

Inverse dan Body Kinematics pada Robot Hexapod

Indra Agustian Kurniawan¹, Feriyonika², Sabar Pramono³

¹Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
Email : indraagstn@gmail.com

²Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
Email : feriyonika@gmail.com

³Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
Email : pramonosabar@yahoo.com

ABSTRAK

Perancangan metode gerak *hexapod robot* secara konvensional dilakukan dengan cara merekam pola gerakan dari masing-masing kaki secara manual, kemudian pola gerakan tersebut dijadikan acuan untuk melakukan langkah kaki pada saat robot bergerak. Perancangan metode gerak secara konvensional memiliki kelemahan, yaitu jika pola gerakan tersebut diubah maka proses perekaman pola gerakan harus dilakukan kembali sehingga gerakan robot menjadi terbatas pada posisi-posisi tertentu. Maka dari itu, digunakan metode *inverse kinematics* untuk menghitung sudut-sudut yang harus dicapai tiap sendi kaki robot agar posisi dari ujung kaki robot mencapai titik yang diinginkan dan kaki robot dapat bergerak ke berbagai posisi. Metode *body kinematics* mengolah data posisi dari tubuh robot untuk mengkoordinasikan gerakan dari enam kaki pada robot, sehingga robot dapat bergerak ke berbagai arah. Pada gerakan langkah kaki robot, digunakan trayektori langkah agar gerakan langkah menjadi halus dan pola langkah (*gait*) untuk menjaga keseimbangan robot saat bergerak. Dari hasil percobaan *inverse kinematics*, didapatkan nilai rata-rata error sumbu X pada tiap kaki adalah 1.89%, pada sumbu Y adalah 2.6%, dan pada sumbu Z adalah 12,4%. Rataan error *body kinematics* rotasi statis sumbu X sebesar 1.73 derajat, sumbu Y sebesar 0.72 derajat, dan sumbu Z sebesar 0.72 derajat. Kecepatan maksimal robot adalah 5.15 cm/s.

Kata Kunci

Robot *Hexapod*, *Inverse Kinematics*, *Body Kinematics*, Trayektori, *Gait*

1. PENDAHULUAN

Robot *hexapod* merupakan robot yang memiliki enam buah kaki. Robot ini memiliki beberapa kelebihan diantaranya dapat bergerak di permukaan yang tidak rata. Kemudian, *hexapod robot* memiliki kestabilan dinamik yang tinggi. Hal ini dapat dicapai dengan konfigurasi yang membentuk *tripod* sehingga pusat masa robot ketika berjalan berada di dalam bidang yang terbentuk dari ketiga kaki di tanah [1]. Aplikasi robot berkaki umumnya untuk penjelajahan alam bebas pada misi militer, penjelajahan hutan, dan juga untuk eksperimen perilaku hewan dan pengujian kecerdasan buatan [2].

Perancangan metode gerak *hexapod robot* dibutuhkan agar gerak robot menjadi dinamis dan tidak terbatas pada gerakan tertentu saja. Metode *inverse kinematics* digunakan agar posisi dari ujung kaki robot dapat mencapai titik yang diinginkan dan kaki robot dapat bergerak ke berbagai posisi. Metode *inverse kinematics* ini mengolah data koordinat tujuan ujung kaki (*end-point*) yang diinginkan dan panjang bagian kaki robot menggunakan analisa geometri, dan kemudian menghasilkan sudut-sudut yang harus digerakan pada setiap sendi kaki. Metode *body kinematics* mengolah data posisi dari titik pusat

tubuh robot dan menghitung panjang relatif terhadap masing-masing kaki, kemudian data tersebut digunakan untuk mengkoordinasikan gerakan dari enam kaki pada robot, sehingga robot dapat bergerak ke berbagai arah. Pada gerakan langkah kaki robot, digunakan trayektori langkah agar gerakan langkah menjadi halus. Trayektori ini dibuat berdasarkan kurva yang dibentuk oleh persamaan polinomial orde 3. Kemudian digunakan pola langkah (*gait*) untuk menjaga keseimbangan robot saat bergerak. Pola ini merupakan urutan sekuensial tiap kaki robot agar robot dapat bergerak secara dinamis.

Pada penelitian ini digunakan robot *hexapod* dengan jumlah 18 buah motor servo yang terbagi menjadi 3 motor servo pada masing-masing kaki, sehingga tiap kaki memiliki 3 DOF (*Degree of Freedom*). Proses pengerjaan algoritma kinematika robot dilakukan secara bertahap, dimulai dari *inverse kinematics*, trayektori langkah, *body kinematics*, dan pola langkah (*gait*). Proses pengerjaan algoritma dibuat pada program Arduino IDE dan MATLAB. Data-data mekanik robot didapat dengan proses pengukuran, data-data ini digunakan pada algoritma kinematika robot. Proses pengujian gerakan mula-mula dicoba pada bidang yang dapat menumpu robot

dan kemudian dilakukan proses pengukuran *end-point* tiap kaki. Kemudian pengujian pergerakan robot dilakukan pada bidang datar yang telah disiapkan untuk proses pengukuran.

2. KINEMATIKA PADA ROBOT

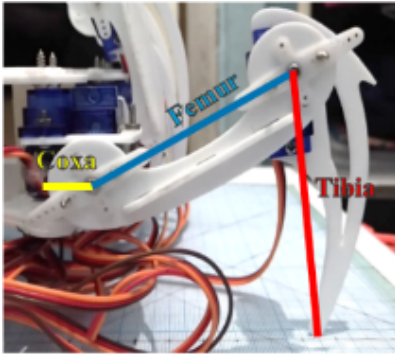
2.1 Inverse Kinematics

Struktur kaki robot berkaki enam menggunakan struktur kaki serangga yang terdiri dari 3 persendian dan 3 bagian tulang yaitu *coxa*, *femur* dan *tibia*. Struktur kaki robot dapat dilihat Gambar 1. *Inverse Kinematics* digunakan untuk mencari besar sudut sendi *coxa*, *femur*, dan *tibia* agar ujung kaki robot dapat mencapai posisi *end-point* yang diinginkan [1]. Analisa geometri kaki robot dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Langkah-langkah untuk mencari nilai sudut *coxa* (θ_c), *femur* (θ_f), dan *tibia* (θ_t) adalah sebagai berikut ini.

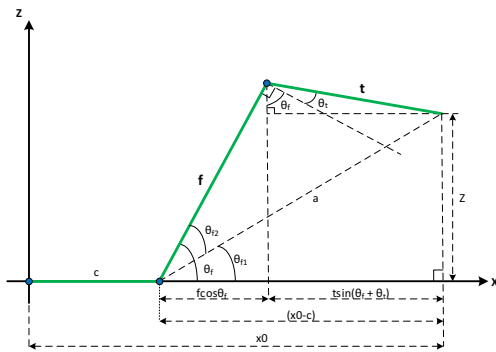
1) *Menghitung besar sudut θ_c* : Untuk menghitung sudut θ_c , maka dilakukan analisa pada Gambar 3. Persamaan yang diperoleh ditunjukkan oleh (1) dan (2).

$$\tan \theta_c = \frac{y}{x} \quad (1)$$

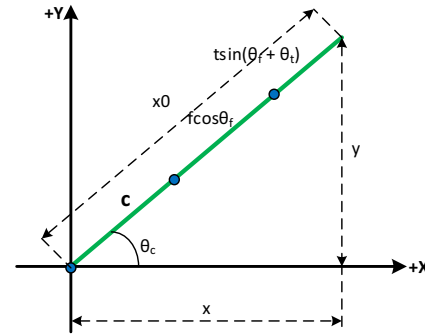
$$\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (2)$$



Gambar 1. Struktur Kaki Robot



Gambar 2. Sudut pandang *joint-joint* pada bidang XZ



Gambar 3. Sudut pandang *joint-joint* pada bidang XY

2) *Menghitung besar θ_f* : Untuk menghitung sudut θ_f , maka diperlukan nilai x_0 , a , sudut θ_{f1} , dan θ_{f2} (pada Gambar 2). Untuk mencari nilai θ_f , θ_{f1} , θ_{f2} tersebut, maka dilakukan proses perhitungan pada persamaan (3) hingga (7).

$$x_0 = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

$$\theta_{f1} = \tan^{-1} \left(\frac{z}{(x_0 - c)} \right) \quad (4)$$

$$a = \sqrt{z^2 + (x_0 - c)^2} \quad (5)$$

$$\theta_{f2} = \cos^{-1} \left(\frac{f^2 + a^2 - t^2}{2 \cdot a \cdot f} \right) \quad (6)$$

$$\theta_f = \theta_{f1} + \theta_{f2} \quad (7)$$

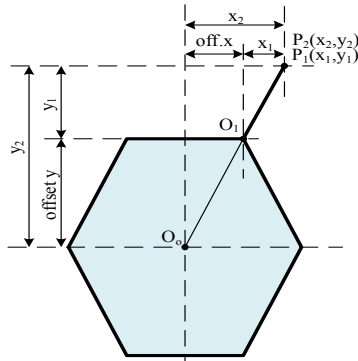
3) *Menghitung besar θ_t* : Untuk menghitung sudut θ_t , maka dilakukan analisa pada Gambar 2. Proses perhitungan ini ditunjukkan oleh (8).

$$\theta_t = \cos^{-1} \left(\frac{f^2 + t^2 - a^2}{2 \cdot f \cdot t} \right) - 90^\circ \quad (8)$$

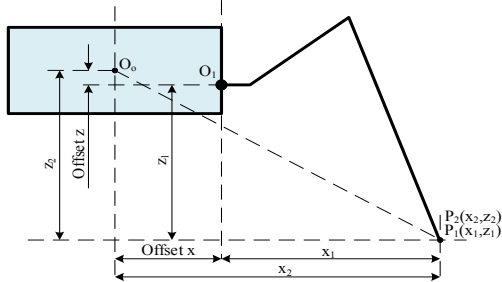
(syarat: $a \leq f + t$)

2.2 Body Kinematics

Body kinematics mengolah data posisi relatif setiap ujung kaki terhadap titik pusat bodi robot, kemudian digunakan untuk mengkoordinasikan setiap ujung kaki robot sehingga bodi robot dapat bergerak [3]. Analisa *body kinematics* dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Analisa Bodi Robot pada Bidang XY



Gambar 5. Analisa Bodi Robot pada Bidang XZ

Titik O_0 merupakan titik pusat bodi robot dan titik O_1 merupakan titik sendi *coxa* kaki robot yaitu sebagai titik pusat *inverse kinematics* kaki. Titik P_1 merupakan posisi ujung kaki terhadap titik *coxa* dan titik P_2 merupakan posisi ujung kaki terhadap bodi robot. Nilai x_1 , y_1 , dan z_1 merupakan koordinat *inverse kinematics* kaki, sedangkan nilai *offset x*, *y*, dan *z* didapat melalui proses pengukuran pada bodi robot. Proses perhitungan posisi relatif ujung kaki terhadap bodi robot (P_2) dijelaskan pada (9) hingga (11).

$$x_2 = x_1 + \text{offset } x \quad (9)$$

$$y_2 = y_1 + \text{offset } y \quad (10)$$

$$z_2 = z_1 + \text{offset } z \quad (11)$$

Setelah didapat titik $P_2(x_2, y_2, z_2)$, maka untuk memutar bodi robot secara statis digunakan matriks rotasi. Matriks rotasi digunakan untuk memutar titik pusat bodi robot terhadap sumbu X, sumbu Y dan sumbu Z. Persamaan matriks rotasi dijelaskan pada (12) hingga (16).

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$R_{x,y,z} = R_x(\alpha) * R_y(\beta) * R_z(\gamma) \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_{x,y,z} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (16)$$

Sudut α merupakan sudut rotasi terhadap sumbu X, Sudut β merupakan sudut rotasi terhadap sumbu Y, dan Sudut γ merupakan sudut rotasi terhadap sumbu Z. Titik koordinat x' , y' , dan z' merupakan titik koordinat setelah melakukan rotasi.

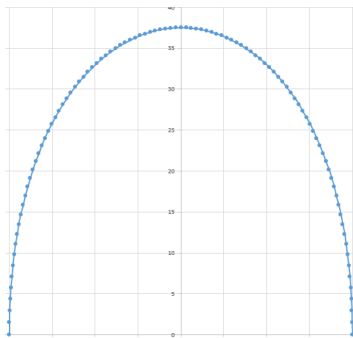
2.3 Trayektori Langkah

Trayektori pada kaki robot merupakan lintasan gerak dari suatu titik *end-point* ke titik *end-point* lainnya. Trayektori ini diperlukan agar perubahan dari suatu titik ke titik lainnya berlangsung sama dan gerakan dari lengan robot menjadi lebih halus.

Pada robot berkaki, trayektori ini digunakan untuk mengatur langkah pada kaki robot. Trayektori yang digunakan pada langkah kaki berbentuk kurva parabola yang dihasilkan dari persamaan polinomial. Persamaan polinomial ini menghasilkan titik – titik trayektori yang digunakan sebagai lintasan gerak langkah dari kaki robot tersebut. Persamaan polinomial yang digunakan mengacu pada (17).

$$P(t)_{x,y,z} = (1-t)^3 P1_{x,y,z} + 3t(1-t)^2 P2_{x,y,z} + 3t^2(1-t) P3_{x,y,z} + t^3 P4_{x,y,z} \quad (17)$$

$P(t)_{x,y,z}$ merupakan end-point yang diinginkan pada iterasi ke- t , dan t merupakan faktor iterasi. $P1$ sampai $P4$ merupakan titik vektor acuan pada sumbu koordinat x , y , dan z . Titik-titik ini menentukan kurva trayektori yang dihasilkan. Nilai t adalah faktor iterasi, yang terus meningkat dari nol sampai satu seiring bertambahnya waktu. Nilai t tersebut dinaikkan sebesar 0.1 atau sesuai kebutuhan [1]. Contoh kurva trayektori yang dihasilkan seperti pada Gambar 6.

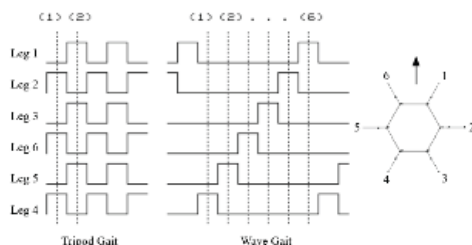


Gambar 6. Kurva Trayektori dari Persamaan Polinomial [1]

2.4 Pola Langkah (*Gait*)

Pola langkah (*gait*) digunakan untuk menjaga keseimbangan robot saat bergerak. Pola ini merupakan urutan sekuensial tiap kaki robot agar robot dapat bergerak secara dinamis.

Jenis pola *gait* yang sering digunakan diantaranya *tripod gait* dan *wave gait*. Pada pola *tripod gait*, pola langkah dibuat dengan menggunakan tiga buah kaki untuk menapak dan tiga buah kaki untuk melangkah. Kemudian pada pola *wave gait*, satu buah kaki robot digunakan bergantian untuk melangkah [4]. Pola *tripod gait* dan *wave gait* dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Pola *Gait* Robot Berkaki Enam [4]

3. MODEL ROBOT HEXAPOD

Pada bagian ini dijelaskan model robot *hexapod* yang digunakan pada penelitian ini. Data-data robot ini digunakan pada pengolahan algoritma kinematika robot.

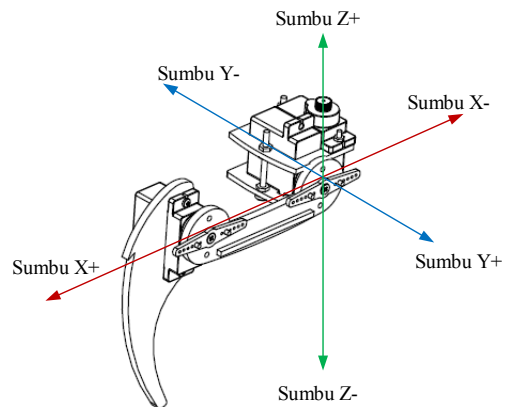
3.1 Pengaturan Inverse Kinematics

Struktur kaki robot yang digunakan pada algoritma *inverse kinematics* terdapat pada Gambar 1 dengan panjang sebagai berikut:

- Panjang *Coxa* = 12 mm
- Panjang *Femur* = 54 mm
- Panjang *Tibia* = 75 mm

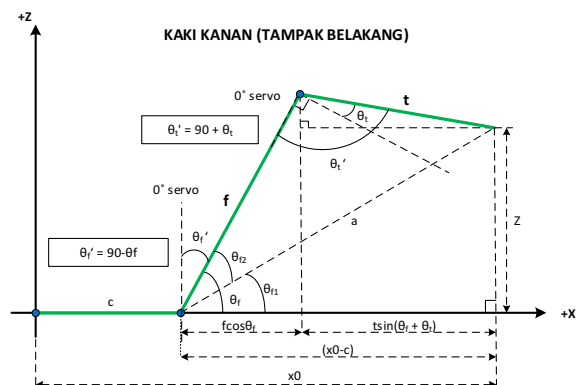
Pengaturan sumbu bidang koordinat kaki robot dilakukan untuk memudahkan pemrograman pada robot. Pada algoritma *inverse kinematics* pusat koordinat berada pada sumbu *coxa* masing masing kaki. Gambar 8 merupakan bidang koordinat kaki

robot bagian kanan. Bidang koordinat ini berlaku untuk kaki kanan dan kaki kiri robot, sehingga terdapat perbedaan arah gerak pada sumbu X kaki robot bagian kiri dan kanan

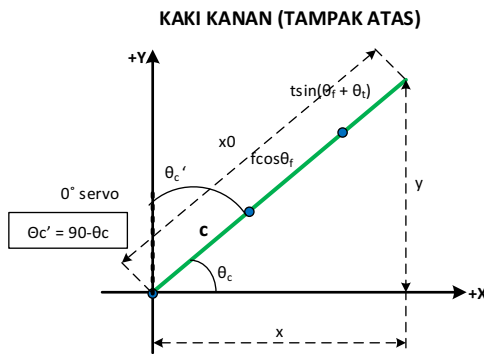


Gambar 8. Bidang koordinat kaki robot bagian kanan (tampak depan)

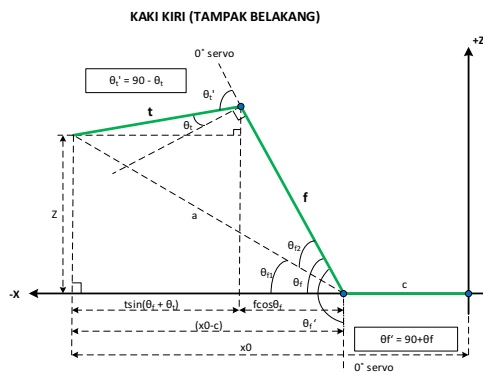
Selanjutnya, persamaan *inverse kinematics* pada bagian II-A harus dinormalisasi untuk menyesuaikan posisi 0 derajat antara perhitungan dan *hardware* yang digunakan. Normalisasi 0 derajat memiliki perbedaan pada kaki kiri dan kaki kanan yang disebabkan posisi komponen motor *servo*. Perhitungan normalisasi 0 derajat dijelaskan pada Gambar 9 hingga Gambar 12 .



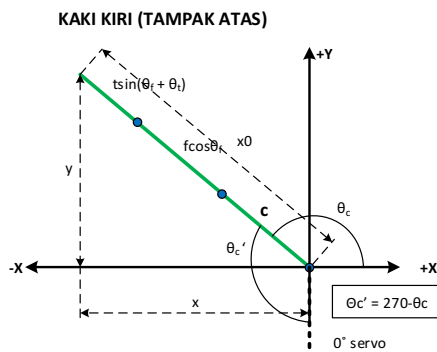
Gambar 9. Normalisasi 0 derajat Kaki Kanan (bag. 1)



**Gambar 10. Normalisasi 0 derajat Kaki Kanan
(bag. 2)**



**Gambar 11. Normalisasi 0 derajat Kaki Kiri
(bag. 1)**



**Gambar 12. Normalisasi 0 derajat Kaki Kiri
(bag. 2)**

Persamaan normalisasi 0 derajat secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 1.

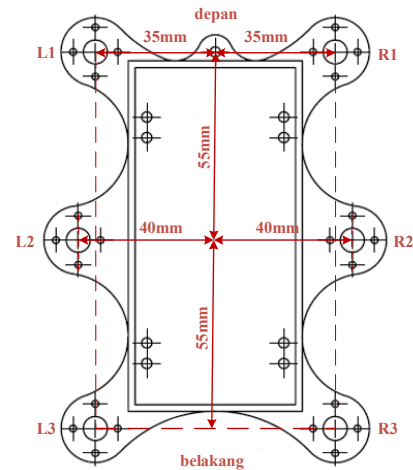
Tabel 1. Tabel Normalisasi 0 derajat

Normalisasi 0 derajat	Kaki kiri	Kaki Kanan
Sudut Coxa sebenarnya (θ_c')	$\theta_c' = 270 - \theta_c$	$\theta_c' = 90 - \theta_c$
Sudut Femur sebenarnya (θ_f')	$\theta_f' = 90 + \theta_f$	$\theta_f' = 90 - \theta_f$
Sudut Tibia sebenarnya (θ_t')	$\theta_t' = 90 - \theta_t$	$\theta_t' = 90 + \theta_t$

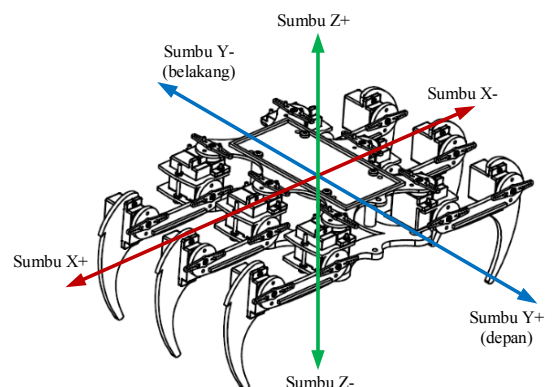
3.2 Pengaturan Body Kinematics

Ukuran *offset* pusat kaki terhadap bodi robot digunakan pada algoritma *body kinematics*. Setiap kaki diberi penomoran untuk memudahkan pengerjaan. Ukuran *offset* dan penomoran kaki dapat dilihat pada Gambar 13. Kaki kiri diberi nomor L1, L2, dan L3, sedangkan kaki kanan diberi nomor R1, R2, dan R3.

Pengaturan sumbu bidang koordinat bodi robot dilakukan untuk memudahkan pemrograman pada robot. Titik pusat bidang koordinat ini berada pada titik pusat bodi robot. Pengaturan bidang koordinat bodi robot dapat dilihat pada Gambar 14.



**Gambar 13. Ukuran Offset Pusat Kaki Terhadap
Pusat Bodi Robot**



Gambar 14. Bidang Koordinat Bodi Robot

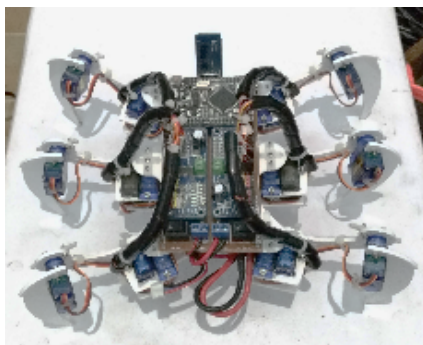
Metode *body kinematics* ini diterapkan pada gerakan robot yaitu gerakan rotasi statis, gerakan putaran, dan gerakan dinamis yang meliputi gerak maju, mundur, samping kanan, dan samping kiri.

3.3 Realisasi Robot *Hexapod*

Pada robot *hexapod* yang digunakan pada penelitian ini, digunakan mikrokontroler berbasis ATmega 2560. Motor *servo* yang digunakan adalah jenis SG90 berjumlah 18 buah. Untuk driver motor servo, digunakan driver PCA9685. Robot ini dapat dikendalikan secara nirkabel dengan perangkat *bluetooth*. Sumber catu daya pada robot ini menggunakan baterai Li-Po 7.4V. Material rangka menggunakan bahan akrilik. Hasil realisasi robot ini dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 15. Realisasi Robot *Hexapod* Tampak Depan



Gambar 16. Realisasi Robot *Hexapod* Tampak Atas

4 HASIL DAN ANALISA

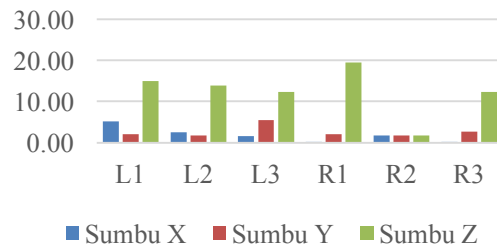
4.1 Pengujian *Inverse Kinematics*

Pengujian dilakukan dengan pengukuran posisi ujung kaki setelah menjalankan fungsi *inverse kinematics*. Hasil pengujian *inverse kinematics* pada kaki dapat dilihat pada Tabel 2. Perbandingan rata-rata error tiap kaki dapat dilihat pada gambar 17.

Tabel 2. Hasil Rataan Error *Inverse Kinematics* Kaki Robot

Kaki	Rata-rata persentase error (%)		
	Sumbu X	Sumbu Y	Sumbu Z
L1	5,08	2,08	15,00
L2	2,53	1,67	13,89
L3	1,50	5,42	12,22
R1	0,25	2,08	19,44
R2	1,73	1,67	1,67
R3	0,25	2,71	12,22
Rataan	1,89	2,60	12,41

**Grafik Rataan Persen Error
Inverse Kinematics Tiap Kaki**



Gambar 17 Grafik Rataan Error *inverse Kinematics* Kaki Robot

Dari percobaan *inverse kinematics* dapat disimpulkan nilai rata-rata error sumbu X pada tiap kaki adalah 1.89%, pada sumbu Y adalah 2.6%, dan pada sumbu Z adalah 12,4%

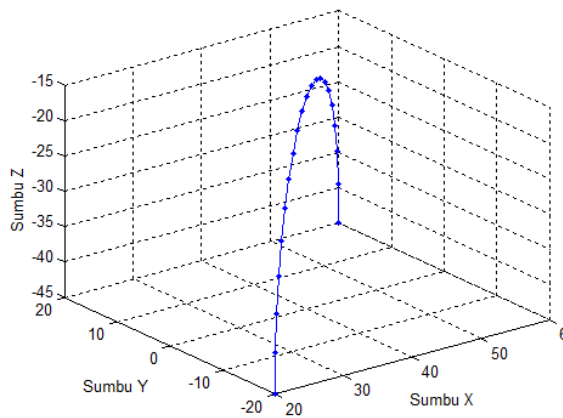
4.2 Pengujian Trayektori Langkah

Pengujian dilakukan dengan menguji hasil data keluaran dari fungsi trayektori kaki. Input yang diberikan pada program adalah parameter titik awal {x,y} = {20,-20} , titik akhir {x,y} = {60,-20} , titik pijak (z) = -45, titik puncak (z) = -15, dan besar iterasi = 0.05. Bentuk kurva yang dihasilkan adalah seperti pada Gbr. 19. Data hasil perhitungan trayektori dapat dilihat pada Gbr 18.

0	sumbu X=20.00	sumbu Y=20.00	sumbu Z=-45.00
1	sumbu X=20.29	sumbu Y=19.71	sumbu Z=-39.30
2	sumbu X=21.12	sumbu Y=18.88	sumbu Z=-34.20
3	sumbu X=22.43	sumbu Y=17.57	sumbu Z=-29.70
4	sumbu X=24.16	sumbu Y=15.84	sumbu Z=-25.80
5	sumbu X=26.25	sumbu Y=13.75	sumbu Z=-22.50
6	sumbu X=28.64	sumbu Y=11.36	sumbu Z=-19.80
7	sumbu X=31.27	sumbu Y=8.73	sumbu Z=-17.70
8	sumbu X=34.08	sumbu Y=5.92	sumbu Z=-16.20
9	sumbu X=37.01	sumbu Y=2.99	sumbu Z=-15.30
10	sumbu X=40.00	sumbu Y=0.00	sumbu Z=-15.00
11	sumbu X=42.99	sumbu Y=-2.99	sumbu Z=-15.30
12	sumbu X=45.92	sumbu Y=-5.92	sumbu Z=-16.20
13	sumbu X=48.73	sumbu Y=-8.73	sumbu Z=-17.70
14	sumbu X=51.36	sumbu Y=-11.36	sumbu Z=-19.80
15	sumbu X=53.75	sumbu Y=-13.75	sumbu Z=-22.50
16	sumbu X=55.84	sumbu Y=-15.84	sumbu Z=-25.80
17	sumbu X=57.57	sumbu Y=-17.57	sumbu Z=-29.70
18	sumbu X=58.88	sumbu Y=-18.88	sumbu Z=-34.20
19	sumbu X=59.71	sumbu Y=-19.71	sumbu Z=-39.30
20	sumbu X=60.00	sumbu Y=-20.00	sumbu Z=-45.00

Gambar 18. Hasil Data Pengujian Trayektori Langkah

Grafik Trayektori Langkah Pengujian 2



Gambar 19. Grafik Pengujian Trayektori Langkah

Berdasarkan hasil pengujian, titik-titik trayektori mencapai titik-titik uji yang diinginkan.

4.3 Pengujian Rotasi Statis

Pengujian dilakukan dengan cara memberikan set point sudut rotasi dan kemudian dilakukan pengukuran hasil rotasi pada robot. Hasil pengujian gerak rotasi dijelaskan pada tabel 3 untuk gerak rotasi sumbu X, tabel 4 untuk gerak rotasi sumbu Y, dan tabel 5 untuk gerak rotasi sumbu Z. Perbandingan error gerak rotasi statis pada sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z dapat dilihat pada gambar 20.

Tabel 3. Hasil Pengujian Gerak Rotasi Sumbu X

Set Point Sudut (derajat)	Hasil Sudut Pengukuran (derajat)	Error (derajat)
15.00	11.24	3.76
10.00	7.59	2.41
5.00	4.99	0.01
-5.00	-4.34	0.66
-10.00	-7.80	2.20
-15.00	-13.67	1.33
Rata-rata		1.73

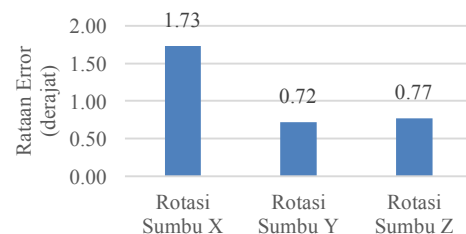
Tabel 4. Hasil Pengujian Gerak Rotasi Sumbu Y

Set Point Sudut (derajat)	Hasil Sudut Pengukuran (derajat)	Error (derajat)
15	13.74	1.26
10	8.86	1.14
5	4.30	0.70
-5	-4.56	0.44
-10	-9.90	0.10
-15	-14.32	0.68
Rata-rata		0.72

Tabel 5. Hasil Pengujian Gerak Rotasi Sumbu Z

Set Point Sudut (derajat)	Hasil Sudut Pengukuran (derajat)	Error (derajat)
15.00	15.78	0.78
10.00	10.32	0.32
5.00	6.38	1.38
-5.00	-4.06	0.94
-10.00	-9.18	0.82
-15.00	-14.61	0.39
Rata-rata		0.77

Grafik Rataan Error Gerak Rotasi Statis Robot



Gambar 20. Grafik Perbandingan Rataan Error Gerak Rotasi Statis

Berdasarkan hasil pengujian, Rataan error pada rotasi sumbu X merupakan yang terbesar dengan nilai 1.73 derajat.

4.4 Pengujian Gerakan Putar

Pengujian dilakukan pada dua arah putar yang berbeda yaitu ke kiri dan ke kanan. Besar sudut pengujian masing-masing hingga 180 derajat. Hasil pengujian gerak putar kiri berada pada tabel 6 dan gerak putar kanan pada tabel 7. Perbandingan error gerak putar kanan dan putar kiri dapat dilihat pada gambar 21.

Tabel 6. Hasil Pengujian Gerak Putar Kiri

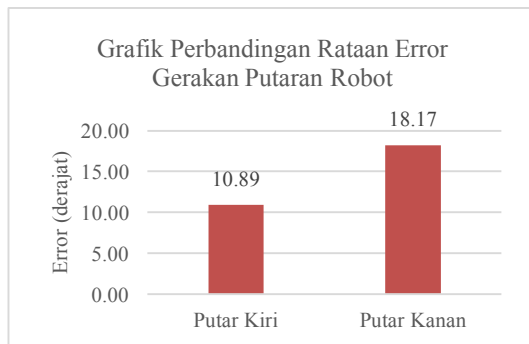
Set Sudut Putar (derajat)	Hasil Sudut Ukur (derajat)	Error Sudut (derajat)
30	25.67	4.33
60	55.00	5.00
90	84.00	6.00
120	108.33	11.67
150	135.00	15.00
180	156.67	23.33
Rata-Rata		10.89

Tabel 7. Hasil Pengujian Gerak Putar Kanan

Set Sudut Putar (derajat)	Hasil Sudut Ukur (derajat)	Error Sudut (derajat)
-30	-23.00	7.00
-60	-50.00	10.00
-90	-76.67	13.33
-120	-101.33	18.67
-150	-125.00	25.00
-180	-145.00	35.00
Rata-Rata		18.17

Tabel 9. Hasil Pengujian Gerak Mundur

Set Jarak (cm)	Jarak Total Pengukuran (cm)	Sudut Akhir Bodi (derajat)	Error Jarak (cm)	Kemiringan (derajat)
-10	8.49	6.33	1.51	19.50
-20	15.20	10.00	4.80	15.26
-30	23.04	14.00	6.96	14.24
-40	29.44	15.00	10.56	15.77
-50	39.33	17.33	10.67	16.75
Rata-rata		12.53	6.90	16.30



Gambar 21. Grafik Perbandingan Rataan Error Gerak Putar Robot

Tabel 10. Hasil Pengujian Gerak Samping Kanan

Set Jarak (cm)	Jarak Total Pengukuran (cm)	Sudut Akhir Bodi (derajat)	Error Jarak (cm)	Kemiringan (derajat)
10	10.23	0.00	0.23	6.55
20	20.10	0.00	0.10	5.71
30	30.23	1.00	0.23	3.79
40	40.41	3.00	0.41	3.55
50	51.00	-4.33	1.00	0.75
60	60.54	-3.67	0.54	2.05
70	72.13	-1.17	2.13	3.44
Rata-rata		1.88	0.66	3.69

Tabel 11. Hasil Pengujian Gerak Samping Kiri

Set Jarak (cm)	Jarak Total Pengukuran (cm)	Sudut Akhir Bodi (derajat)	Error Jarak (cm)	Kemiringan (derajat)
-10	8.86	0.00	1.14	11.94
-20	19.23	2.83	0.77	4.47
-30	27.29	5.00	2.71	8.43
-40	37.58	8.00	2.42	3.81
-50	47.52	10.00	2.48	5.03
-60	55.68	14.00	4.32	1.03
-70	65.42	15.00	4.58	2.92
Rata-rata		7.83	2.63	5.38

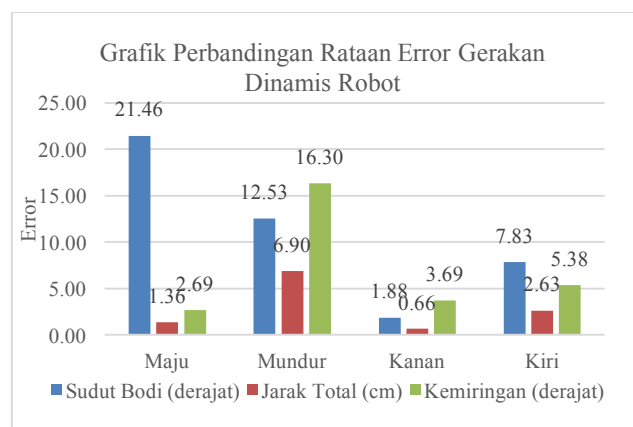
Berdasarkan data hasil pengujian, Rataan error terbesar dimiliki oleh gerakan putar kanan dengan error sebesar 18.17 derajat.

4.5 Pengujian Gerakan Dinamis

Pengujian gerakan ini dibagi menjadi 4 bagian, yaitu gerak maju, gerak mundur, gerak samping kanan, dan gerak samping kiri. Masing-masing gerakan memiliki set point yang berbeda. Hasil pengujian gerakan dinamis berada pada tabel 8 hingga tabel 10.

Tabel 8. Hasil Pengujian Gerak Maju

Set Jarak (cm)	Jarak Total Pengukuran (cm)	Sudut Akhir Bodi (derajat)	Error Jarak (cm)	Kemiringan (derajat)
10.00	10.67	5.00	0.67	0.00
20.00	21.00	10.00	1.00	0.00
30.00	31.00	20.00	1.00	0.31
40.00	41.67	21.67	1.67	0.46
50.00	51.03	26.67	1.03	2.06
60.00	61.79	28.33	1.79	3.56
70.00	71.24	33.33	1.24	7.26
80.00	82.45	26.67	2.45	7.90
Rata-rata		21.46	1.36	2.69



Gambar 22. Grafik Perbandingan Rataan Error Gerakan Dinamis

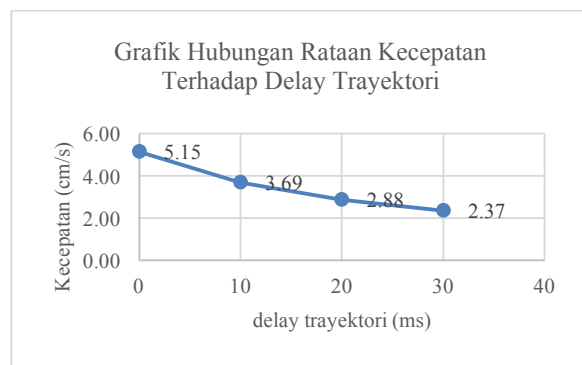
Berdasarkan gambar 22, Rataan error sudut bodi terbesar adalah pada gerakan maju yaitu sebesar 21.46 derajat, sedangkan error sudut bodi terkecil yaitu pada gerakan samping kanan dengan nilai 1.86 derajat. Rataan error jarak terbesar yaitu pada gerakan mundur dengan nilai 6.90 cm dan error jarak terkecil yaitu pada gerakan samping kanan dengan nilai 0.66 cm. Rataan error kemiringan terbesar yaitu pada gerakan mundur dengan nilai 16.30 derajat dan error kemiringan terkecil yaitu pada gerakan maju dengan nilai 2.69 derajat.

4.6 Pengujian Kecepatan Robot

Pengujian dilakukan dengan cara melakukan pengujian gerakan maju dengan jarak 50 cm, kemudian selama pengujian tersebut dilakukan pencatatan waktu menggunakan *stopwatch*. Hasil kecepatan merupakan pembagian jarak tempuh dan waktu tempuh. Data kecepatan disajikan dalam satuan cm/s dan delay trayektori merupakan variabel pengujian kecepatan ini. Data hasil pengujian ini dapat dilihat pada tabel 12 sebagai berikut. Perbandingan hubungan delay trayektori dan kecepatan dapat dilihat pada gambar 23.

Tabel 12. Hasil Pengujian Kecepatan Robot

Set Delay Trayektori	Rataan Waktu Tempuh (s)	Kecepatan (cm/s)
0	9.70	5.15
10	13.54	3.69
20	17.38	2.88
30	21.12	2.37



Gambar 23. Grafik Hubungan Kecepatan terhadap Delay Trayektori Kaki

Berdasarkan data yang diperoleh, kecepatan tertinggi diperoleh dengan delay trayektori sebesar 0 ms

dengan kecepatan mencapai 5.15 cm/s. Dapat disimpulkan bahwa kecepatan robot berbanding terbalik dengan nilai delay trayektori kaki.

5 KESIMPULAN

Algoritma *inverse kinematics* dan trayektori langkah telah berhasil diimplementasikan kepada robot *hexapod*. Dari hasil yang didapat, nilai rata-rata error sumbu X pada tiap kaki adalah 1.89%, pada sumbu Y adalah 2.6%, dan pada sumbu Z adalah 12,4%. 3. Metode *body kinematics* pada gerakan rotasi statis memiliki rataan error pada rotasi sumbu X sebesar 1.73 derajat, rotasi sumbu Y sebesar 0.72 derajat, dan rotasi sumbu Z sebesar 0.77 derajat. 4. Metode *body kinematics* pada gerakan putaran memiliki rataan error gerakan putar kanan sebesar 18.17 derajat, sedangkan gerakan putar kiri memiliki rataan error sebesar 10.89 derajat. Pada metode *body kinematics* gerakan dinamis, rataan error sudut bodi terbesar adalah pada gerakan maju sebesar 21.46 derajat, rataan error jarak terbesar yaitu pada gerakan mundur sebesar 6.90 cm, dan rataan error kemiringan terbesar yaitu pada gerakan mundur sebesar 16.3 derajat. Robot menggunakan pola langkah *tripod gait* dengan kecepatan maksimum mencapai 5.15 cm/s.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Isvara, Yudi, Dinara Prabakti, Wiharsa Pragitatama. *Algoritma Tripod Gait dan Kinematika Balikan pada Robot Hexapod..* Institut Teknologi Bandung. 2012
- [2] Habibi, Danang. *Penerapan Inverse Kinematic Pada Pengendalian Gerak Robot.* Institut Teknologi Sepuluh November. 2012
- [3] Oscar. (2012) *Inverse Kinematics for Hexapod and Quadruped Robots.* [Online], <https://oscarliang.com/inverse-kinematics-implementation-hexapod-robots/> , tanggal akses 25 April 2018
- [4] Shahriari, Mohammadali, Kambiz G O, Amir A A K. *Modular Framework Kinematic and Fuzzy Reward Reinforcement Learning Analysis of a Radially Symmetric Six-Legged Robot.* Life Science Journal 2013;10(8s). 2013.
- [5] Jatmiko, Wisnu, dkk. *Robotika: Teori dan Aplikasi.* 2012. Universitas Indonesia.
- [6] Chairunnas, Andi. *Penerapan Algoritma Tripod Gait Pada Robot Hexapod Menggunakan Arduino Mega128.* JPPI Vol 7 No 1 (2017) 37-48. 2017.
- [7] Johnson, Cristopher B. *Omnidirectional Control of the Hexapod Robot TigerBug.* 2014. Rochester Institute of Technology.