

PERANCANGAN ROBOT *BIPEDAL* DENGAN SISTEM BERJALAN BERBASIS *INVERSE KINEMATIC* DENGAN SENSOR MPU 6050 SEBAGAI INDIKATOR KEMIRINGAN

Akhmad Riko Kurniawan^{*)}, Aris Triwiyatno, and Sumardi

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

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

Abstrak

Penelitian dibidang robotika khususnya dalam robot bipedal semakin cepat berkembang. Robot bipedal merupakan robot yang bergerak dan mengatur keseimbangan menggunakan dua kaki, robot ini bergerak layaknya manusia. Dalam pengembangan gerak, maka diperlukan pengembangan metode yang dapat mempermudah dalam menggerakkan kaki robot. Tugas Akhir ini merancang sebuah robot bipedal yang memiliki 12 derajat kebebasan (DOF) dengan sensor MPU6050 sebagai indikator kemiringan. Robot bipedal bergerak dengan menggunakan metode inverse kinematics dengan mengikuti koordinat yang diberikan. Metode inverse kinematics membantu menemukan nilai sudut yang menggerakkan servo melalui koordinat akhir. Dalam penelitian ini robot bipedal dapat berjalannya maju dengan nilai error 0,4, jalan mundur dengan error 1,4, jalan samping kiri 15,9, dan jalan samping kanan 7,6.

Kata Kunci : Robot Bipedal, Inverse kinematics, Bipedal Gait

Abstract

The research in the field of robotics, especially in bipedal robot has growing faster nowadays. Bipedal robot is a robot which adjusts the balance using two legs and moves like human. In the development of the motion, it is necessary a method that can facilitate in the robot legs movements. This final project is designing a bipedal robot which has 12 degrees of freedom (DOF) with MPU6050 sensor as an indicator of the slope. Bipedal robot moves using inverse kinematics by following the coordinates given. The method of inverse kinematics help find the value angle servo moves through the final coordinates. In this research, bipedal robot can move forward with error value of 0.4, turning back with an error of 1.4, 15.9 left side of the road, and the road to the right 7.6.

Keyword: Bipedal Robot, Inverse kinematics, Bipedal Gait

1. Pendahuluan

Penelitian di bidang robotika khususnya dalam robot *bipedal* semakin cepat berkembang. Robot *bipedal* merupakan robot yang bergerak dan mengatur keseimbangan dengan menggunakan dua kaki, robot ini bergerak layaknya manusia. Teknik kontrol dan metoda semakin sering dikembangkan guna menyempurnakan kemampuan robot *bipedal* [1].

Sejak tahun 1970 terdapat banyak peneliti yang sudah terjun dibidang cara berjalan robot *bipedal* [2]. Pada penelitian sebelumnya algoritma pengontrolan berjalan untuk kestabilan robot humanoid pada jalan yang tidak rata dan bergelombang. Algoritma tersebut sukses diterapkan pada KHR-2 (KAIST Humanoid robot-2) dengan pengujian berjalan dijalan yang tidak rata dan bergelombang.

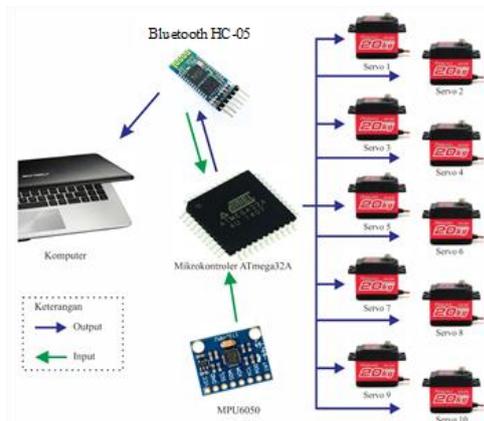
Penelitian tersebut menjelaskan bahwa penerapan *inverse kinematic* dalam menggerakkan telapak kaki agar robot *bipedal* dapat berjalan [3]. Penelitian ini menghasilkan bahwa penerapan *inverse kinematic* memiliki *error* terkecil sebesar 2,08% dan yang terbesar 4,44%.

Terdapat beberapa metode yang sering diterapkan oleh para peneliti pada *bipedal* untuk mengontrol keseimbangan ketika berjalan contohnya *Zero Moment Point*, metode ini mencari jarak dari gaya yang mengurangi gaya dari pusat massa robot [4], [5]. Selain mengatur keseimbangan robot *bipedal* juga memerlukan algoritma untuk berjalan, dalam berjalan robot *bipedal* memerlukan 4 fase yaitu *Double Support Phase* merupakan fase robot berdiri dengan bantuan 2 kaki, *Pre-Swing Phase* merupakan fase sebelum berjalan, *Single Support Phase* merupakan fase dimana robot berdiri dengan 1 kaki, dan *Post-Swing Phase* merupakan fase akhir dari berjalan [6], [7].

Penelitian ini akan membahas tentang sistem berjalan sebuah robot *bipedal*. Robot *bipedal* ini dirancang dengan 12 derajat kebebasan (6 derajat kebebasan disetiap kakinya), derajat kebebasan tersebut merupakan sendi untuk setiap kaki. Robot *bipedal* akan menggerakkan *end-effector* berupa telapak kaki dengan menggunakan metode *inverse kinematic*. *End-effector* merupakan titik akhir dari pergerakan. Pengujian robot *bipedal* dengan memperhatikan kemiringan robot pada saat berjalan lurus, samping kiri, samping kanan, dan berjalan munduk. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang robot bipedal yang berjalan berbasis metode inverse kinematic dengan menggunakan MPU6050 sebagai indikator kemiringan robot.

2. Metode

Gambar 1 menjelaskan pada perancangan robot *bipedal* ini masukan yang digunakan adalah data perintah. *Input* berupa koordinat dan status *end-effector* yang berasal dari data koordinat. Kemudian untuk mengolah data tersebut digunakan metode *inverse kinematics* pada mikrokontroler. Hasil olahan data dari mikrokontroler digunakan untuk menggerakkan aktuator yang berupa 12 motor servo. Mikrokontroler dirancang hanya dapat menerima data atau berkomunikasi 1 arah dengan *interface* yang dirancang.



Gambar 1. Diagram blok input output robot bipedal

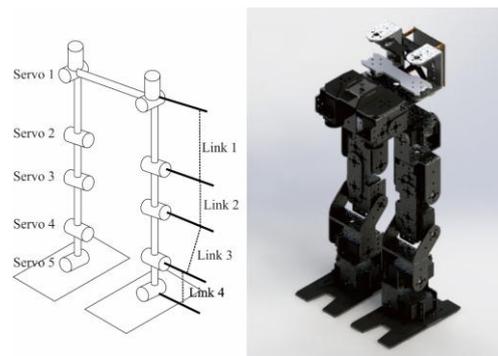
2.1. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan spesifikasi mekanik robot *bipedal* ini dirancang dengan menggunakan 12 DoF dengan dibagi menjadi dua kaki setiap kaki terdapat 5 DoF sebagai penggerak menuju koordinat dan 1 DoF sebagai sendi putar.

Robot *bipedal* ini memiliki spesifikasi dengan panjang link 1 (L1) 84 mm, link 2 (L2) 38.85 mm, link 3 (L3) 64.18 mm, dan link 4 (L4) 46.75 mm. Dari spesifikasi diatas, robot dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.

Untuk setiap joint pada robot lengan ini dirancang dengan jangkauan sudut yang berbeda-beda. Pada joint 1 (θ_1) dirancang dengan jangkauan sudut sebesar 135° (0° sampai 135°), joint 2 (θ_2) sebesar 110° (30° sampai 140°), joint 3 (θ_3) sebesar 160° (10° sampai 170°), joint 4 (θ_4) sebesar 100° (20° sampai 120°), dan *end-effector* (θ_e) sebesar 135° (0° sampai 135°).

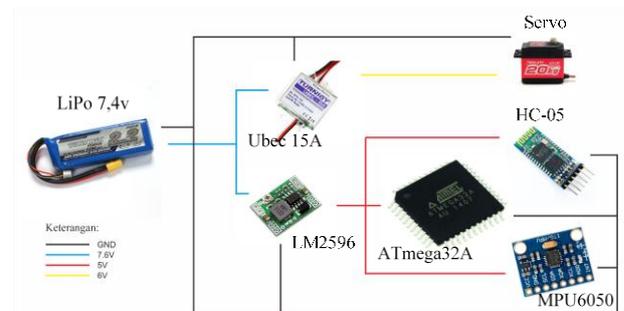
Perangkat elektronik robot bipedal ini dirancang agar dapat bebas digunakan dimana saja, sehingga digunakan catu daya dari baterai. Hardware yang dirancang pada robot bipedal ini membutuhkan suplai tegangan yang berbeda, sehingga diperlukan regulator penurun tegangan sebanyak 2 macam dan disesuaikan dengan kebutuhan. Untuk catu daya mikrokontroler dan bluetooth digunakan penurun tegangan LM2596 karena hanya membutuhkan arus kurang dari 3A dan hanya membutuhkan tegangan kisaran 5V. Sedangkan untuk catu daya motor servo digunakan penurun tegangan Ubec 8-15A karena pada setiap motor servo dibutuhkan arus lebih dari 1A dan tegangan 6V agar dapat bekerja secara maksimal. Pembagian catu daya dapat dilihat pada Gambar 3.



(a) Posisi lokasi servo dan link (b) Gambar robot bipedal dalam 3D

Gambar 2. Desain mekanik robot bipedal

Mikrokontroler ATmega32A pada robot bipedal ini berfungsi sebagai menerima data dari komunikasi serial, memberikan indikator dari robot bipedal, serta melakukan perhitungan metode gerak dan melakukan kontrol aktuator.



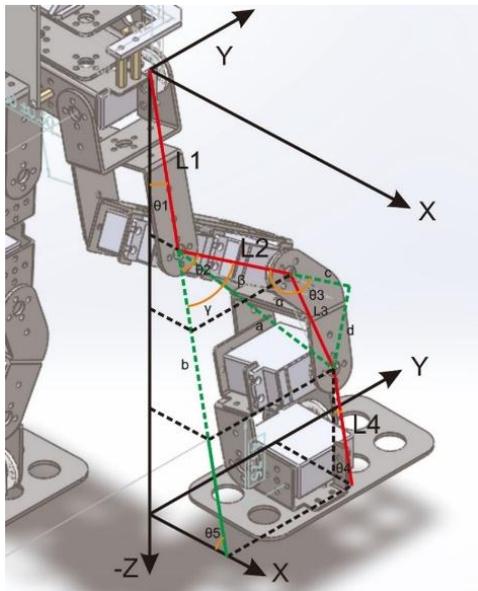
Gambar 3. Pembagian catu daya

2.2. Perancangan Kinematika Gerak

Untuk menunjang algoritma yang sudah dirancang maka diperlukan kinematika gerak untuk menggerakkan robot bipedal. Penyusun kinematika gerak dari bipedal merupakan inverse kinematic, motion planning, dan gait.

2.2.1. Invers Kinematic

Untuk mempermudah pengguna dalam menggerakkan *end-effector* dari robot lengan ke posisi tertentu, maka diperlukan metode gerak *inverse kinematic*. Metode ini menggunakan masukan posisi koordinat berupa x, y, dan z. Hasil keluaran dari *inverse kinematic* merupakan sudut yang terbentuk pada *joint*. Dengan melihat model geometri pada Gambar 4 maka dapat ditentukan nilai Θ .



Gambar 4. Menentukan besar sudut dengan pendekatan geometri

mencari nilai θ_1 ,

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad (1)$$

mencari nilai b,

$$(L_1 + L_4 + b)^2 = x^2 + z^2 \quad (2)$$

$$(L_1 + L_4 + b) = \sqrt{x^2 + z^2} \quad (3)$$

$$b = \sqrt{x^2 + z^2} - L_1 - L_4 \quad (4)$$

mencari nilai a,

$$a^2 = b^2 + y^2 \quad (5)$$

$$a = \sqrt{b^2 + y^2} \quad (6)$$

dengan mensubstitusikan persamaan b kedalam persamaan a, didapatkan nilai sudut θ_3

$$a^2 = L_2^2 + L_3^2 - 2L_2L_3 \cos \alpha \quad (7)$$

$$\cos \alpha = \frac{L_2^2 + L_3^2 - a^2}{2L_2L_3} \quad (8)$$

dengan merubah $\cos \alpha$,

$$\cos \alpha = \cos(180 - (-\theta_3)) \quad (9)$$

$$\cos \alpha = -\cos \theta_3 \quad (10)$$

maka substitusikan persamaan 10 ke persamaan 8,

$$-\cos \theta_3 = \frac{L_2^2 + L_3^2 - a^2}{2L_2L_3} \quad (11)$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{a^2 - L_2^2 - L_3^2}{2L_2L_3} \quad (12)$$

Selanjutnya adalah mencari nilai θ_2 ,

$$\theta_2 = \beta + \gamma \quad (13)$$

Dimana nilai β dapat dicari dengan menggunakan aturan cosinus,

$$\cos \beta = \frac{L_2 + L_3 \cos(-\theta_3)}{a} \quad (14)$$

$$\beta = \cos^{-1} \frac{L_2 + L_3 \cos(-\theta_3)}{a} \quad (15)$$

Dengan menggunakan aturan cosinus dapat dicari nilai γ .

$$\cos \gamma = \frac{b}{a} \quad (16)$$

$$\gamma = \cos^{-1} \frac{b}{a} \quad (17)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan dengan persamaan kedalam persamaan, didapatkan nilai θ_2 .

2.2.2. Motion Planning

Motion planning merupakan sebuah proses untuk memecah nilai koordinat akhir yang ditentukan agar pergerakan servo lebih halus. Pergerakan servo LF-20MG untuk menjangkau sudut 60° adalah 0.16 detik. Motion planning ini berfungsi untuk memperlambat waktu pergerakan servo tersebut.

2.3. Perancangan Gait

Agar robot *bipedal* dapat berjalan maka diperlukan koordinat untuk menggerakkan *end-effector* berupa telapak kaki, susunan beberapa koordinat yang disebut *gait*. Fase pergerakan *bipedal* bahwa fase pergerakan *bipedal* dibagi menjadi 4 bagian:

1. Double Support (DS)
2. Pre-Swing
3. Single Support
4. Post-Swing

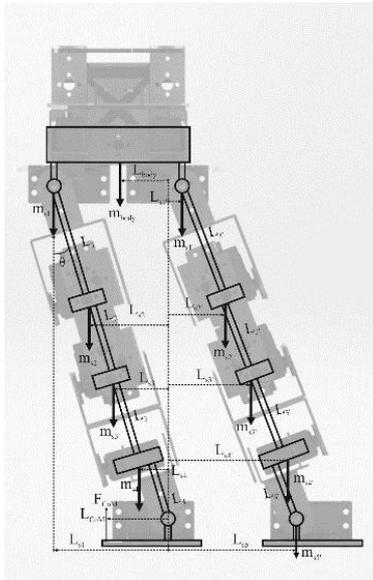
2.4. Perancangan Algoritma Bipedal

Algoritma robot *bipedal* diawali dengan inisialisasi robot. Selanjutnya robot *bipedal* menunggu masukan data serial jika tidak terdapat masukan data serial maka akan kembali ke inisialisasi. Data serial memberikan masukan berupa *nilai hex*, Selanjutnya robot *bipedal* akan melakukan *gait* sesuai dengan data yang dikirim. Proses bergeraknya robot menggunakan *gait* dengan mengatur koordinat dari *end-effector* yang berada di telapak kaki.

2.5. Perhitungan CoM dan CoP

Perhitungan CoM dibagi 2 bagian yaitu untuk menentukan y_{CoM} dan menentukan z_{CoM} . Penentuan tersebut guna mencari lebar dari sebuah telapak kaki atau koordinat maksimal yang dapat ditempuh oleh telapak kaki tersebut.

Gambar 6 merupakan gambar dimana robot memiliki kemiringan yang menyebabkan robot tersebut terguling. Dengan menggunakan servo ke 5 (m_{s5}) sebagai pusat/titik acuan untuk menentukan jarak dari setiap servo yang lainnya. Mencari jarak yang tegak lurus dari setiap servo.



Gambar 5. Posisi ekstrem bergerak ke samping

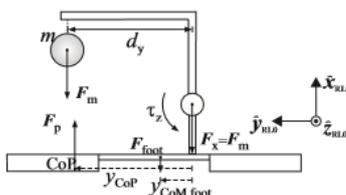
Dengan mendapatkan nilai jarak tegak lurus dari setiap servo, maka dapat dicari panjang dari jarak L_{CoM}

$$\sum F_{Sn} \cdot L_{Sn} + F_{body} \cdot L_{body} = \sum F_{CoM} \cdot L_{CoM} \quad (18)$$

$$\sum (m_{Sn}g) \cdot L_{Sn} + m_b g \cdot L_b = \sum (m_{CoM}g) \cdot L_{CoM} \quad (19)$$

$$L_{CoM} = \frac{\sum m_{Sn} \cdot L_{Sn} + m_{body} \cdot L_{body} - \sum m_{sn'} \cdot L_{sn'}}{\sum m_{Sn} + \sum m_{sn'} + m_{body}} \quad (20)$$

Dengan $L_{CoM} = d_y$,



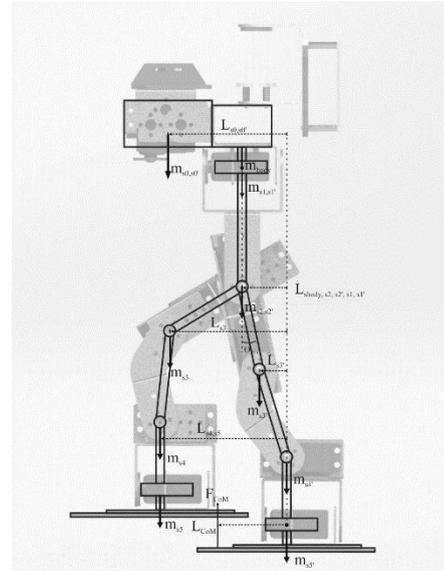
Gambar 6 Ilustrasi gaya pada kaki tampak depan

Dengan menganggap $\tau_y = F_x d_y$ dan $\tau_z = F_x d_z$

$$y_{CoP} = \frac{F_{foot} y_{CoM,foot} + \tau_z - F_y h_{ankle}}{F_x + F_{foot}} = \frac{m_{foot} g y_{CoM,foot} + mg d_y}{mg + m_{foot} g} \quad (21)$$

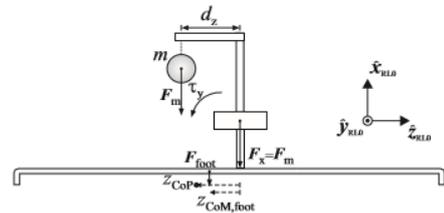
$$= \frac{m_{foot} y_{CoM,foot} + mg d_y}{m + m_{foot}}$$

Dapat dilihat pada Gambar 8 merupakan posisi ekstrim dimana apa bila terkena getaran sedikit robot dapat terguling. Dengan menggunakan servo m_{s5} sebagai titik acuan untuk mencari jarak yang tegak lurus dari setiap servo.



Gambar 7. Posisi ekstrem pada saat melangkah ke depan

Setelah mendapatkan nilai jarak dari setiap servo maka dapat mencari nilai L_{CoM} untuk kondisi yang digambarkan pada Gambar 8. Menggunakan persamaan 37 nilai dari L_{CoM} untuk proyeksi Gambar 9. dapat diketahui.



Gambar 8. Ilustrasi kaki kanan dengan gaya yang bekerja tampak samping

Dari Gambar 8 Didapatkan sebuah persamaan 22 dengan menganggap $\tau_z = F_x d_z$,

$$z_{CoP} = \frac{F_{foot} z_{CoM,foot} + \tau_y + F_z h_{ankle}}{F_x + F_{foot}} = \frac{m_{foot} g z_{CoM} + mg d_z}{mg + m_{foot} g} \quad (22)$$

$$= \frac{m_{foot} z_{CoM,foot} + mg d_z}{m + m_{foot}}$$

Dengan menggunakan persamaan 22 akan mendapatkan nilai z_{CoP} . Setelah mendapatkan nilai z_{CoP} dan nilai y_{CoP}

dapat diketahui nilai minimal dari permukaan kaki atau nilai dari koordinat untuk melangkah.

3. Hasil dan Analisa

3.1. Pengukuran Sensor MPU6050

Pengujian Sensor IMU MPU 6050 dilakukan dengan cara memberikan variasi nilai sudut pada sudut orientasi *roll* dan *pitch*. Robot *bipedal* tidak diberikan kontroler untuk mendapatkan data sudut yang sama seperti referensi yang diberikan. Variasi yang digunakan adalah 0,15, dan -15 untuk sudut orientasi roll maupun pitch.

Tabel 1 Pengujian sudut roll dengan 5 variasi

No	Pengujian (derajat)					
	0°	Error	15°	Error	-15°	Error
1	0,17	0,17	15,41	0,40	-14,9	0,09
2	0,16	0,16	15,4	0,39	-14,9	0,09
3	0,14	0,15	15,4	0,42	-14,9	0,09
4	0,15	0,15	15,42	0,42	-14,9	0,08
5	0,15	0,15	15,42	0,42	-14,9	0,08
Rata-rata	0,16	0,16	15,4	0,41	-14,9	0,09

Pada Tabel 1 didapat beberapa data pengujian dari beberapa sudut. Rata-rata *error* pengujian sudut 0° adalah 0,16°, untuk pengujian kedua adalah sudut 15° memiliki nilai *error* rata-rata 0,41°, dan pengujian terakhir dengan sudut -15° memiliki rata-rata nilai *error* 0,09°.

Tabel 2 menampilkan hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai rata-rata *error* 0° adalah 0,32°, untuk pengujian kedua yaitu 15° memiliki rata-rata nilai *error* 2,95°, dan pengujian ketiga dengan sudut -15° memiliki rata-rata nilai *error* 2,58°.

Tabel 2 Pengujian sudut pitch dengan 5 variasi

No	Pengujian (derajat)					
	0°	Error	15°	Error	-15°	Error
1	0,34	0,33	17,97	2,97	-17,58	2,58
2	0,34	0,33	17,95	2,95	-17,58	2,58
3	0,32	0,32	17,95	2,95	-17,58	2,58
4	0,32	0,32	17,93	2,93	-17,57	2,57
5	0,31	0,31	17,95	2,96	-17,59	2,59
Rata-rata	0,32	0,33	17,95	2,95	-17,58	2,58

3.2. Pengujian Motor Servo

Tabel 3 dapat dilihat terdapat pelonjakan nilai *error* yang terjadi pada servo 4 ketika uji sudut 50°. Rata-rata *error* dari servo 1 adalah 0,9°, servo 2 memiliki rata-rata *error* -1,4°, untuk servo 3 memiliki rata-rata *error* -0,4°, untuk servo 4 memiliki rata-rata *error* 1°, dan servo 5 memiliki rata-rata *error* 0,6°.

Tabel 4 dapat dilihat rata-rata *error* yang dihasilkan dari servo 1 adalah -2, servo 2 adalah -1,8, servo 3 adalah -0,2, servo 4 adalah -0,6, dan servo 5 adalah -1,4. Rata-rata *error* terbesar terdapat pada servo 1.

Tabel 3 Error pengujian servo kaki kiri

Sudut	Error (servo)				
	1	2	3	4	5
10	0	-2	0	0	1
20	0	-2	0	1	1
30	2	-1	-1	0	1
40	1	0	-1	1	0
50	1,5	-2	0	3	0
Rata-rata	0,9	-1,4	-0,4	1	0,6

Pada Tabel 5 dapat dilihat terdapat pelonjakan nilai *error* yang terjadi pada servo putar kaki kiri ketika uji sudut -20° dan 10°. Rata-rata *error* yang dihasilkan dari servo putar kaki kanan adalah 0,4 dan servo putar kaki kiri adalah 0,4.

Tabel 4 Error pengujian servo kaki kiri

Sudut	Error (servo)				
	1	2	3	4	5
10	-1	-2	-2	-1	0
20	-3	-2	0	0	-1
30	-2	-1	0	-1	-2
40	-3	-1	0	-1	-2
50	-1	-3	1	0	-2
Rata-rata	-2	-1,8	-0,2	-0,6	-1,4

Tabel 5 Pengujian sudut servo putar

Sudut	Servo Putar		Error	
	Kaki Kanan	Kaki Kiri	Kaki kanan	Kaki kiri
-20	-19	-21	1	-1
-10	-9	-10	1	0
0	0	0	0	0
10	10	9	0	-1
20	20	20	0	0
Rata-rata			0,4	-0,4

3.3 Pengujian Invers Kinematic

Pengujian *inverse kinematics* dilakukan untuk menguji kepresisian dari robot *bipedal* bergerak ke posisi tertentu. Pada pengujian *inverse kinematics* ini berisi pengujian variasi sumbu X, variasi sumbu Y, dan variasi sumbu Z.

3.3.1 Pengujian Inverse Kinematic Variasi Sumbu X

Pada Tabel 6 memperlihatkan hasil dari pengujian antara nilai yang diberikan dan pengukuran dari *end-effector* ketika diberi masukan variasi sumbu x. Rata-rata nilai *error* yang dihasilkan dari variasi sumbu x adalah 0,06 cm.

Tabel 6 Pengujian dengan variasi sumbu x

Variasi sumbu (cm)	Terukur	Error
1	0,9	-0,1
2	2,2	0,2
3	3	0
4	4,3	0,3
5	4,9	-0,1
Rata - rata		0,06

3.3.2 Pengujian Inverse Kinematic Variasi Sumbu Y

Tabel 7 merupakan hasil dari pengujian antara nilai yang diberikan dan pengukuran dari *end-effector* ketika diberi masukan variasi sumbu y. Rata-rata nilai *error* yang dihasilkan dari variasi sumbu y adalah -0,06.

Tabel 7 Pengujian dengan variasi sumbu y

Variasi sumbu	Terukur	Error
1	1,1	0,1
2	2,2	0,2
3	3	0
4	3,8	-0,2
5	4,6	-0,4
Rata - rata		-0,06

3.3.3 Pengujian Inverse Kinematic Variasi Sumbu Z

Tabel 8 merupakan hasil dari pengujian antara nilai yang diberikan dan pengukuran dari *end-effector* ketika diberi masukan variasi sumbu z. Rata-rata nilai *error* yang dihasilkan dari variasi sumbu z adalah 0,28 cm.

Tabel 8 Pengujian dengan variasi sumbu z

Variasi sumbu	Terukur	Error
18	18,2	0,2
19	19,4	0,4
20	20,3	0,3
21	21,2	0,2
22	22,3	0,3
Rata - rata		0,28

3.4 Pengujian Gait

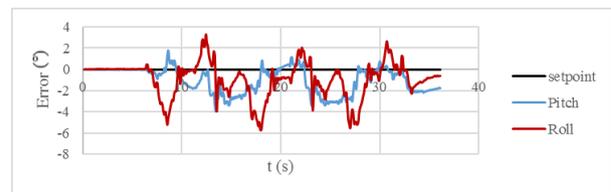
Pengujian *gait* dilakukan untuk mengetahui kemampuan dari robot *bipedal*. Pengujian ini dilakukan dengan 4 mode, yaitu mode berjalan lurus, berjalan mundur, berjalan samping kanan, dan berjalan samping kiri.

3.4.1 Pengujian Langkah Maju

Pada table 9 tertera hasil pengujian mode jalan maju dengan variasi 5 langkah. Rata-rata *error* yang dihasilkan dari pengujian ini adalah 0,4 mm. *Error* yang tertinggi terdapat pada pengujian dengan 5 langkah jalan maju yaitu -5 mm. Nilai *error* dari sudut kemiringan pitch dan roll dapat dilihat pada Gambar 10.

Tabel 9 Pengujian langkah pada mode jalan maju

Variasi (langkah)	Terhitung (mm)	Terukur (mm)	Error (mm)
1	20	20	0
2	40	42	2
3	60	62	2
4	80	83	3
5	100	95	-5
Rata-rata			0,4



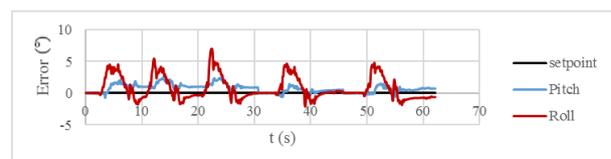
Gambar 10 Error sudut pitch dan roll jalan maju

3.4.2 Pengujian Samping Kanan

Pada table 10 tertera hasil pengujian mode jalan samping kanan dengan variasi 5 langkah. Rata-rata *error* yang dihasilkan dari pengujian ini adalah 7,6 mm. *Error* yang tertinggi terdapat pada pengujian dengan variasi 5 langkah jalan maju yaitu 12 mm. Grafik *error* sudut kemiringan *pitch* dan *roll* dapat dilihat pada Gambar 11.

Tabel 10 Pengujian jalan ke samping kanan

Variasi (langkah)	Terhitung (mm)	Terukur (mm)	Error (mm)
1	20	20	0
2	40	48	8
3	60	70	10
4	80	88	8
5	100	112	12
Rata-rata			7,6



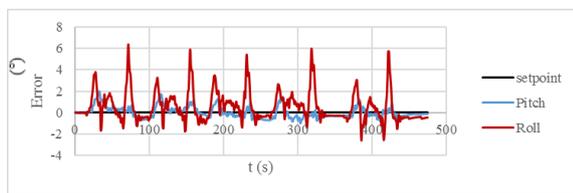
Gambar 11 Error sudut pitch dan roll jalan ke kanan

3.4.3 Pengujian Samping Kiri

Pada table 11 tertera hasil pengujian mode jalan samping kiri dengan variasi 5 langkah. Rata-rata *error* yang dihasilkan dari pengujian ini adalah 15,9 mm. *Error* yang tertinggi terdapat pada pengujian dengan variasi 5 langkah yaitu 40 mm. Grafik *error* sudut kemiringan *pitch* dan *roll* dapat dilihat pada Gambar 12.

Tabel 11 Pengujian langkah jalan ke samping kiri

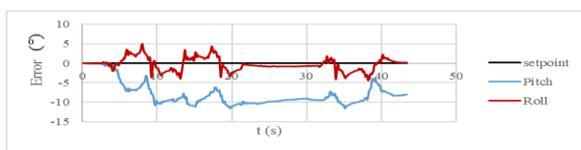
Variasi (langkah)	Terhitung (mm)	Terukur (mm)	Error (mm)
1	20	24	4
2	40	46	6
3	60	71,5	11,5
4	80	98	18
5	100	140	40
Rata-rata			15,9



Gambar 12 Error sudut *pitch* dan *roll* langkah ke kiri

3.4.4 Pengujian Berjalan Mundur

Pada tabel 12 tertera hasil pengujian mode jalan mundur dengan variasi 5 langkah. Rata-rata *error* yang dihasilkan dari pengujian ini adalah 1,4 mm. *Error* yang tertinggi terdapat pada pengujian dengan variasi 5 langkah yaitu 5 mm. Grafik *error* sudut kemiringan *pitch* dan *roll* dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13 Error sudut *pitch* dan *roll* jalan mundur

Tabel 12 Pengujian langkah pada mode jalan mundur

Variasi (langkah)	Terhitung (mm)	Terukur (mm)	Error (mm)
1	20	20	0
2	40	40	0
3	60	60	0
4	80	82	2
5	100	105	5
Rata-rata			1,4

4 Kesimpulan

Pada sumbu orientasi *roll* terjadi *error* 0,15809° pada saat pengujian 0°, *error* 0,41517° pada saat pengujian 15°, dan *error* 0,09333° pada saat pengujian -15°. Pada sumbu orientasi *pitch* terjadi *error* 0,32681° pada saat pengujian 0°, *error* 2,95453° pada saat pengujian 15°, dan *error* -2,58391° pada saat pengujian -15°. Rata-rata *error* pengujian servo pada kaki kiri untuk servo 1 adalah 0,9°, untuk servo 2 adalah -1,4°, untuk servo 3 adalah -0,4°, untuk servo 4 adalah 1°, untuk servo 5 adalah 0,6°, dan untuk servo putar adalah -0,4°. Rata-rata *error* pengujian servo pada kaki kanan untuk servo 1 adalah -2°, untuk servo 2 adalah -1,8°, untuk servo 3 adalah -0,2°, untuk servo 4 adalah 0,6°, untuk servo 5 adalah -1,4°, dan untuk servo putar adalah 0,4°. Pada pengujian inverse kinematic untuk sumbu x memiliki *error* sebesar 0,06, untuk sumbu y memiliki *error* -0,06, dan untuk sumbu z memiliki *error* 0,28. Pengujian *gait* mode maju memiliki *error* 0,4 mm, pengujian *gait* mode samping kanan memiliki *error* 7,6 mm, pengujian *gait* mode samping kiri memiliki *error* 15,9 mm, pengujian *gait* mode mundur memiliki *error* 1,4 mm

Referensi

- [1]. Muliady, Z. Abidin, C. Hadinata, and M. Kusuma, "ROBOT HUMANOID PEMAIN BOLA SOCCER HUMANOID ROBOT Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik," p. 87, 2012.
- [2]. J. Y. Kim, I. W. Park, and J. H. Oh, "Walking control algorithm of biped humanoid robot on uneven and inclined floor," *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 48, no. 4, pp. 457–484, 2007.
- [3]. S. Setiawan, Firdaus, B. Rahmadya, and Derisma, "Penerapan Invers Kinematika Untuk Pergerakan Kaki Robot Biped," no. November, pp. 1–9, 2015.
- [4]. M. H. P. Dekker, "Zero-Moment Point Method for Stable Biped Walking," *Report*, no. July, p. 62, 2009.
- [5]. J. Rudy, *ZERO-MOMENT POINT WALKING CONTROLLER FOR HUMANOID WALKING USING DARWIN-OP*. Notre Dame, Indiana, 2014.
- [6]. T. Luksch, "Human-like Control of Dynamically Walking Bipedal Robots," *Optimization*, p. 220, 2010.
- [7]. C. Chevallereau, G. Bessonnet, G. Abba, and Y. Aoustin, *Bipedal Robots Modeling, Design and Walking Synthesis*. France: ISTE Ltd, 2007.