

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian keseluruhan sistem dianalisis pada bab ini. Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui apakah alat yang telah dibuat berfungsi dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi desain. Pengujian pada sistem meliputi pengujian setiap blok maupun pengujian sistem secara keseluruhan. Pengujian setiap blok dilakukan untuk menemukan letak kesalahan dan mempermudah analisis pada sistem apabila alat tidak bekerja sesuai dengan perancangan skema pembuatan. Pengujian pada sistem ini dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

1. Pengujian waktu eksekusi sistem
2. Pengujian perpindahan pada gerakan maju *quadruped robot*
3. Pengujian deviasi sudut orientasi *yaw* pada gerakan maju *quadruped robot*
4. Pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pada gerakan maju *quadruped robot*
5. Pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pada gerakan maju *quadruped robot*

4.1 Pengujian Waktu Eksekusi Sistem

Waktu eksekusi sistem memengaruhi *control loop sample time* (T) yang dapat dipakai dalam dari suatu *closed-loop control system*, maka dari itu harus dilakukan pengujian secara khusus pada aspek ini. Hasil pengujian waktu eksekusi sistem akan bermanfaat sebagai acuan pada penelitian selanjutnya yang bertujuan untuk merancang *closed-loop control system* menggunakan *quadruped robot platform* yang dirancang pada penelitian ini.

Pengujian waktu eksekusi sistem pada penelitian ini dilakukan secara otomatis dengan menggunakan fitur *interrupt timer* pada mikrokontroler STM32F407VGT6. Fitur ini memungkinkan mikrokontroler untuk menjalankan suatu routine pencacah (counter) dengan frekuensi yang dapat diatur serta tidak mengganggu performa robot. Untuk menghasilkan pengukuran waktu eksekusi yang presisi, maka pada penelitian ini dirancanglah *counter* dengan ketelitian 1 ms. *Counter* dibuat dengan mengatur konfigurasi *interrupt timer* dengan mengacu pada persamaan 3.13.

Waktu eksekusi program yang diuji menggunakan *Timer Interrupt Based Counter* ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1

Waktu Eksekusi Sistem *Quadruped Robot*

No	Mode Pergerakan	Trajectory Generator (ms)	Inverse Kinematics (ms)	Pergerakan Maju (ms)	Total (ms)
1	5 cm	1	100	7.898	7.999
2	10 cm	1	100	7.943	8.044
3	15 cm	1	100	7.970	8.071
4	20 cm	1	100	8.015	8.116
5	25 cm	1	100	8.024	8.125
6	30 cm	1	100	8.042	8.143
Rata-Rata (ms)		1	100	7.982	8.083

Rata-rata waktu eksekusi dari sistem *quadruped robot* untuk berjalan maju sebanyak lima langkah adalah 8.083 ms, sehingga robot memerlukan waktu 1.697 ms untuk berjalan sebanyak satu langkah. Waktu eksekusi yang didapat dapat dijadikan acuan dalam penelitian selanjutnya untuk menentukan *control loop sample time* (T) pada *closed-loop controller*.

4.2 Pengujian Perpindahan pada Gerakan Maju *Quadruped Robot*

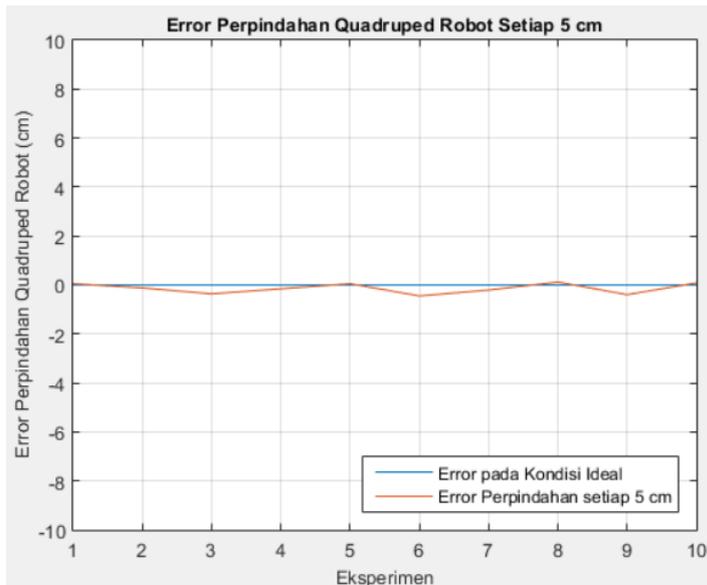
Pengujian perpindahan pada gerakan maju bertujuan untuk mencari tahu apakah perpindahan aktual *quadruped robot* sesuai dengan instruksi yang diberikan. Prosedur pengujian dilakukan dengan meletakkan robot di suatu bidang datar menghadap kearah tembok yang berada tegak lurus di depan robot. Robot akan diuji pada mode pergerakan maju 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, serta 30 cm. Untuk menguji reliabilitas sistem pergerakan, *quadruped robot* diatur agar melangkah sebanyak lima siklus, dengan lebar langkah yang berbeda-beda sesuai dengan jarak perpindahan yang diinginkan.

Pengujian dilakukan secara otomatis dengan bantuan sensor HCSR-04 *ultrasonic rangefinder*. Nilai error didapatkan dengan menghitung selisih dari nilai pembacaan HCSR-04 di awal dan akhir pergerakan. Error yang bernilai minus memiliki arti bahwa perpindahan aktual robot kurang dari instruksi perpindahan yang diberikan, sebaliknya error bernilai positif apabila perpindahan aktual robot lebih dari instruksi perpindahan yang diberikan.

Sesuai spesifikasi desain yang telah dirancang, error maksimal dari *quadruped robot* adalah 5%. Masing-masing mode pergerakan maju diuji sebanyak sepuluh kali.

a. Pengujian Pergerakan Maju 5 cm

Pengujian perpindahan *quadruped robot* pada mode pergerakan maju 5 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 0,5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*. Pada kondisi ideal, konfigurasi demikian akan membuat robot bergerak maju sejauh 0,5 cm pada satu kali *swing phase*, sehingga *quadruped robot* akan bergerak maju sejauh 1 cm pada setiap siklus. *Quadruped robot* akan melangkah sebanyak lima siklus. Sesuai spesifikasi desain, error maksimal dari mode pergerakan maju 5 cm adalah 0,25 cm.



Gambar 4.1 Grafik Error Perpindahan *Quadruped Robot* Setiap 5 cm

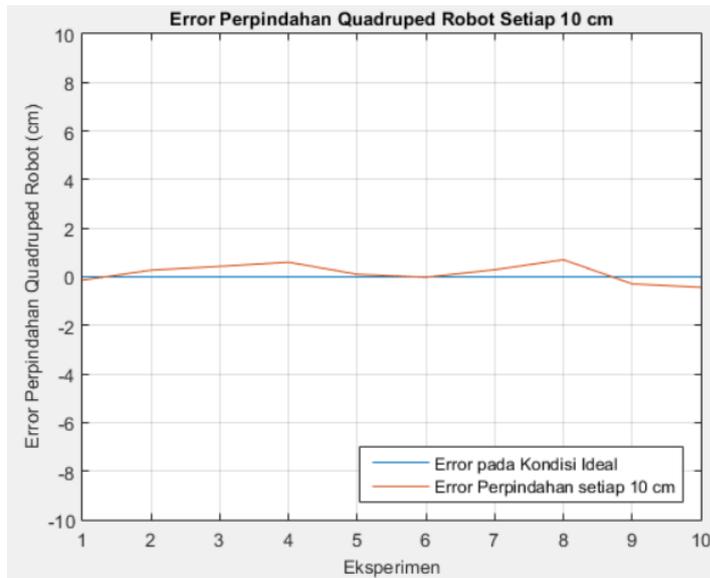
Dari sepuluh kali pengujian, error rata-rata dari pergerakan maju 5 cm adalah -0,137 cm, yang merupakan 2,748% dari 5 cm. Data lengkap dari pengujian perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan maju 5 cm dapat dilihat di lampiran. Grafik error perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan 5 cm ditunjukkan pada Gambar 4.1.

b. Pengujian Pergerakan Maju 10 cm

Pengujian perpindahan *quadruped robot* pada mode pergerakan maju 10 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 1$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*. Pada kondisi ideal, konfigurasi demikian akan membuat robot bergerak maju sejauh 1 cm pada satu kali *swing phase*, sehingga *quadruped robot* akan bergerak maju sejauh 2 cm pada setiap siklus. *Quadruped robot* akan melangkah sebanyak lima siklus. Sesuai spesifikasi desain, error maksimal dari mode pergerakan maju 10 cm adalah 0,5 cm.

Dari sepuluh kali pengujian, error rata-rata dari pergerakan maju 10 cm adalah -0,153 cm, yang merupakan 1,529% dari 10 cm. Data lengkap dari pengujian perpindahan

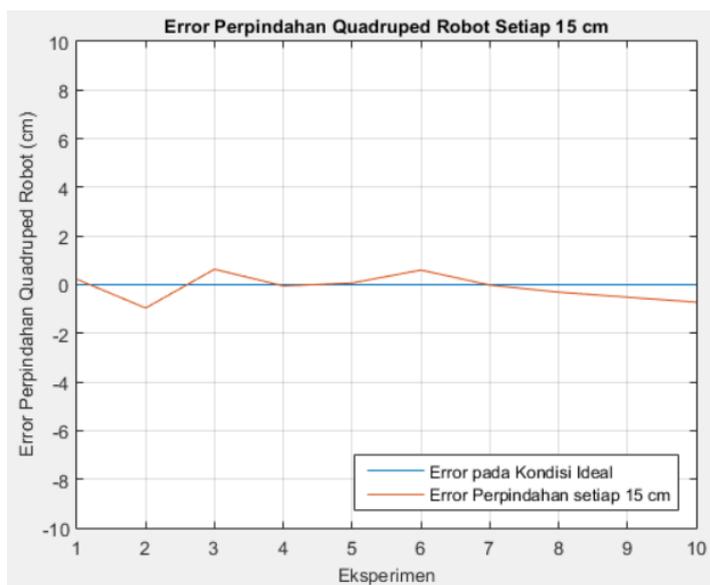
quadruped robot pada pergerakan maju 10 cm dapat dilihat di lampiran. Grafik error perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan 10 cm ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik Error Perpindahan *Quadruped Robot* Setiap 10 cm

c. Pengujian Pergerakan Maju 15 cm

Pengujian perpindahan *quadruped robot* pada mode pergerakan maju 15 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 1.5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*. Pada kondisi ideal, konfigurasi demikian akan membuat robot bergerak maju sejauh 1,5 cm pada satu kali *swing phase*, sehingga *quadruped robot* akan bergerak maju sejauh 3 cm pada setiap siklus. *Quadruped robot* akan melangkah sebanyak lima siklus. Sesuai spesifikasi desain, error maksimal dari mode pergerakan maju 15 cm adalah 0.75 cm.

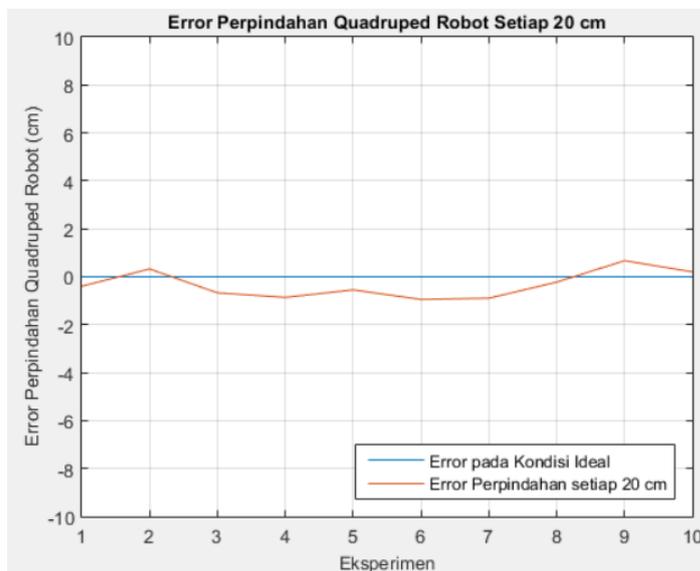


Gambar 4.3 Grafik Error Perpindahan *Quadruped Robot* Setiap 15 cm

Dari sepuluh kali pengujian, error rata-rata dari pergerakan maju 15 cm adalah -0,105 cm, yang merupakan 0,699% dari 15 cm. Data lengkap dari pengujian perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan maju 15 cm dapat dilihat di lampiran. Grafik error perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan 15 cm ditunjukkan pada Gambar 4.3.

d. Pengujian Pergerakan Maju 20 cm

Pengujian perpindahan *quadruped robot* pada mode pergerakan maju 20 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 2$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*. Pada kondisi ideal, konfigurasi demikian akan membuat robot bergerak maju sejauh 1,5 cm pada satu kali *swing phase*, sehingga *quadruped robot* akan bergerak maju sejauh 3 cm pada setiap siklus. *Quadruped robot* akan melangkah sebanyak lima siklus. Sesuai spesifikasi desain, error maksimal dari mode pergerakan maju 20 cm adalah 1 cm.



Gambar 4.4 Grafik Error Perpindahan *Quadruped Robot* Setiap 20 cm

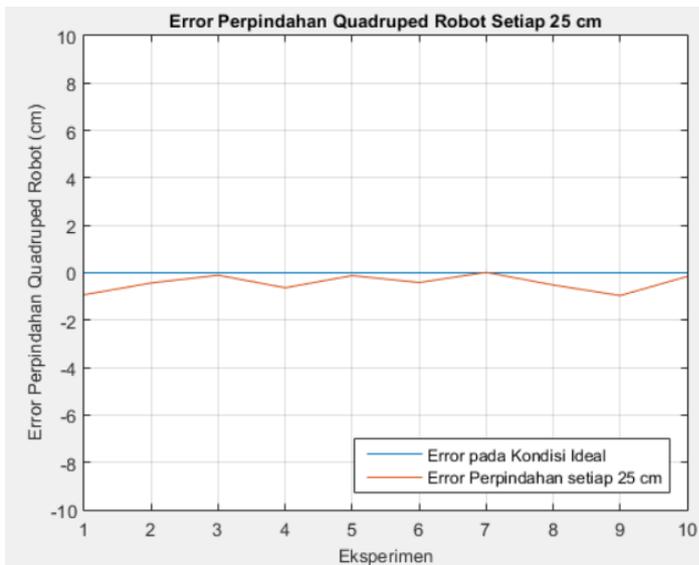
Dari sepuluh kali pengujian, error rata-rata dari pergerakan maju 20 cm adalah -0,333 cm, yang merupakan 1,667% dari 20 cm. Data lengkap dari pengujian perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan maju 20 cm dapat dilihat di lampiran. Grafik error perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan 20 cm ditunjukkan pada Gambar 4.4.

e. Pengujian Pergerakan Maju 25 cm

Pengujian perpindahan *quadruped robot* pada mode pergerakan maju 25 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 2,5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*. Pada kondisi ideal, konfigurasi demikian akan membuat robot bergerak maju sejauh 2,5 cm pada satu kali *swing phase*, sehingga *quadruped robot* akan bergerak maju sejauh 5 cm pada

setiap siklus. *Quadruped robot* akan melangkah sebanyak lima siklus. Sesuai spesifikasi desain, error maksimal dari mode pergerakan maju 25 cm adalah 1,25 cm.

Dari sepuluh kali pengujian, error rata-rata dari pergerakan maju 25 cm adalah -0,424 cm, yang merupakan 1,697% dari 25 cm. Data lengkap dari pengujian perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan maju 25 cm dapat dilihat di lampiran. Grafik error perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan 25 cm ditunjukkan pada Gambar 4.5.

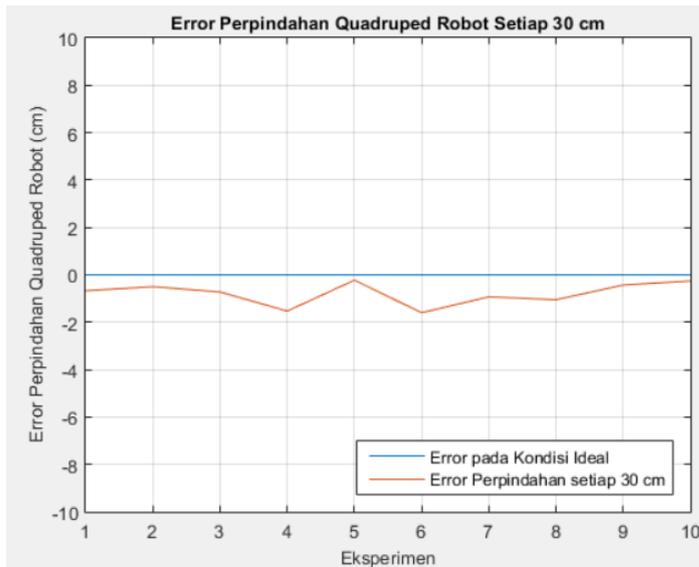


Gambar 4.5 Grafik Error Perpindahan *Quadruped Robot* Setiap 25 cm

f. Pengujian Pergerakan Maju 30 cm

Pengujian perpindahan *quadruped robot* pada mode pergerakan maju 30 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 3$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*. Pada kondisi ideal, konfigurasi demikian akan membuat robot bergerak maju sejauh 3 cm pada satu kali *swing phase*, sehingga *quadruped robot* akan bergerak maju sejauh 6 cm pada setiap siklus. *Quadruped robot* akan melangkah sebanyak lima siklus. Sesuai spesifikasi desain, error maksimal dari mode pergerakan maju 30 cm adalah 1,5 cm.

Dari sepuluh kali pengujian, error rata-rata dari pergerakan maju 30 cm adalah -0,7904 cm, yang merupakan 2,635% dari 30 cm. Data lengkap dari pengujian perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan maju 30 cm dapat dilihat di lampiran. Grafik error perpindahan *quadruped robot* pada pergerakan 30 cm ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Error Perpindahan *Quadruped Robot* Setiap 30 cm

g. Analisis Pengujian Perpindahan Pergerakan Maju *Quadruped Robot*

Berdasarkan pengujian perpindahan pergerakan maju *quadruped robot* pada enam mode yang berbeda, didapatkan error rata-rata pada semua mode adalah -0,273 cm. Data error rata-rata perpindahan pada pergerakan maju *quadruped robot* ditunjukkan pada Tabel 4.2.

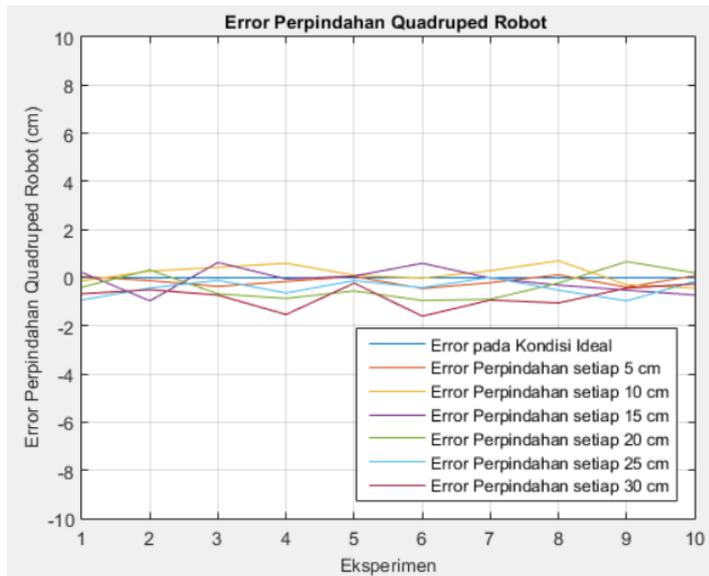
Tabel 4.2

Error Rata-Rata Perpindahan pada Pergerakan Maju *Quadruped Robot*

Mode	Nomor Percobaan										Rata-Rata (cm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5 cm	0.052	-0.12	-0.361	-0.155	0.052	-0.447	-0.206	0.12	-0.395	0.086	-0.138
10 cm	-0.137	0.275	0.43	0.601	0.103	-0.017	0.292	0.704	-0.292	-0.43	0.153
15 cm	0.223	-0.962	0.636	-0.052	0.069	0.601	-0.017	-0.309	-0.515	-0.722	-0.105
20 cm	-0.395	0.326	-0.67	-0.86	-0.548	-0.945	-0.894	-0.223	0.67	0.206	-0.333
25 cm	-0.928	-0.43	-0.103	-0.633	-0.12	-0.412	0.017	-0.516	-0.962	-0.155	-0.424
30 cm	-0.67	-0.498	-0.722	-1.529	-0.223	-1.598	-0.928	-1.048	-0.43	-0.258	-0.790
Rata-Rata											-0.273

Persentase error perpindahan rata-rata pada semua mode adalah 1,32% dengan kecenderungan perpindahan aktual kurang dari instruksi yang diberikan. Persentase error perpindahan *quadruped robot* sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan, yaitu < 5% sehingga sistem *open loop controller* masih layak digunakan pada penelitian ini.

Grafik error rata-rata perpindahan pada pergerakan maju *quadruped robot* ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Error Perpindahan *Quadruped Robot* pada Semua Mode

4.3 Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Yaw* pada Pergerakan Maju *Quadruped Robot*

Pengujian deviasi sudut orientasi *yaw* pada pergerakan Maju *quadruped robot* bertujuan untuk menguji reliabilitas *quadruped robot* dalam berjalan pada satu garis lurus. Prosedur pengujian dilakukan dengan meletakkan robot di suatu bidang datar menghadap ke arah tembok yang berada tegak lurus di depan robot. Robot akan diuji pada mode pergerakan maju 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, serta 30 cm. Untuk menguji reliabilitas sistem pergerakan, *quadruped robot* diatur agar melangkah sebanyak lima siklus, dengan lebar langkah yang berbeda-beda sesuai dengan jarak perpindahan yang diinginkan.

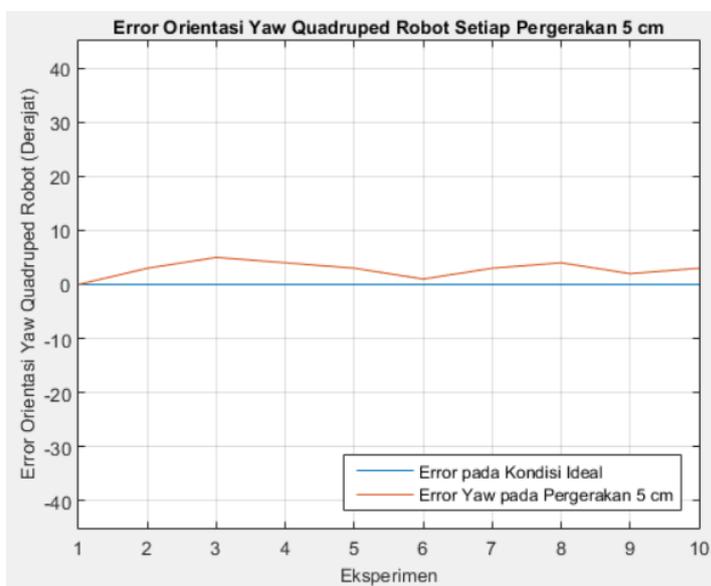
Pengujian dilakukan secara otomatis dengan bantuan sensor CMPS11 *magnetic compass*. Nilai error didapatkan dengan menghitung selisih dari nilai pembacaan *compass bearing* CMPS11 di awal dan akhir pergerakan. Error yang bernilai positif memiliki arti bahwa robot bergerak serong ke arah kiri, sebaliknya error bernilai negatif apabila robot bergerak serong ke arah kanan.

Sesuai spesifikasi desain yang telah dirancang, error maksimal dari deviasi sudut orientasi *yaw* dari *quadruped robot* adalah 10° . Masing-masing mode pergerakan maju diuji sebanyak sepuluh kali.

a. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Yaw* pada pergerakan maju 5 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *yaw* pada mode pergerakan maju 5 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 0,5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 5 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *yaw* pada pergerakan maju 5 cm *quadruped robot* adalah $2,8^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *yaw quadruped robot* pada pergerakan 5 cm dapat dilihat pada Gambar 4.8.

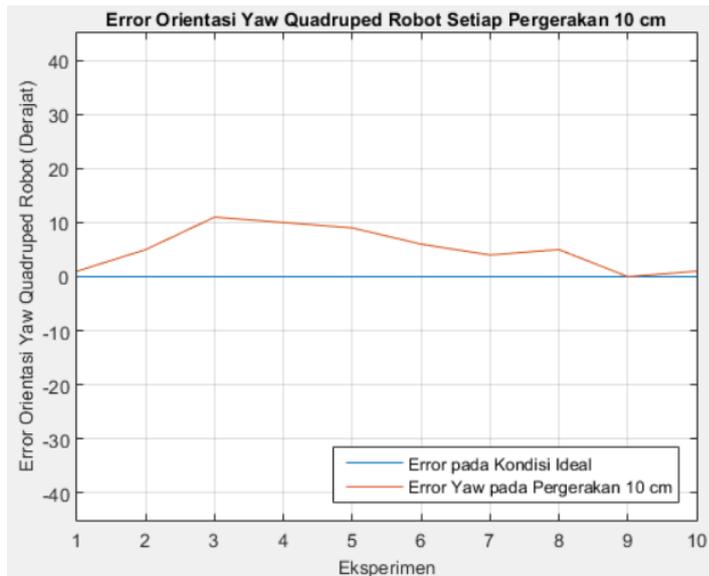


Gambar 4.8 Grafik Error Sudut Orientasi *Yaw* Setiap 5 cm

b. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Yaw* pada pergerakan maju 10 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *yaw* pada mode pergerakan maju 10 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 1$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 10 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

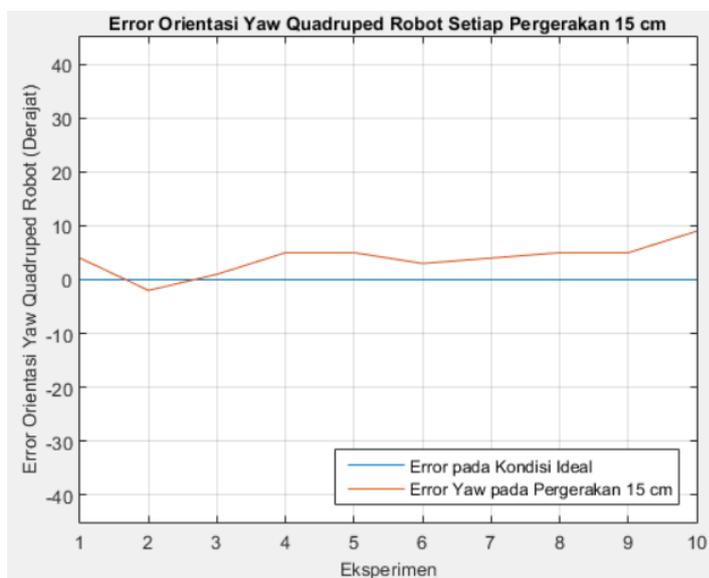
Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *yaw* pada pergerakan maju 10 cm *quadruped robot* adalah $5,2^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *yaw quadruped robot* pada pergerakan 10 cm dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.9 Grafik Error Sudut Orientasi Yaw Setiap 10 cm

c. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi Yaw pada pergerakan maju 15 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi yaw pada mode pergerakan maju 15 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 1,5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 15 cm dengan tetap berada pada sumbu y.



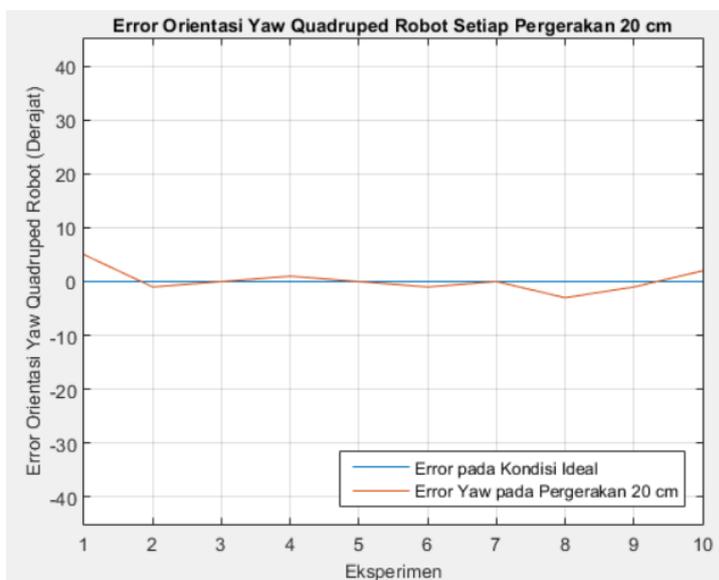
Gambar 4.10 Grafik Error Sudut Orientasi Yaw Setiap 15 cm

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi yaw pada pergerakan maju 15 cm *quadruped robot* adalah $3,9^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat

di lampiran. Grafik error orientasi *yaw quadruped robot* pada pergerakan 15 cm dapat dilihat pada Gambar 4.10.

d. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Yaw* pada pergerakan maju 20 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *yaw* pada mode pergerakan maju 20 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 2$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 20 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.



Gambar 4.11 Grafik Error Sudut Orientasi *Yaw* Setiap 20 cm

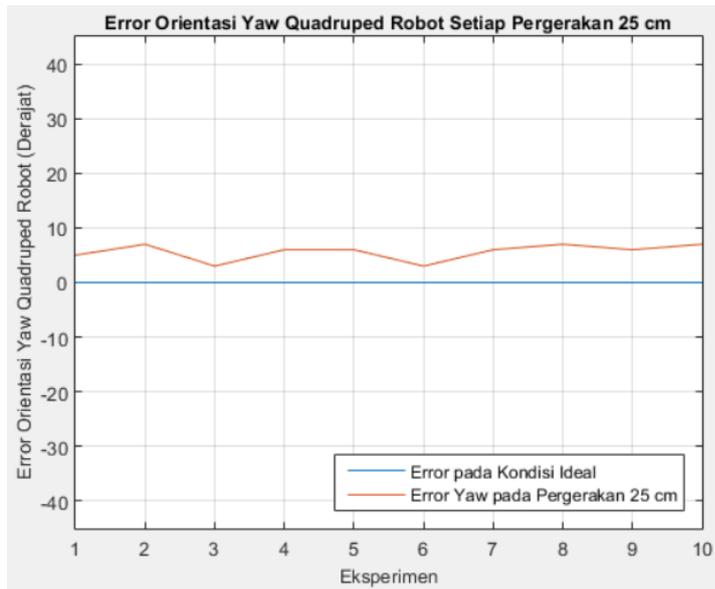
Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *yaw* pada pergerakan maju 20 cm *quadruped robot* adalah $0,2^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *yaw quadruped robot* pada pergerakan 20 cm dapat dilihat pada Gambar 4.11.

e. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Yaw* pada pergerakan maju 25 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *yaw* pada mode pergerakan maju 25 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 2.5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 25 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *yaw* pada pergerakan maju 25 cm *quadruped robot* adalah $5,6^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat

di lampiran. Grafik error orientasi *yaw quadruped robot* pada pergerakan 25 cm dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Grafik Error Sudut Orientasi *Yaw* Setiap 25 cm

f. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Yaw* pada pergerakan maju 30 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *yaw* pada mode pergerakan maju 30 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 3$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 30 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *yaw* pada pergerakan maju 30 cm *quadruped robot* adalah $7,8^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *yaw quadruped robot* pada pergerakan 30 cm dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik Error Sudut Orientasi *Yaw* Setiap 30 cm

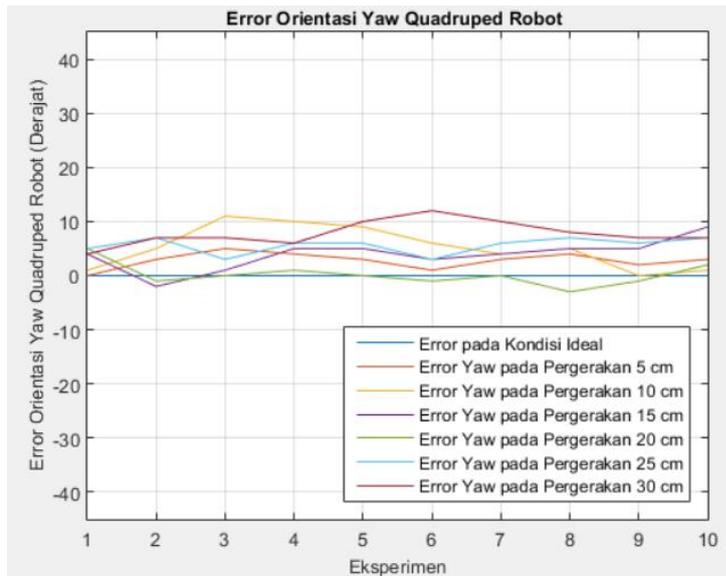
g. Analisis Deviasi Sudut Orientasi *Yaw* pada Pergerakan Maju *Quadruped Robot*

Berdasarkan pengujian deviasi sudut orientasi *yaw* pergerakan maju *quadruped robot* pada enam mode yang berbeda, didapatkan error rata-rata pada semua mode adalah $4,25^\circ$ ke arah kiri. Data rata-rata deviasi sudut orientasi *yaw* pada pergerakan maju *quadruped robot* ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3

Rata-Rata Deviasi Sudut Orientasi *Yaw Quadruped Robot*

Mode	Nomor Percobaan										Rata-Rata <i>Yaw Error</i>
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
5 cm	0	3	5	4	3	1	3	4	2	3	2.8
10 cm	1	5	11	10	9	6	4	5	0	1	5.2
15 cm	4	-2	1	5	5	3	4	5	5	9	3.9
20 cm	5	-1	0	1	0	-1	0	-3	-1	2	0.2
25 cm	5	7	3	6	6	3	6	7	6	7	5.6
30 cm	4	7	7	6	10	12	10	8	7	7	7.8
Rata-Rata (Derajat)											4.25



Gambar 4.14 Grafik Error Sudut Orientasi *Yaw* pada Semua Mode

Rata-Rata deviasi sudut orientasi *yaw* dari *quadruped robot* pada semua mode adalah $4,25^\circ$ ke arah kiri. Deviasi sudut orientasi *yaw* sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan, yaitu $< 10^\circ$ sehingga sistem *open loop controller* masih layak digunakan pada penelitian ini. Grafik rata-rata deviasi sudut orientasi *yaw* pada pergerakan maju *quadruped robot* ditunjukkan pada Gambar 4.14.

4.4 Pengujian Deviasi Orientasi *Pitch* pada Gerakan Maju *Quadruped Robot*

Pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan Maju *quadruped robot* bertujuan untuk menguji apakah *trot gait pattern* mampu membuat *quadruped robot* bergerak tanpa mengakibatkan inklinasi tubuh robot yang memungkinkan terjadinya gangguan pada pembacaan sensor.

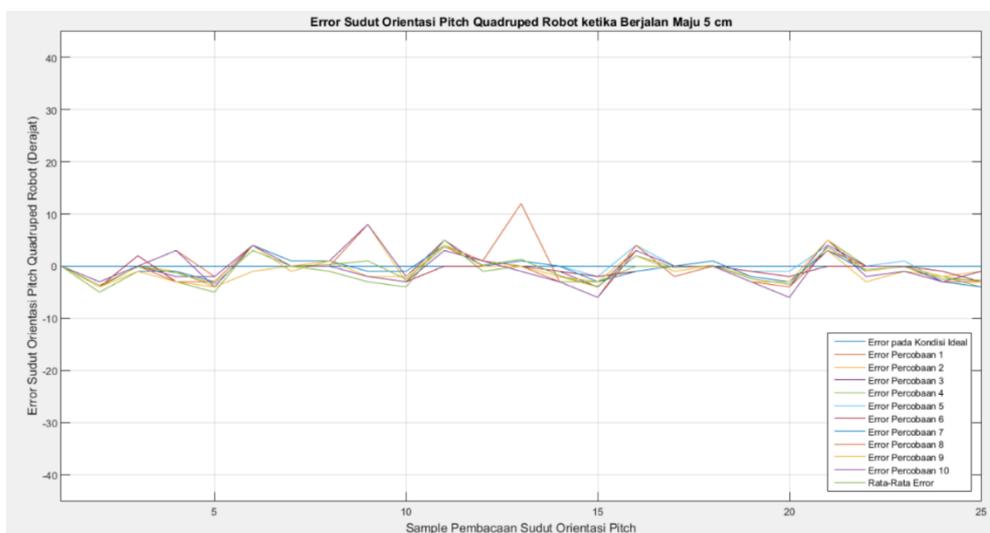
Prosedur pengujian dilakukan dengan meletakkan robot di suatu bidang datar menghadap ke arah tembok yang berada tegak lurus di depan robot. Robot akan diuji pada mode pergerakan maju 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, serta 30 cm. Untuk menguji reliabilitas sistem pergerakan, *quadruped robot* diatur agar melangkah sebanyak lima siklus, dengan lebar langkah yang berbeda-beda sesuai dengan jarak perpindahan yang diinginkan.

Pengujian dilakukan secara otomatis dengan bantuan sensor CMPS11 *magnetic compass*. Nilai error didapatkan dengan menghitung selisih dari nilai pembacaan sudut *pitch* CMPS11 terhadap nilai acuan ketika *quadruped robot* berada pada kondisi level, yaitu sudut *pitch* 0° . Error yang bernilai positif memiliki arti bahwa robot dalam posisi menukik, sebaliknya error bernilai negatif apabila robot berada dalam posisi mendongak. Pembacaan sensor dilakukan lima kali tiap siklus, yang menghasilkan 25 data dalam satu kali pengujian.

Sesuai spesifikasi desain yang telah dirancang, error maksimal dari deviasi sudut orientasi *pitch quadruped robot* adalah 10° . Masing-masing mode pergerakan maju diuji sebanyak sepuluh kali.

a. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Pitch* pada Pergerakan Maju 5 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pada mode pergerakan maju 5 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 0,5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 5 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

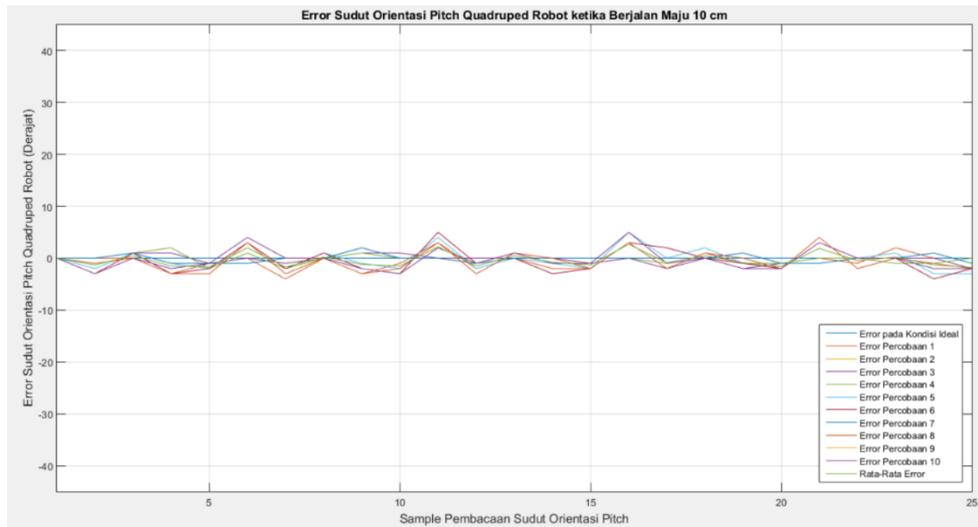


Gambar 4.15 Grafik Error Sudut Orientasi *Pitch* Setiap 5 cm

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan maju 5 cm *quadruped robot* adalah $0,548^\circ$ ke arah atas (mendongak). Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *pitch quadruped robot* pada pergerakan 5 cm dapat dilihat pada Gambar 4.15.

b. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Pitch* pada Pergerakan Maju 10 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pada mode pergerakan maju 10 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 1$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 10 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.



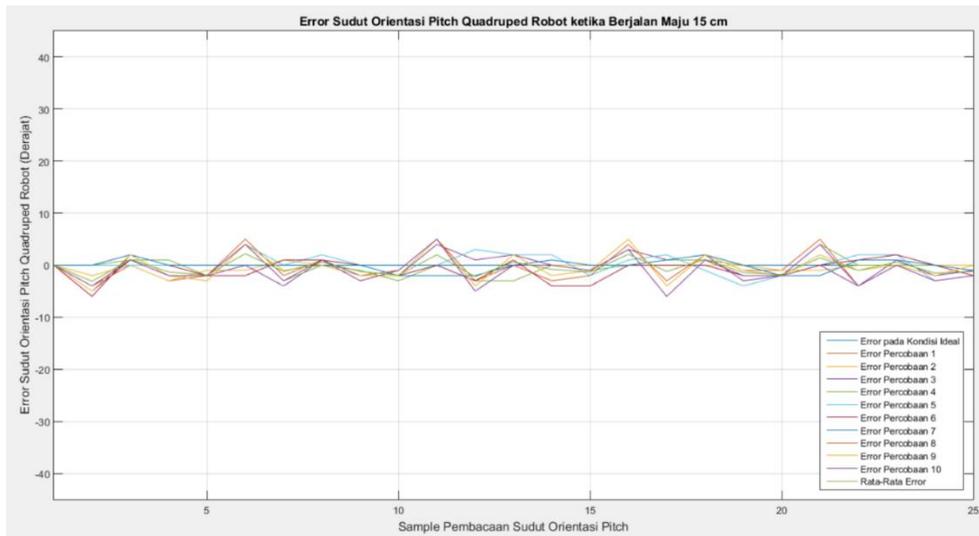
Gambar 4.16 Grafik Error Sudut Orientasi *Pitch* Setiap 10 cm.

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan maju 10 cm *quadrupe robot* adalah $0,352^\circ$ ke arah atas (mendongak). Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *pitch quadrupe robot* pada pergerakan 10 cm dapat dilihat pada Gambar 4.16.

c. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Pitch* pada Pergerakan Maju 15 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pada mode pergerakan maju 15 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 1.5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadrupe robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadrupe robot* akan melakukan perpindahan sejauh 15 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

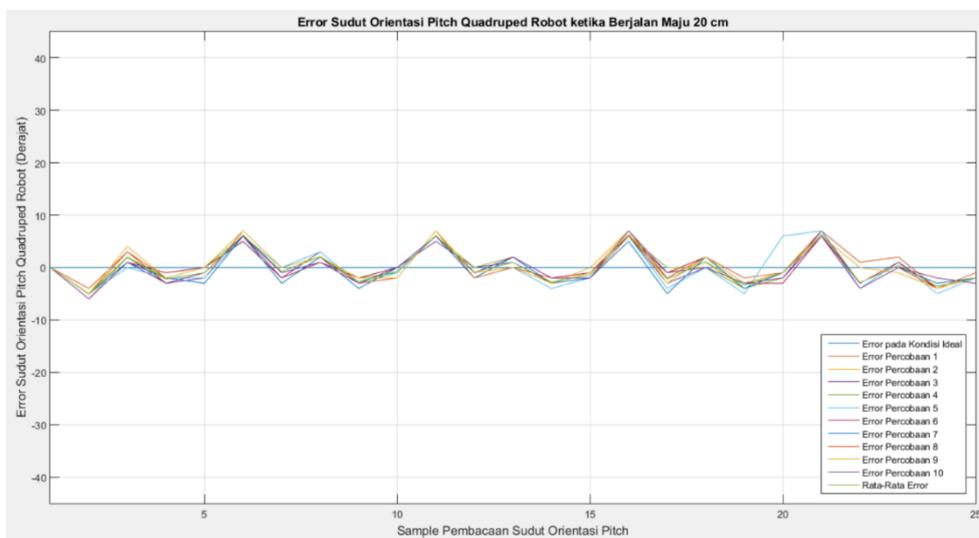
Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan maju 15 cm *quadrupe robot* adalah $0,452^\circ$ ke arah atas (mendongak). Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *pitch quadrupe robot* pada pergerakan 15 cm dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Grafik Error Sudut Orientasi *Pitch* Setiap 15 cm

d. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Pitch* pada Pergerakan Maju 20 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pada mode pergerakan maju 20 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 2$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 20 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

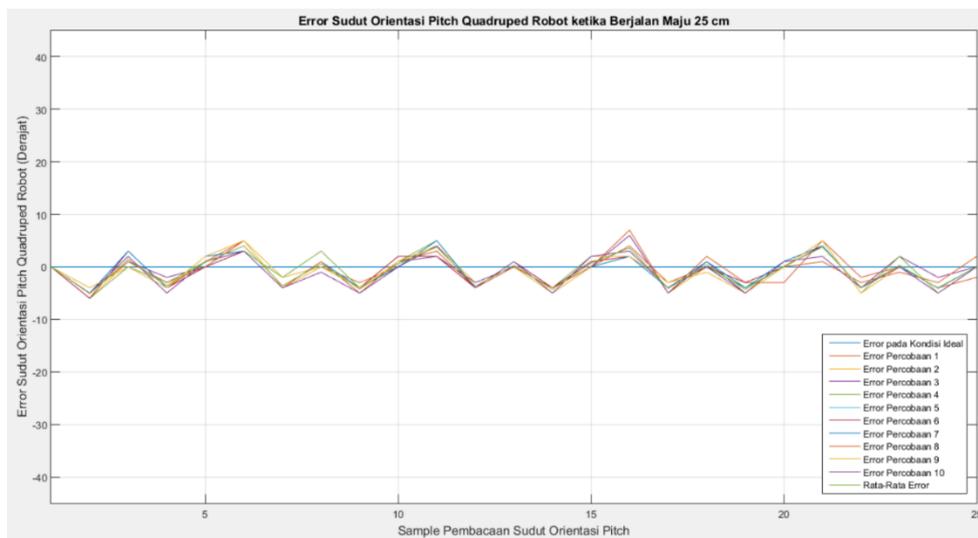


Gambar 4.18 Grafik Error Sudut Orientasi *Pitch* Setiap 20 cm

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan maju 20 cm *quadruped robot* adalah $0,048^\circ$ ke arah atas (mendongak). Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *pitch quadruped robot* pada pergerakan 20 cm dapat dilihat pada Gambar 4.18.

e. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Pitch* pada Pergerakan Maju 25 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pada mode pergerakan maju 25 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 2,5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 25 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.



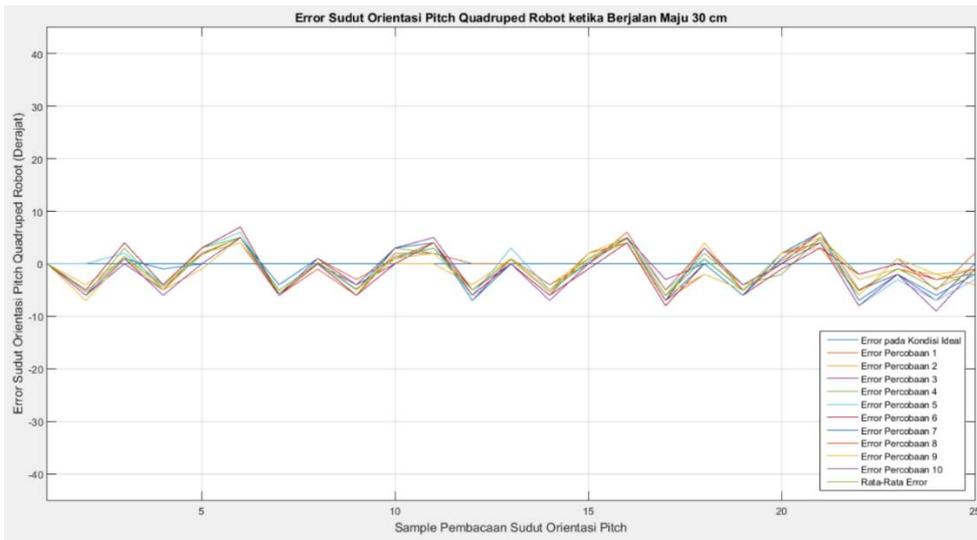
Gambar 4.19 Grafik Error Sudut Orientasi *Pitch* Setiap 25 cm

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan maju 25 cm *quadruped robot* adalah $0,816^\circ$ ke arah atas (mendongak). Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *pitch quadruped robot* pada pergerakan 25 cm dapat dilihat pada Gambar 4.19.

f. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Pitch* pada Pergerakan Maju 30 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pada mode pergerakan maju 30 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 3$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 30 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

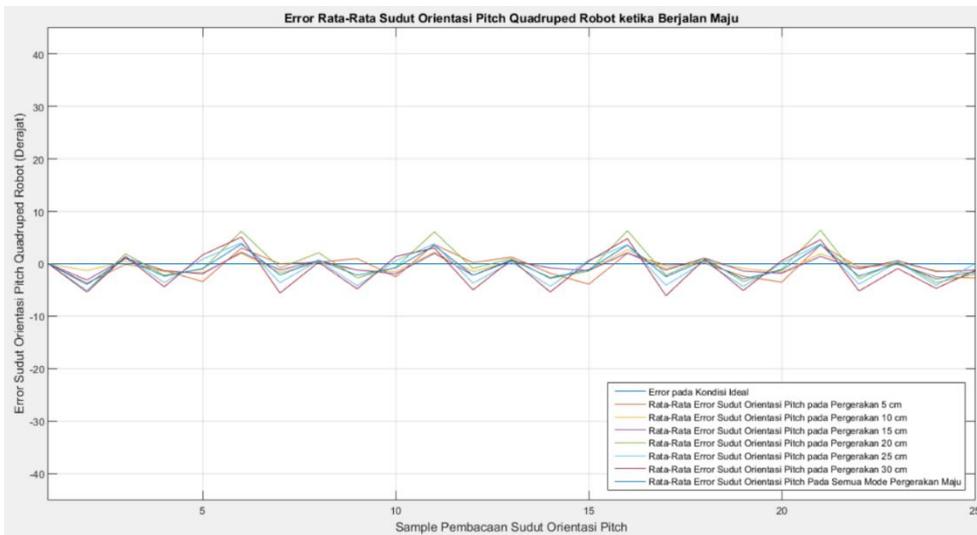
Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan maju 30 cm *quadruped robot* adalah $1,115^\circ$ ke arah atas (mendongak). Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *pitch quadruped robot* pada pergerakan 25 cm dapat dilihat pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Grafik Error Sudut Orientasi *Pitch* Setiap 30 cm

g. Analisis Deviasi Sudut Orientasi *Pitch* pada Pergerakan Maju *Quadrupeid Robot*

Berdasarkan pengujian deviasi sudut orientasi *pitch* pergerakan maju *quadrupeid robot* pada enam mode yang berbeda, didapatkan error rata-rata pada semua mode adalah $0,561^\circ$ ke arah atas (mendongak). Grafik rata-rata deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan maju *quadrupeid robot* ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 Grafik Rata-Rata *Error* Sudut Orientasi *Pitch* pada Semua Mode

Rata-Rata deviasi sudut orientasi *pitch* dari *quadrupeid robot* pada semua mode adalah $0,561^\circ$ ke arah atas (mendongak). Deviasi sudut orientasi *pitch* sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan, yaitu $< 10^\circ$ sehingga sistem *open loop controller* masih layak digunakan pada penelitian ini. Data rata-rata deviasi sudut orientasi *pitch* pada pergerakan maju *quadrupeid robot* ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4

Rata-Rata Deviasi Sudut Orientasi *Pitch Quadruped Robot*

Nomor Sample	Mode Pergerakan Maju						Rata-Rata <i>Pitch Error</i>
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	
1	0	0	0	0	0	0	0
2	-3.7	-1.3	-3.1	-5.1	-5.1	-5.4	-3.95
3	-0.1	0.5	1.1	1.9	1.4	1.4	1.033
4	-1.3	-1.5	-1.3	-2.2	-3.6	-4.4	-2.383
5	-3.4	-1.7	-1.9	-1	0.9	1.7	-0.9
6	3	2	2.2	6.2	4	5.1	3.75
7	0	-1.7	-1.2	-0.8	-3.6	-5.6	-2.15
8	0.3	0.2	0.6	2.1	0.6	0.3	0.683
9	1	-1.2	-1.2	-2.7	-4.2	-4.8	-2.183
10	-2.5	-1.5	-1.9	-0.7	0.6	1.4	-0.767
11	3.7	2.2	2	6.1	3.8	3	3.467
12	0.2	-1.5	-2.2	-0.9	-3.7	-5	-2.183
13	1.3	0.5	0.6	1	0.3	0.8	0.75
14	-1.8	-0.8	-0.8	-2.8	-4.3	-5.4	-2.65
15	-3.9	-1.3	-1.3	-1.4	0.7	0.5	-1.117
16	2	2.7	2.1	6.3	3.6	4.8	3.583
17	-0.3	-0.9	-1.2	-2.2	-4.1	-6.1	-2.467
18	0.1	0.5	1.1	1.1	0.4	0.9	0.683
19	-2.4	-0.9	-1.4	-3.4	-4.3	-5.1	-2.917
20	-3.5	-1.6	-1.8	-1	0.1	0.6	-1.2
21	3.6	1.9	1.4	6.4	3.8	4.6	3.617
22	-0.7	-0.5	-1	-2.9	-3.9	-5.2	-2.367
23	-0.1	0.2	0.6	0.4	0.3	-0.9	0.083
24	-2.5	-1.3	-1.5	-3.6	-4.1	-4.7	-2.95
25	-2.7	-1.8	-1.2	-2	0	-1.3	-1.5
Rata-Rata							-0.561

4.5 Pengujian Deviasi Orientasi *Roll* pada Gerakan Maju *Quadruped Robot*

Pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan Maju *quadruped robot* bertujuan untuk menguji apakah *trot gait pattern* mampu membuat *quadruped robot* bergerak tanpa mengakibatkan inklinasi tubuh robot yang memungkinkan terjadinya gangguan pada pembacaan sensor.

Prosedur pengujian dilakukan dengan meletakkan robot di suatu bidang datar menghadap kearah tembok yang berada tegak lurus di depan robot. Robot akan diuji pada mode pergerakan maju 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm, serta 30 cm. Untuk menguji reliabilitas sistem pergerakan, *quadruped robot* diatur agar melangkah sebanyak lima siklus, dengan lebar langkah yang berbeda-beda sesuai dengan jarak perpindahan yang diinginkan.

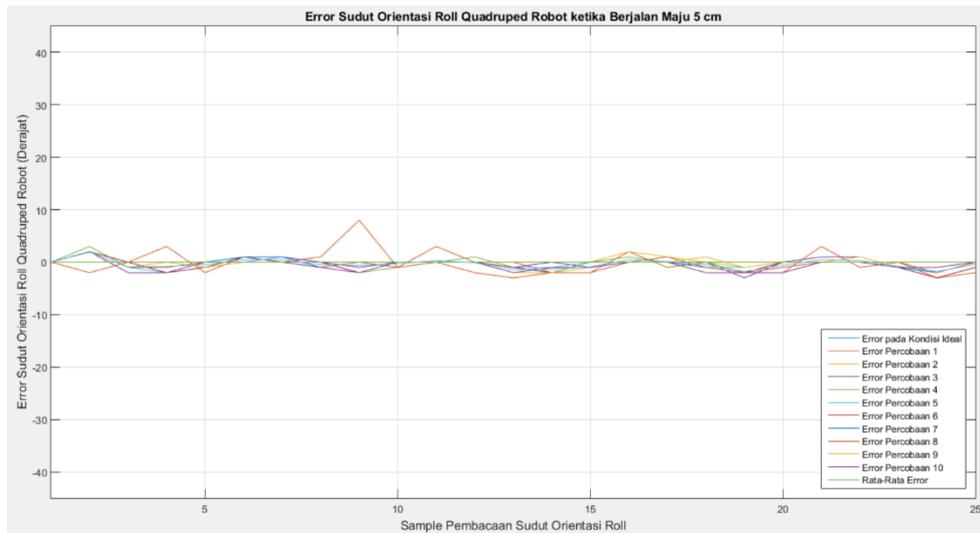
Pengujian dilakukan secara otomatis dengan bantuan sensor CMPS11 *magnetic compass*. Nilai error didapatkan dengan menghitung selisih dari nilai pembacaan sudut *roll* CMPS11 terhadap nilai acuan ketika *quadruped robot* berada pada kondisi level, yaitu sudut *roll* 0°. Error yang bernilai positif memiliki arti bahwa robot miring ke arah kiri, sebaliknya error bernilai negatif apabila robot miring ke arah kanan. Pembacaan sensor dilakukan lima kali tiap siklus, yang menghasilkan 25 data dalam satu kali pengujian.

Sesuai spesifikasi desain yang telah dirancang, error maksimal dari deviasi sudut orientasi *roll quadruped robot* adalah 10°. Masing-masing mode pergerakan maju diuji sebanyak sepuluh kali.

a. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Roll* pada Pergerakan Maju 5 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pada mode pergerakan maju 5 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 0.5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 5 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

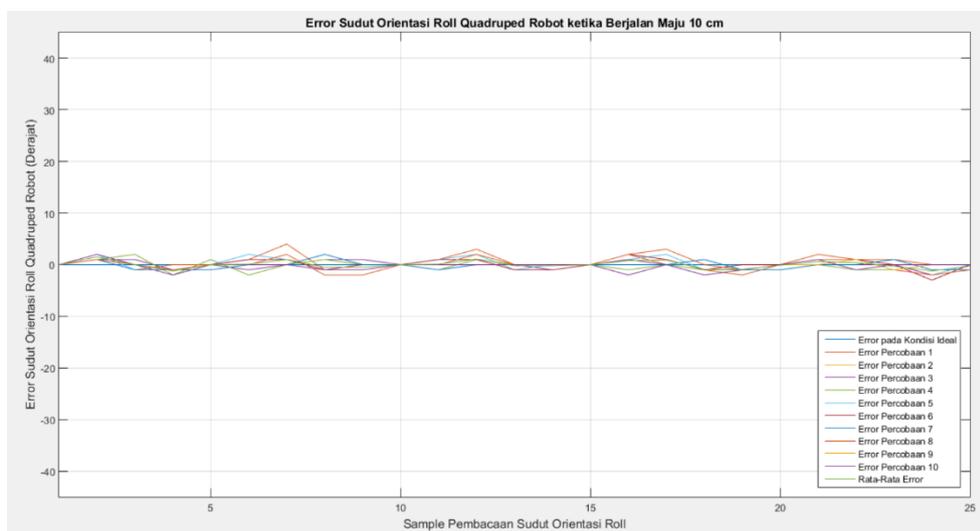
Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan maju 5 cm *quadruped robot* adalah 0.344° ke arah kanan. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *roll quadruped robot* pada pergerakan 5 cm dapat dilihat pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Grafik Error Sudut Orientasi *Roll* Setiap 5 cm

b. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Roll* pada Pergerakan Maju 10 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pada mode pergerakan maju 10 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 1$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 10 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

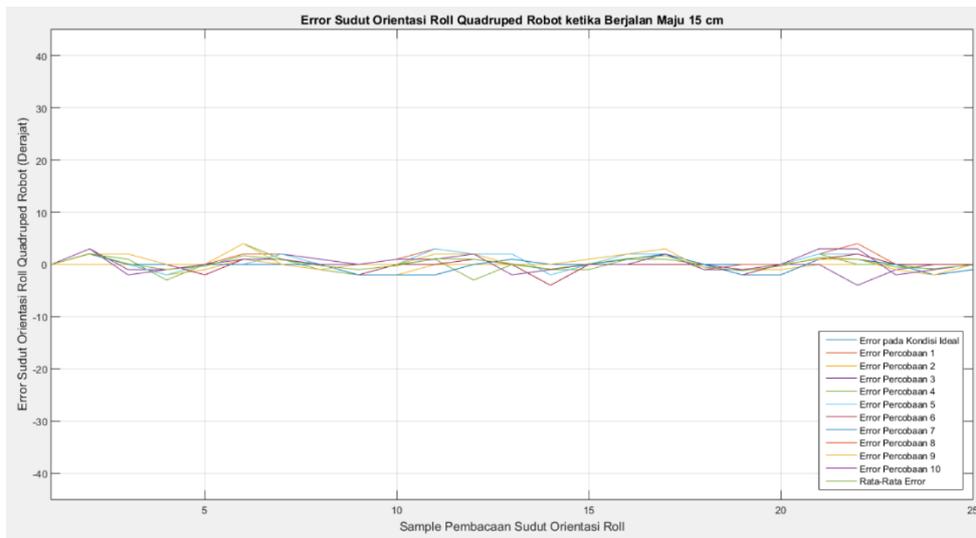


Gambar 4.23 Grafik Error Sudut Orientasi *Roll* Setiap 10 cm

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan maju 10 cm *quadruped robot* adalah $0,008^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *roll quadruped robot* pada pergerakan 10 cm dapat dilihat pada Gambar 4.23.

c. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Roll* pada Pergerakan Maju 15 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pada mode pergerakan maju 15 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 1.5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 15 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

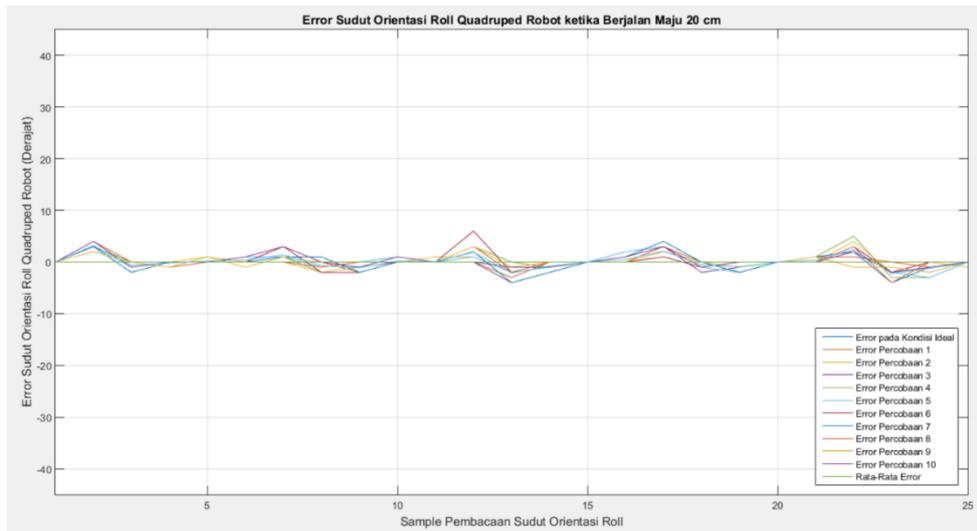


Gambar 4.24 Grafik Error Sudut Orientasi *Roll* Setiap 15 cm

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan maju 15 cm *quadruped robot* adalah $0,208^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *roll quadruped robot* pada pergerakan 15 cm dapat dilihat pada Gambar 4.24.

d. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Roll* pada Pergerakan Maju 20 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pada mode pergerakan maju 20 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 2$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 20 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

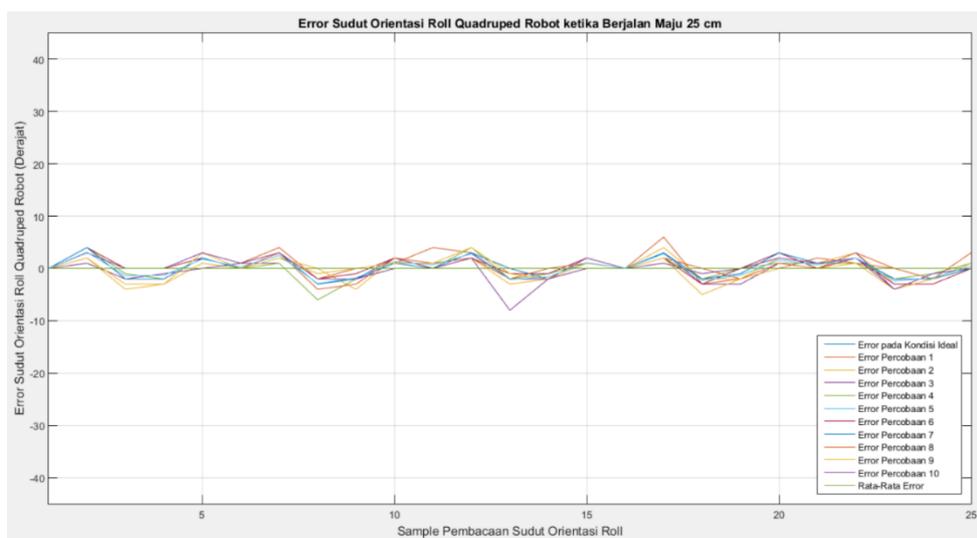


Gambar 4.25 Grafik Error Sudut Orientasi *Roll* Setiap 20 cm

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan maju 20 cm *quadrupeped robot* adalah $0,096^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *roll quadrupeped robot* pada pergerakan 20 cm dapat dilihat pada Gambar 4.25.

e. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Roll* pada Pergerakan Maju 25 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pada mode pergerakan maju 25 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 2.5$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadrupeped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadrupeped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 25 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.



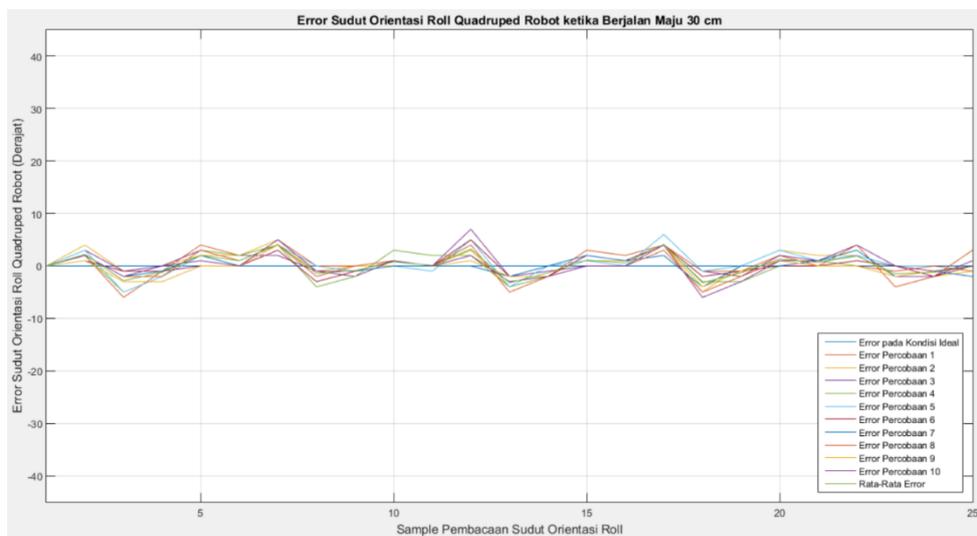
Gambar 4.26 Grafik Error Sudut Orientasi *Roll* Setiap 25 cm

Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan maju 25 cm *quadruped robot* adalah $0,092^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *roll quadruped robot* pada pergerakan 25 cm dapat dilihat pada Gambar 4.26.

f. Pengujian Deviasi Sudut Orientasi *Roll* pada Pergerakan Maju 30 cm

Pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pada mode pergerakan maju 30 cm dilakukan dengan memberikan nilai $\Delta y = 3$ cm dan $\Delta z = 1$ cm sebagai input dari *trajectory generator*, serta memberikan instruksi pada *quadruped robot* untuk melangkah sebanyak lima siklus. Pada kondisi ideal, *quadruped robot* akan melakukan perpindahan sejauh 30 cm dengan tetap berada pada sumbu *y*.

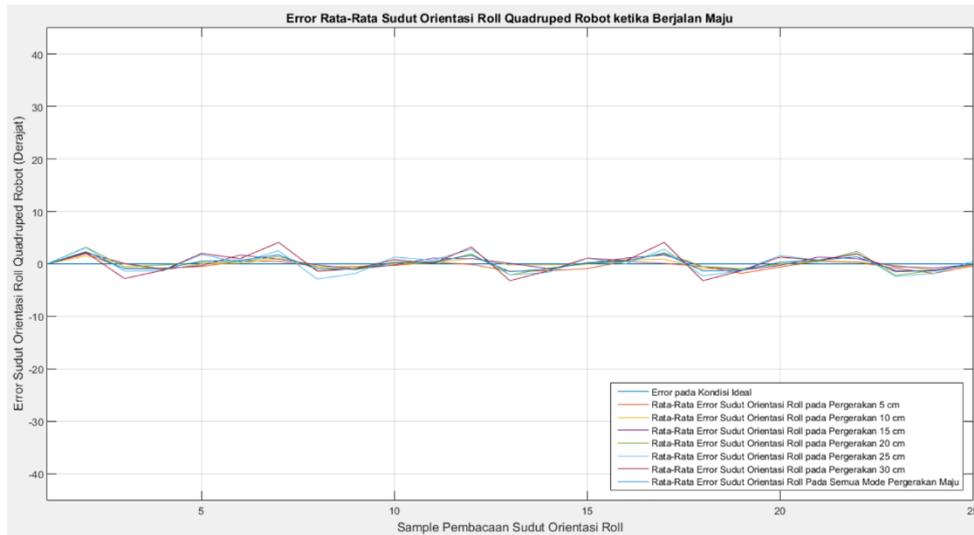
Dari sepuluh kali pengujian, rata-rata deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan maju 30 cm *quadruped robot* adalah $0,200^\circ$ ke arah kiri. Data lengkap dari pengujian dapat dilihat di lampiran. Grafik error orientasi *roll quadruped robot* pada pergerakan 30 cm dapat dilihat pada Gambar 4.27.



Gambar 4.27 Grafik Error Sudut Orientasi *Roll* Setiap 30 cm

g. Analisis Deviasi Sudut Orientasi *Roll* pada Pergerakan Maju *Quadruped Robot*

Berdasarkan pengujian deviasi sudut orientasi *roll* pergerakan maju *quadruped robot* pada enam mode yang berbeda, didapatkan error rata-rata pada semua mode adalah $0,043^\circ$ ke arah kiri. Grafik rata-rata deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan maju *quadruped robot* ditunjukkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28 Grafik Rata-Rata *Error* Sudut Orientasi *Roll* pada Semua Mode

Data rata-rata deviasi sudut orientasi *roll* pada pergerakan maju *quadruped robot* ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Rata-Rata deviasi sudut orientasi *roll* dari *quadruped robot* pada semua mode adalah $0,043^\circ$ ke arah kiri. Deviasi sudut orientasi *roll* sesuai dengan spesifikasi desain yang telah ditentukan, yaitu $< 10^\circ$ sehingga sistem *open loop controller* masih layak digunakan pada penelitian ini.

Tabel 4.5

Rata-Rata Deviasi Sudut Orientasi *Roll Quadruped Robot*

Nomor Sample	Mode Pergerakan Maju						Rata-Rata <i>Roll Error</i>
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	25 cm	30 cm	
1	0	0	0	0	0	0	0
2	1.9	1.5	2.1	3.2	3.1	2.2	2.333
3	-0.9	0	0.1	-0.6	-1.4	-2.8	-0.933
4	-0.8	-1.2	-1	-0.2	-1.3	-1.2	-0.95
5	-0.5	0	-0.3	0.2	1.8	2	0.533
6	0.5	0.1	1.7	0.4	0.3	1	0.667
7	0.5	1	0.9	1.4	2.5	4.1	1.733
8	-0.5	-0.5	-0.2	-0.7	-2.9	-1.4	-1.033
9	-0.6	-0.5	-1	-1.1	-1.8	-0.9	-0.983
10	-0.3	0	-0.2	0.2	1.3	0.8	0.3
11	0.3	0.1	1.1	0.1	0.7	0.1	0.4
12	-0.1	1.1	1	1.9	2.8	3.2	1.65
13	-1.4	-0.2	0.1	-2.1	-2.1	-3.2	-1.4833
14	-1.3	-0.2	-0.9	-0.8	-1.6	-1.3	-1.0167
15	-0.9	0	0.1	0	1.1	1.1	0.233
16	0.5	0.8	1.1	0.5	0	0.6	0.583
17	0.1	0.9	1.7	2.1	2.8	4.1	1.95
18	-0.5	-0.9	-0.5	-0.5	-2.3	-3.2	-1.317
19	-1.8	-0.9	-1.2	-0.9	-1.3	-1.3	-1.233
20	-0.6	-0.1	-0.3	0	1.6	1.3	0.317
21	0.5	0.6	1.3	0.4	0.7	0.7	0.7
22	0.3	0.4	1	2.4	2	1.9	1.333
23	-0.8	-0.3	-0.5	-2.2	-2.4	-1.5	-1.283
24	-1.8	-1.2	-0.8	-1.2	-1.8	-1.2	-1.333
25	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1	0.5	-0.1	-0.083
Rata-Rata							0.043

