

DESAIN DAN IMPLEMENTASI METODE INVERSE KINEMATICS DAN SINE PATTERN UNTUK KONTROL GERAK PADA AUTONOMOUS QUADRUPED ROBOT

DESIGN AND IMPLEMENTATION INVERSE KINEMATICS AND SINE PATTERN METHODS FOR LOCOMOTION CONTROL ON AUTONOMOUS QUADRUPED ROBOT

Aditya Hidayat

Prodi S1 Sistem Komputer, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
adityahidayat33@gmail.com

Abstrak

Pada jurnal ini dijelaskan perancangan sistem kontrol gerak pada autonomous quadruped robot yaitu robot yang memiliki 4 kaki dan 3 DOF pada setiap kaki menggunakan metode inverse kinematics dan sine pattern. Pembahasan pada penelitian ini meliputi perancangan hardware, implementasi metode pada hardware, tahap pengujian, dan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan. Adapun hasil dari penelitian adalah sistem kontrol gerak pada autonomous quadruped robot yang dapat berjalan dengan stabil pada medan rata ataupun tidak rata.

Kata kunci: Quadruped, Inverse kinematics, Sine pattern.

Abstract

In this journal explained how to design locomotive system on autonomous quadruped robot with 3 DOF on each leg using inverse kinematics and sine pattern methods. The Explanation on this journal includes hardware design, method implementation, system testing, and conclusion according to research conducted. The results of this research is robot motion control system on autonomous quadruped robot that can walks stably on even or uneven terrain.

Keywords: Quadruped, Inverse kinematics, Sine pattern.

1. Pendahuluan

Quadruped robot atau robot berkaki 4 adalah robot yang lebih adaptif terhadap medan tempuh dibandingkan robot berodadalam kasus penggunaannya pada kegiatan eksplorasi daratan. Walaupun secara fungsional robot berkaki lebih unggul, robot berakaki memiliki permasalahannya sendiri, yaitu kontrol gerak yang lebih kompleks dibandingkan robot beroda, maka dari itu kita harus dapat memilih metode yang tepat untuk digunakan pada robot.

Forward kinematics dan *inverse kinematics* adalah dua metode yang digunakan pada kontrol gerak robot berkaki. Dua metode ini memiliki karakteristik yang berkebalikan. *Forward kinematics* lebih berfokus kepada proses, dimana kita bisa mencari posisi end effector dari nilai sudut yang diketahui pada setiap aktuator, sedangkan *inverse kinematics* berfokus kepada hasil akhir, dimana kita dapat mencari nilai sudut pada aktuator dengan diketahui posisi end effector, yang lebih mudah untuk digunakan pada robot yang memiliki banyak kaki dan DOF (sendi).

Sine pattern adalah metode yang dapat kita gunakan bersama *inverse kinematics* untuk menyederhakan variabel kontrol gerak, dimana metode ini akan menghasilkan sekumpulan nilai posisi end effector yang dapat digunakan sebagai input dari perhitungan *inverse kinematics*.

2. Dasar Teori

2.1 *Autonomous Quadruped Robot*

Autonomous quadruped robot adalah *mobile robot* yang bergerak dengan menggunakan 4 kaki, yang dapat bergerak secara otomatis. Dalam penelitian ini digunakan *Autonomous quadruped robot* yang mempunyai 3 DOF pada setiap kakinya dan mempunyai tujuan khusus untuk melakukan eksplorasi daratan.

Kontrol gerak *Autonomous quadruped robot* lebih kompleks daripada mobile robot darat jenis lain seperti robot beroda, Karena gerak robot melibatkan sudut pada DOF disetiap kaki yang dimiliki robot tersebut, dimana sudut tersebut harus ditentukan agar robot dapat bergerak dengan stabil. Walaupun begitu robot berkaki masih dinilai lebih baik daripada robot beroda dalam melakukan eksplorasi darat di medan yang tidak rata dikarenakan adaptifitasnya terhadap medan tempuh yang lebih baik[1][2]

2.2 Inverse Kinematics

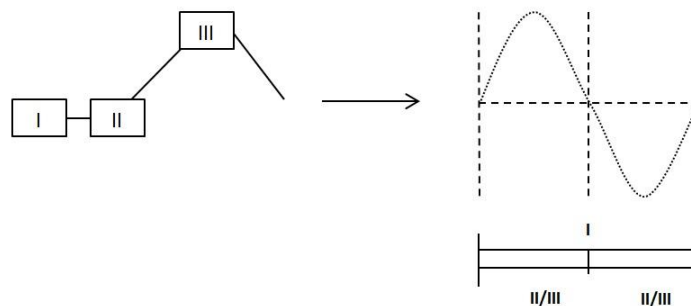
Dalam robotika terdapat 2 metode perhitungan kinematika / kontrol gerak yang umum digunakan yaitu inverse kinematics dan forward kinematics. *inverse kinematics* adalah salah satu metode kontrol gerak robot yang dapat menentukan nilai dari setiap sudut pada DOF dengan diketahui posisi *end effector* nya, Berbeda dengan konsep dari *forward kinematics*, dimana dengan diketahui sudut setiap DOF, dapat ditentukan posisi *end effectornya*. Secara sederhana, inverse kinematics lebih berorientasi pada hasil akhir, dimana yang menjadi hal utama adalah perpindahan dari posisi end effector dari satu titik ke titik lainnya[3].

Dari penjelasan konsep tersebut dapat dipahami bahwa metode *inverse kinematic* dapat lebih sederhana dalam implementasinya pada *mobile robot*, terutama pada robot 4 kaki dan memiliki 3 DOF yang memiliki total 12 aktuator dan beberapa loop tertutup dalam pemrogramannya [4].

2.3 Sine Pattern

Permasalahan yang mungkin terjadi pada metode *inverse kinematics* adalah untuk menentukan banyaknya input sistem berupa posisi *end effector*. Solusi dari permasalahan tersebut bisa diatasi oleh metode *sine pattern*. *Sine pattern* adalah suatu metode yang dapat menghasilkan kumpulan posisi end effector dalam pola berbentuk sinyal sinusodal.

Pada metode ini, robot yang melakukan pergerakan akan mengaktifkan aktuator pada keseluruhan pola sinusoidal, sedangkan aktuator kedua dan ketiga akan aktif pada pola sinusoidal positif atau negatif saja, seperti yang dapat dilihat pada gambar berikut :

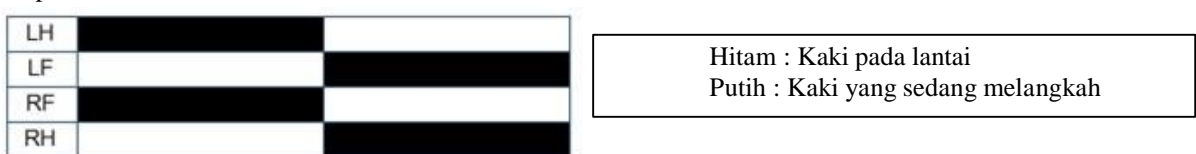


Gambar 2.1 pola sinusoidal pada end effector berdasarkan pergerakan aktuator

Dengan didaptkannya kumpulan posisi *end effector*, metode *sine pattern* ini akan menjadikan variabel kontrol robot dapat lebih sederhana[5].

2.4 Trot gait

Selain dari metode *inverse kinematics* dan *sinus pattern* yang digunakan pada robot, dibutuhkan juga *gait* atau pola berjalan yang tepat agar perjalanan robot dapat lebih optimal. Pada penelitian ini digunakan pola berjalan *trot gait*. *Trot* adalah pola gerak yang menggunakan 2 kaki pada posisi diagonal sebagai kaki transisi, sedangkan 2 kaki yang lainnya sebagai kaki penopang, untuk menjaga keseimbangan selagi kaki transisi sedang melangkah. Gambar 2.1 dibawah adalah pola berjalan *trot gait*, dimana LH(left hind) adalah kaki kiri belakang, LF(left front) adalah kaki kiri depan, RH(right hind) adalah kaki kanan belakang, dan RF(right front) adalah kaki kanan depan.

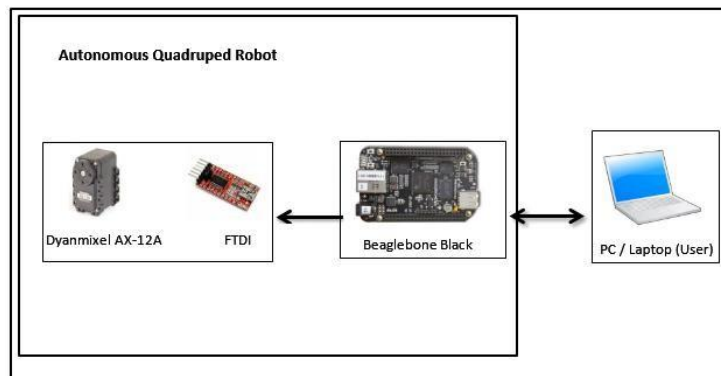


Gambar 2.2 Pola jalan trot gait

3. Perancangan

3.1. Desain Sistem Kontrol Gerak Robot

Robot akan menerima data melalui beaglebone dari user menggunakan laptop / PC via wifi yang akan mengimplementasikan program metode gerak pada robot, lalu mengeluarkan data hasil ke servo motor Dynamixel AX-12A sebagai aktuator pada robot melalui FTDI agar dapat bergerak dan menjalankan fungsi sesuai dengan data yang dikirimkan oleh user.



Gambar 3.1 Desain Kontrol Gerak Sistem

3.2. Kebutuhan Sistem

Hal yang dipersiapkan untuk melakukan implementasi metode *inverse kinematics* dan *sine pattern* adalah untuk merancang hardware kontrol gerak pada *autonomous quadruped robot*. Berikut adalah komponen hardware yang berhubungan dengan kontrol gerak pada *autonomous quadruped robot* adalah sebagai berikut :

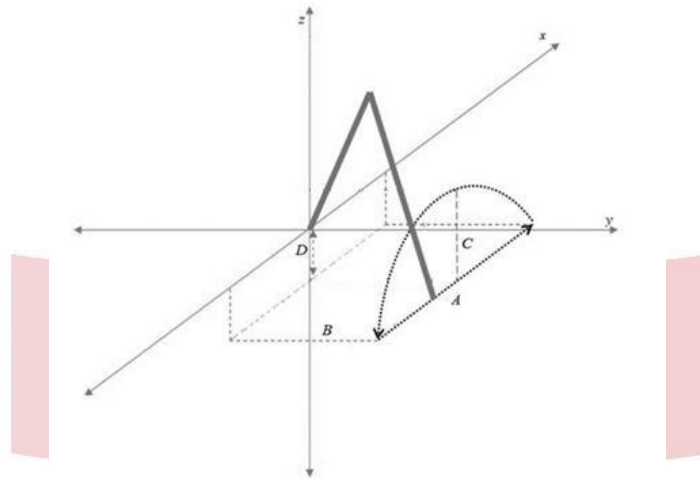
- a. Kontroler : Beaglebone Black
- b. Aktuator : Motor servo dynamixel AX-12A
- c. Catu daya : Baterai Lippo 1500mAH
- d. Koneksi data : Wifi USB adapter dan modul Bluetooth HC06
- e. Kerangka robot dari Bahan akrilik
- f. Komponen elektronik

Robot yang digunakan pada tugas akhir ini adalah robot 4 kaki yang memiliki 3DOF pada setiap kakinya, yang memiliki tujuan utama untuk melakukan eksplorasi. Robot akan dikendalikan dari jarak jauh menggunakan laptop secara *wireless* menggunakan wifi, yang akan bergerak secara manual ataupun otomatis untuk melakukan mapping pada area eksplorasi.

3.3. Implementasi

3.3.1. Sine Pattern

Dengan menggunakan metode *sine pattern*, didapatkan output berupa kumpulan posisi *end effector* yang dapat digunakan pada perhitungan *inverse kinematics*, sedangkan input dari metode ini adalah nilai parameter langkah robot. Berikut adalah desain kaki robot beserta variabel yang digunakan pada metode *sine pattern* :



Gambar 3.2 variabel pada sine pattern

Input dari sine pattern adalah (A, B, C, D, α) , yang merupakan parameter langkah kaki robot, Sedangkan output dari metode ini adalah variabel (x, y, z) yang merupakan posisi *end effector*. Adapun rumus yang digunakan pada perhitungan *sine pattern* bervariasi, tergantung kepada 2 parameter, yaitu direksi dan fasa. Berikut adalah rumus yang digunakan pada *sinus pattern* :

Tabel 1.1 Rumus sine pattern untuk variabel $x, y,$ dan z

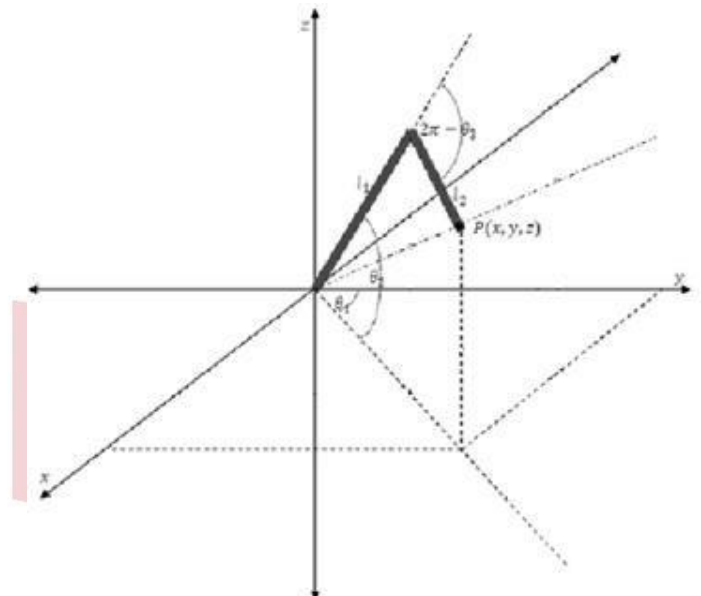
Indeks Direksi	Indeks Fasa	x	y
0	0	$x = -\frac{1}{2} A \cos(90^\circ - \alpha) \sin \omega$ (10)	$y = -\frac{1}{2} A \sin(90^\circ - \alpha) \sin \omega + B$
0	1	$x = \frac{1}{2} A \cos(90^\circ - \alpha) \sin \omega$	$y = -\frac{1}{2} A \sin(90^\circ - \alpha) \sin \omega + B$
1	0	$x = -\frac{1}{2} A \cos(90^\circ - \alpha) \sin \omega$	$y = -\frac{1}{2} A \sin(90^\circ - \alpha) \sin \omega + B$
1	1	$x = \frac{1}{2} A \cos(90^\circ - \alpha) \sin \omega$	$y = -\frac{1}{2} A \sin(90^\circ - \alpha) \sin \omega + B$

Indeks Direksi	Indeks Fasa	z
0/1	0	$z = \begin{cases} -D & , 0^\circ \leq \omega < 90^\circ \\ C \sin(\omega - 90^\circ) - D & , 90^\circ \leq \omega < 270^\circ \\ -D & , 270^\circ \leq \omega < 360^\circ \end{cases}$
	1	$z = \begin{cases} -C \sin(\omega - 90^\circ) - D & , 0^\circ \leq \omega < 90^\circ \\ -D & , 90^\circ \leq \omega < 270^\circ \\ -C \sin(\omega - 90^\circ) - D & , 270^\circ \leq \omega < 360^\circ \end{cases}$

Direksi merupakan parameter untuk menentukan arah gerak kaki, contohnya untuk melakukan gerakan belok kanan, maka direksi untuk kaki kanan belakang dan depan bernilai 1. Sedangkan fasa merupakan parameter untuk jenis gerak kaki, hal ini berkaitan dengan *gait* atau pola jalan yang digunakan pada robot. Pada penelitian ini digunakan *trot gait* yang memiliki pola berjalan yang sama antar kaki pada posisi diagonal, seperti pada kaki kanan depan dan kiri belakang, ataupun kaki kanan belakang dan kiri depan, sehingga kaki tersebut memiliki nilai fasa yang sama.

3.3.2. Inverse Kinematics

Tujuan dari inverse kinematics adalah untuk mendapatkan nilai sudut pada setiap aktuator $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, dengan input berupa posisi end effector (x, y, z) yang didapatkan dari perhitungan *sine pattern* yang telah dilakukan sebelumnya. Berikut adalah desain kaki robot beserta variabel yang digunakan pada *inverse kinematics* :



Gambar 3.6 variabel pada inverse kinematics

Rumus awal dari *inverse kinematics* untuk 4 kaki dan 3 DOF yang digunakan pada *inverse kinematics* pada penelitian ini dapat dilihat pada rumus (3.1),(3.2), dan (3.3), namun rumus tersebut akan menghasilkan nilai yang kurang baik, dikarenakan hal berikut :

- Dikarenakan $\cos(\theta) = \cos(-\theta)$, maka bentuk \cos^{-1} tidak memiliki hasil yang baik dalam memperoleh kembarannya sesuai dari nilai \cos
- Saat $\theta \approx 0^\circ / \theta \approx \pm 180^\circ$ pada $\sin(\theta)$ yang dikali / dibagi dengan bilangan lain akan menghasilkan nilai tidak akurat dalam persamaan (karena terdapat nilai 0) ataupun tidak terdefinisi.
- Fungsi \cos^{-1} dapat mengembalikan nilai π dan $-\pi$ dengan menggunakan x dan y adalah bilangan bertanda (+ atau -)

Dikarenakan alasan diatas maka dilakukan konversi menjadi bentuk dalam fungsi atan2 [5]. Proses konversi dapat dilihat pada rumus (3.4), (3.6), dan (3.8) dan persamaan (3.1, 3.2, 3.3) dalam fungsi atan2 dapat dilihat pada rumus (3.5),(3.7), dan (3.9).

$$\theta_1 = \tan^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left| \frac{z(l_1 \cos \theta_1 + l_2) - \sqrt{x^2 + y^2}}{2l_1 l_2} \right| \tag{3.2}$$

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left[\frac{x^2 + y^2 + z^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right] \tag{3.3}$$

$$\left\{ \tan \theta_1 = \left| \frac{x}{y} \right| \right\} \tag{3.4}$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(x, y) \tag{3.5}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{C}{D} \right] \\ \left[\begin{array}{l} C \\ D \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (3.6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tan \theta_2 = \left[\frac{C}{D} \right] \\ \theta_2 = \text{atan2}(C, D) \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_3 = \cos^{-1} A \\ \cos \theta_3 = A \\ \sin^2(\theta_3) + \cos^2(\theta_3) = 1 \\ \sin^2(\theta_3) = \sqrt{1 - \cos^2(\theta_3)} \\ \sin \theta_3 = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} = \sqrt{1 - A^2} \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}(\sqrt{1 - A^2}, A) \quad (3.9)$$

4. Pengujian

4.1. Pengujian Nilai Error Sudut pada Aktuator

Pengujian kontrol gerak pada *autonomous quadruped robot* akan menguji nilai sudut sebagai hasil akhir dari metode kontrol gerak pada robot. Pengujian ini dilakukan dengan mendapatkan data dari program berupa posisi end effector (x, y, z) dari perhitungan *sine pattern* dan juga nilai sudut akhir ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) dari perhitungan *inverse kinematics* yang sudah ditambah dengan nilai *set point* untuk setiap servo. Setelah nilai sudut dari perhitungan program didapatkan, proses pengujian dilanjutkan dengan membandingkan nilai tersebut dengan nilai sudut aktual yang dihasilkan oleh aktuator (servo), dimana θ_1 merupakan nilai sudut pada servo 1 yang terletak dekat badan robot, θ_2 merupakan nilai sudut pada servo 2 yang terletak di bagian atas robot, dan θ_3 merupakan nilai sudut pada servo 3 yang letaknya paling jauh dari badan robot. Pengujian ini dilakukan dengan perintah berjalan maju dengan iterasi pengambilan data sebanyak 10 kali, dimana setiap iterasi memiliki posisi end effector yang berbeda untuk mencapai 1 kali langkah.

4.1.1. Mendapatkan nilai sudut akhir pada perhitungan dan sudut aktual pada servo :

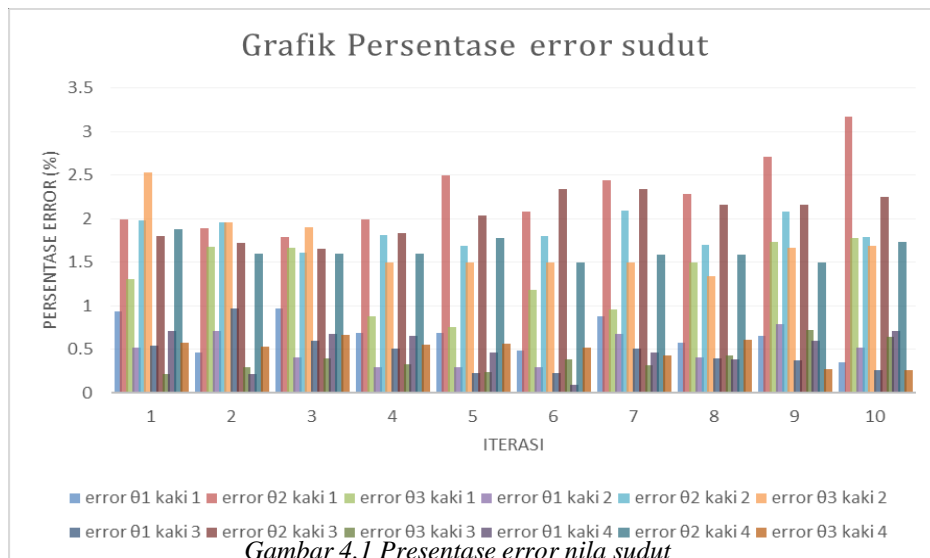
Pengujian dilakukan dengan mendapatkan data posisi end effector (x, y, z) dan juga nilai sudut akhir ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) dari perhitungan pada program kontrol gerak robot. Sedangkan sudut aktual didapatkan menggunakan fitur feedback pada servo Dynamixel Ax-12A dengan menggunakan posisi end effector yang sama dengan pengujian pada perhitungan di program robot.

4.1.2. Menghitung presentase error pada setiap percobaan

Perhitungan presentase error dapat dihitung dengan :

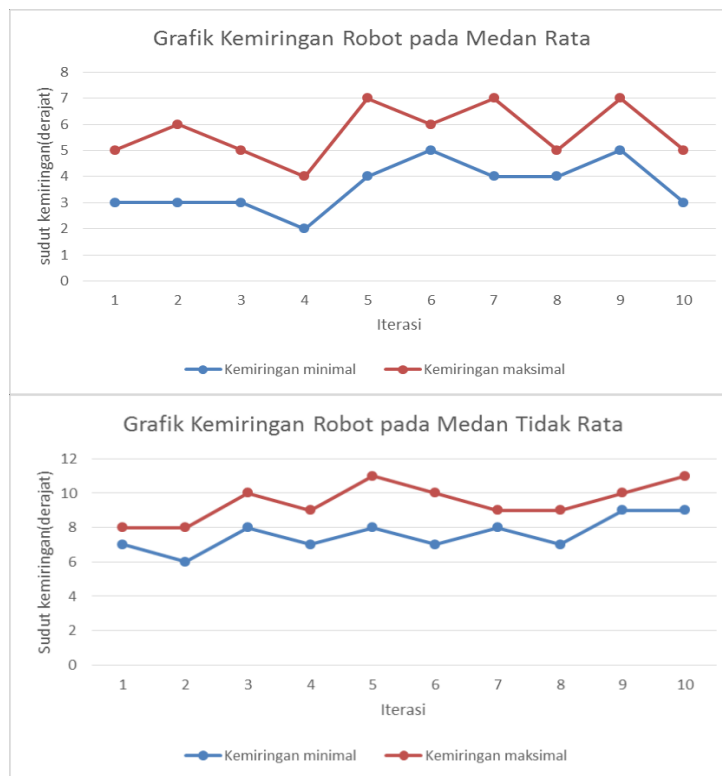
$$\% \text{Error} = \frac{\text{Nilai sudut aktual pada servo} - \text{Nilai sudut pada perhitungan}}{\text{Nilai sudut pada perhitungan}} \times 100\% \quad (4.1)$$

Dari pengujian yg dilakukan didapatkan hasil sebesar 1,201%, dimana nilai tersebut merupakan presentase nilai rata-rata error dari perhitungan nilai sudut pada program dengan nilai sudut aktual yang diukur langsung pada servo. Dengan nilai error tersebut robot dapat berjalan lurus tanpa ada masalah dengan kemiringan robot pada saat melangkah sebesar $2^\circ \sim 5^\circ$ pada saat melakukan pengujian.



4.2. Pengujian Kestabilan robot

Pengujian dilakukan dengan mengukur kemiringan pada badan robot saat berjalan di dua medan yang berbeda yaitu pada medan rata dan medan tidak rata dengan halangan pada permukaan memiliki tinggi 0.3cm~2cm. Kedua pengujian ini dilakukan sebanyak 10 kali dan menggunakan perintah maju dan dengan panjang rute 60cm.



Dari pengujian kemiringan robot di atas didapatkan rata-rata kemiringan di medan rata adalah 3.6°~5.7° sedangkan pada medan tidak rata adalah 7.6°~9.5°. Dengan kemiringan di bawah 10°, kestabilan robot masih cukup baik, karena robot dapat berjalan lurus tanpa ada masalah serius yang terjadi pada pengujian.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Adapun Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Nilai error terbesar terjadi pada servo ke 2 yang berada di antara servo 1 dan 2, hal ini dapat diakibatkan pada servo ke 2 memiliki beban yang paling tinggi karena bertugas untuk menahan beban pada setiap kaki robot.
2. Desain Mekanik dan distribusi berat pada robot mempengaruhi kestabilan robot, karena dengan ditribusi robot tepat ditengah akan memberikan beban yang sama pada setiap kaki.
3. Pengujian kestabilan robot pada saat berjalan lurus di permukaan yang tidak rata bergantung pada tinggi dan frekuensi munculnya objek rintangan pada permukaan, dimana dengan penghalang yang memiliki tinggi sampai dengan 0,5cm~1cm robot masih dapat berjalan cukup seimbang.
4. Kestabilan robot dipengaruhi oleh banyak faktor diantaranya nilai error sudut yang dihasilkan, desain mekanik robot, gesekan end effector dengan permukaan lantai, dan nilai variabel pada input dari sine pattern.

5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Untuk transfer data antara PC dengan robot dapat diganti menggunakan gelombang radio yang memiliki jangkauan yang lebih jauh dibandingkan dengan Bluetooth, walaupun dengan begitu harus dipersiapkan modul tambahan pada PC untuk dapat menggunakan gelombang radio.
2. Dapat ditambahkan dengan kontrol gerak menggunakan *centre of gravity* untuk mendapatkan hasil pergerakan yang lebih baik.
3. Dapat menambahkan sensor yang dapat mengukur kemiringan pada sistem kontrol gerak robot untuk memaksimalkan keseimbangan robot dan adaptivitas terhadap permukaan medan.

Daftar Pustaka:

- [1] Siegwart, Roland noubakhsh, Illah R.2004. Introduction to Autonomous Mobile Robots. London: Massachusetts.
- [2] Buehler, Martin.1998. SCOUT: a simple quadruped that walks, climbs,and runs. Belgium : Walt Disney Imagineering.
- [3] Meng, Ni Xiaodong, Wang. 2011.Kinematics Analysis and Simulation of Quadruped Robot. Beijing : School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University.
- [4] PANDILOV, Zoran DUKOVSKI, Vladimir. Comparison Of The Characteristics Between Serial And Parallel Robots. Macedonia : Sv. Kiriil I Metodij university.
- [5] Endang.2013."WR note Electrical Engineering". [Online]. Available: <https://wangready.wordpress.com>. [Accessed 2016].
- [6] Morimoto, Jun Endo, Gen Nakanishi, Jun Chen, gordon.2008. Modulation of Sinusoidal Patterns by a Coupled Oscillator Model. Japan Sci. & Technol. Agency.
- [7] Gómez, Javier Muñoz-Martínez, Pablo, R-Moreno, María D Romeral Julio J. López, Sara Navarro.2009.An Autonomous system for the locomotion of a Hexapod Exploration Robot.Madrid : Departamento de Automática, Universidad de Alcalá.
- [8] Tarokh, Mahmoud and Lee, Malrey. 2009. Systematic Method for Kinematics Modeling of Legged Robots on Uneven Terrain. San Diego :Department of Computer Science, San Diego State University.
- [9] Wang, Lianqing Yu Yujin dan Tao, Weijun.2010. Gait Analysis and Implementation of a Simple Quadruped Robot.China : Wuhan University of Science and Engineering and Nanjing University of Science and Technology.
- [10] Yamazaki, Kenneth S.1999. The Design and Control of Scout I A Simple Quadruped Robot. Montreal :Department of Mechanical Engineering McGill University.
- [11] Ijspeert, jan, auke.2008. Central pattern generators for locomotion control in animals and robots:A review.Switzerland : School of Computer and Communication Sciences EPF