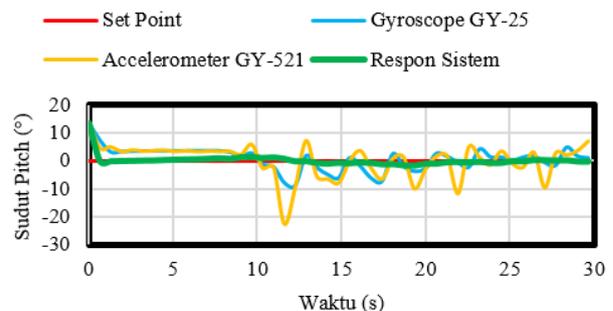
Gambar 16. Hasil pengujian sistem dinamis robot menaiki bidang miring 8°

Pengujian Sistem Dinamis Robot Menaiki Bidang Miring 12°

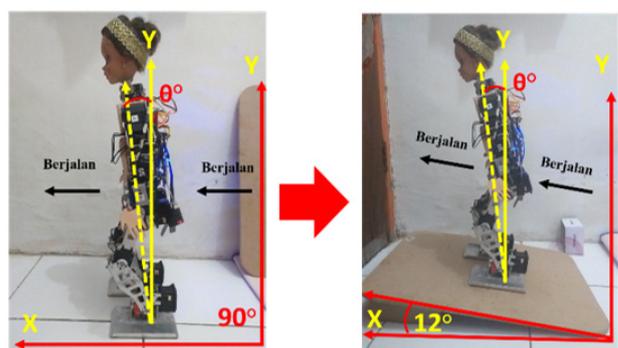


Gambar 17. Hasil pengujian sistem dinamis robot menaiki bidang miring 12°

Pengujian Sistem Dinamis Robot Menuruni Bidang Miring 12°



Gambar 18. Hasil pengujian sistem dinamis robot menuruni bidang miring 12°



Gambar 19. Dokumentasi pengujian sistem dinamis robot menaiki bidang miring 12°

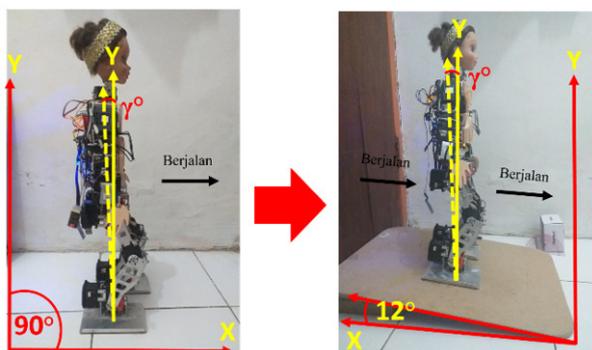
Tabel 1. Hasil pengujian kecepatan robot berjalan di bidang miring 12°

Perpindahan (cm)	Waktu (s)	Kecepatan (cm/s)	Bidang Miring 12°	
			Selisih Maksimal Sudut Pitch dengan Set Point	Keterangan
34	54.17	0.63	-	Jatuh
34	35.56	0.96	1.81°	Tidak Jatuh
34	28.55	1.19	1.47°	Tidak Jatuh
34	23.20	1.47	2.00°	Tidak Jatuh
34	19.19	1.77	-	Jatuh
34	17.39	1.96	-	Jatuh

posisi *default* dengan kecondongan tubuh ke depan tersebut, hal ini justru malah membuat robot gagal untuk menuruni bidang miring terjatuh.

Posisi *default* postur tubuh robot yang condong ke depan saat menuruni bidang miring malah akan membuat CoG robot juga lebih ke depan, sehingga menyebabkan robot jatuh. Sehingga pada pengujian ini memang perlu dibuat posisi *default* tubuh robot yang berbeda, namun secara keseluruhan sistem masih sama menggunakan kontrol PD dan algoritma sensor fusion dengan parameter-parameter keduanya yang juga sama sebagaimana pengujian sebelumnya.

Untuk pengujian robot berjalan di bidang dengan kemiringan lebih dari 12° tidak berhasil dilakukan seeptri yang terlihat pada Tabel 1. Baik dengan cara berjalan menaiki bidang maupun menuruni bidang. Hal ini dikarenakan bidang dianggap terlalu miring oleh robot yang memiliki mekanik yang juga cukup tinggi, yaitu 604.40 mm (60.40 cm). Di lain sisi, pada penelitian ini hanya melakukan pengontrolan keseimbangan tubuh hanya pada dua aktuator yang berada di bagian pinggang robot. Untuk membuat robot berjalan di bidang dengan kemiringan yang juga besar, kemungkinan akan bisa dilakukan jika ada aktuator lain yang dikontrol yaitu aktuator (servo) pada engkel kaki bagian bawah (aktuator ID 5 dan ID 11), dimana aktuator-aktuator tersebut juga merupakan aktuator yang terlibat dalam kinematika robot yang berpengaruh kecondongan tubuh robot ke arah depan maupun belakang. Pada Tabel 2 berikut ini adalah hasil



Gambar 20. Dokumentasi pengujian sistem dinamis robot menuruni bidang miring 12°

Tabel 2. Ringkasan pengujian sistem dinamis keseluruhan

Kemiringan Bidang	Tanpa Kontrol PD	Dengan Kontrol PD	Kontrol PD dengan Sensor Fusion
0°	Tidak Jatuh	Tidak Jatuh	Tidak Jatuh
3°	Tidak Jatuh	Tidak Jatuh	Tidak Jatuh
8°	Jatuh	Tidak Jatuh	Tidak Jatuh
12°	Jatuh	Jatuh	Tidak Jatuh

dari implementasi dari perbandingan sistem keseimbangan yang menggunakan kontrol PD dan tanpa kontrol PD serta Kontrol PD dengan sensor fusion pada bidang miring yang diujikan.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dimana juga dilakukan pengujian-pengujian sistem, maka bisa didapatkan bahwa hasil yang baik dari respon sistem, yaitu hanya membutuhkan waktu kurang dari 1 s untuk mencapai *set point*. Untuk rata-rata selisih *output* maksimal sudut *pitch* sistem dengan *set point* yaitu didapatkan sebesar 2.07°, sehingga sensor fusion pada penelitian ini bisa meminimalisir *noise* data dari sensor gyroscope GY-25 dan sensor accelerometer GY-521 yang digunakan. Dengan mengimplementasikan sistem kontrol keseimbangan pada robot ERISA, hal ini membuat robot menjadi adaptif terhadap perubahan lingkungan. Dengan menggunakan *feedback* sensor gyroscope GY-25 dan sensor accelerometer GY-521, robot ERISA sudah mampu untuk mengatasi keseimbangan ketika berjalan hingga mencapai kemiringan bidang 12°, dimana hal ini dibuktikan dari hasil pengujian robot masih mampu berjalan pada bidang miring 12°.

Dengan penerapan kontrol PD dengan tambahan algoritma sensor fusion pada sistem kontrol keseimbangan robot ERISA, hal ini menjadikan respon sistem menjadi lebih stabil.

REFERENSI

- [1] D. P. Riananda. Algoritma Optimasi Lintasan Berjalan Untuk Robot Sepakbola Menyerupai Manusia Pada Rumput Sintetis. Surabaya, 2014.
- [2] A. H. Alasiry, N. F. Satria, and A. Sugiarto, "Balance Control of Humanoid Dancing Robot ERISA while Walking on Sloped Surface using PID," 2018 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), Yogyakarta, Indonesia, 2018, pp. 577-581.
- [3] Tang, Chong & Xu, Fang & Zou, Fengshan. (2017). A Stable Trot Strategy of Quadruped Robot Based on Capture Point. 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER), 2017, pp. 427-431.
- [4] H. Z. Fahmi, R. Maulana, and W. Kurniawan, "Implementasi Complementary Filter Menggunakan Sensor Accelerometer dan Gyroscope pada Keseimbangan Gerak Robot Humanoid," Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer, Malang, vol. 1, pp.1376-1384. e-ISSN: 2548-964X, 2017.

- [5] T. Islam, S. Islam, and S. U. Mahmud, "Comparison of Complementary and Kalman Filter based Data Fusion for Attitude Heading Reference System," *2017 Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS)*, Dhaka, Bangladesh, 2017, pp. 02002-1 until 02002-0.
- [6] E. H. Binugroho, D. Pratama, A. Z. R. Syahputra and D. Pramadihanto, "Control for balancing line follower robot using discrete cascaded PID algorithm on ADROIT V1 education robot," *2015 International Electronics Symposium (IES)*, Surabaya, 2015, pp. 245-250.
- [7] Martin, D. I. H. Putri, Riyanto, and C. Machbub, "Gait Controllers on Humanoid Robot Using Kalman Filter and PD Controller," *2018 International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV)*, Singapore, 2018, pp.36-41, doi: 10.1109/ICARCV.2018.8581061.
- [8] S. Yuliani, H.M.Saputra, "Kolaborasi Kalman Filter dengan Complementary Filter untuk Mengoptimasi Hasil Sensor Gyroscope dan Accelerometer," *2107 ITENAS National Conference*. Bandung, 2017, pp. 63-67.
- [9] G. Welch and G. Bishop, "Kalman Filter." *An Introduction to the Kalman Filter*, University of North Carolina at Chapel Hill Department of Computer Science Chapel Hill, NC 27599-3175, February 2009.
- [10] Yufei Liu, Noboru Noguchi, Kazunobu Ishii, "Development of a Low-cost IMU by Using Sensor Fusion for Attitude Angle Estimation", *Proceeding of International conference IFAC (International Federation of Automatic Control)*, volume 19, pages 4435-4440, 2014.
- [11] Dung Duong Quoc, Jinwei Sun, Van Nhu Le, and Lei Luo, "Complementary Filter Performance Enhancement through Filter Gain", *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, vol. 8, No.7, pp.97-110, 2015.
- [12] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering*, volume 82, no. Series D, pages 35-45, 1960.
- [13] Sławomir ROMANIUK, Zdzisław GOSIEWSKI, "Kalman Filter Realization for Orientation and Position Estimation on Dedicated Processor", *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 8 no.2, 2014.