

Rancang Bangun Robot Quadruped dengan Penggerak Servo AX-12

Ahmad Fajar Ash Shidqi¹, Bambang Minto Basuki², Anang Habibi³

^{1,2,3}Progran Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Islam Malang

Jl.MT Haryono 193 Malang

21901053055@unisma.ac.id, bambang.minto@unisma.ac.id, anang.habibi@unisma.ac.id

Abstract

This study aims to design and implement an inverse kinematics-based motion control system for a quadruped robot using Dynamixel AX-12A smart servos. The robot is controlled via an Laptop, which calculates joint angles in real-time based on target foot positions in 3D space. The inverse kinematics method is applied to determine the angular positions of the coxa, femur, and tibia joints, enabling the robot to perform multi-directional movements such as forward, backward, turning, and lateral shifting. Experimental results on flat and inclined surfaces show that the robot can execute basic gait patterns with an average position error of less than $\pm 5\%$ and servo response latency under 50 ms. This research demonstrates that affordable smart servo systems can achieve precise and responsive locomotion, making them suitable for educational and research applications in mobile robotics.

Keywords: Quadruped Robot, Inverse Kinematics, Smart Servo, AX-12A, Laptop, Motion Control

Abstraksi

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem kendali gerak robot berkaki empat berbasis *inverse kinematics* menggunakan *smart servo* Dynamixel AX-12A. Laptop digunakan untuk menghitung sudut tiap sendi secara waktu nyata berdasarkan posisi target kaki dalam ruang tiga dimensi. Metode *inverse kinematics* diterapkan pada struktur sendi *coxa*, *femur*, dan *tibia* untuk menghasilkan gerakan maju, mundur, berbelok, dan geser lateral. Pengujian dilakukan pada permukaan datar dan miring untuk mengevaluasi akurasi dan stabilitas gerakan. Hasil menunjukkan bahwa robot mampu menjalankan pola gait sederhana dengan galat posisi rata-rata di bawah $\pm 5\%$ dan waktu respon servo di bawah 50 ms. Penelitian ini membuktikan bahwa sistem servo cerdas berbiaya terjangkau dapat menghasilkan gerakan presisi dan responsif, sehingga cocok untuk pengembangan robotika edukasional dan riset.

Kata Kunci: Robot Berkaki Empat, Inverse Kinematics, Smart Servo, AX-12A, Laptop, Kendali Gerak

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi di bidang robotika mendorong terciptanya berbagai inovasi pada sistem mobilitas, khususnya pada robot berkaki (legged robot) yang dirancang untuk dapat bergerak di medan tidak rata maupun lingkungan dengan kondisi ekstrem. Di antara berbagai jenis konfigurasinya, robot berkaki empat (quadruped) memiliki keunggulan berupa stabilitas statis yang baik serta kemampuan beradaptasi tinggi, sehingga sangat sesuai digunakan pada kegiatan seperti eksplorasi, misi pencarian dan penyelamatan, serta pemantauan lingkungan. Seiring meningkatnya kebutuhan akan robot yang lincah, presisi, dan efisien, pengembangan sistem gerak yang andal menjadi salah satu fokus utama penelitian robotika bergerak.

Tantangan besar dalam perancangan robot quadruped adalah bagaimana mengoordinasikan gerakan setiap kaki secara tepat agar dapat mencapai posisi tertentu dalam ruang tiga dimensi. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan metode inverse kinematics (IK), yakni pendekatan matematis yang dapat mengubah koordinat target menjadi sudut rotasi pada tiap sendi kaki. Metode ini berperan penting dalam menciptakan pola langkah (gait) yang stabil dan akurat. Penelitian ini menyoroti keterbatasan pada robot edukasional yang umumnya hanya mampu bergerak satu arah dan belum dilengkapi sistem kontrol pintar berbasis IK.

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan algoritma inverse kinematics pada robot berkaki empat dengan memanfaatkan smart servo Dynamixel AX-

12A yang dikendalikan melalui laptop. Sistem yang dikembangkan diharapkan mampu melakukan berbagai manuver seperti bergerak maju, mundur, berbelok, hingga bergeser secara lateral. Proses penelitian meliputi perancangan mekanik kaki, pemrograman algoritma kontrol, serta pengujian eksperimental untuk menilai performa dan tingkat akurasi gerak robot.

Dengan menggabungkan penggunaan smart servo yang memiliki umpan balik posisi internal dan kendali digital, penelitian ini menawarkan solusi yang efisien dan ekonomis dalam pengembangan robot quadruped untuk keperluan pendidikan. Selain memberikan sumbangan pada aspek teknis, hasil yang diperoleh diharapkan menjadi acuan bagi pengembangan sistem kendali gerak adaptif pada robot bergerak di masa depan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian terapan yang berfokus pada perancangan dan penerapan sistem kendali gerak untuk robot berkaki empat dengan memanfaatkan metode inverse kinematics. Metode ini digunakan untuk menghitung konfigurasi sudut sendi yang diperlukan agar ujung kaki robot (*end-effector*) dapat mencapai titik yang telah ditentukan di ruang tiga dimensi. Melalui pendekatan ini, setiap gerakan kaki—seperti maju, mundur, berbelok ke kanan atau kiri, serta bergeser ke kanan atau kiri—dapat diatur secara presisi dan terkoordinasi.

Robot quadruped yang dikembangkan memiliki empat kaki, masing-masing dengan tiga derajat kebebasan (3-DOF) meliputi coxa (sendi horizontal), femur (sendi vertikal pertama), dan tibia (sendi vertikal kedua). Keseluruhan sistem digerakkan oleh dua belas unit smart servo Dynamixel AX-12A. Laptop berperan sebagai pusat pemrosesan, bertugas menghitung sudut tiap sendi berdasarkan posisi target kaki, lalu mengirimkan perintah kendali ke servo.

Proses inverse kinematics dimulai dengan mengubah koordinat target (X, Y, Z) pada ruang tiga dimensi menjadi sudut rotasi untuk masing-masing sendi kaki. Sudut coxa dihitung berdasarkan arah horizontal kaki terhadap tubuh robot menggunakan fungsi trigonometri $\text{atan2}(Y, X)$. Selanjutnya, panjang vektor dari proyeksi horizontal ke titik

target digunakan untuk menentukan sudut tibia melalui hukum cosinus. Sudut femur kemudian diperoleh dari selisih sudut elevasi total dengan sudut tibia. Ketiga sudut tersebut diubah menjadi nilai digital yang dapat dibaca oleh servo AX-12A dengan skala 0–1023, setara dengan rentang -150° hingga $+150^\circ$, menggunakan persamaan:

$$\text{Posisi} = ((\theta + 150^\circ) / 300^\circ) \times 1023.$$

Perhitungan inverse kinematics diprogram melalui Arduino IDE menggunakan pustaka Dynamixel2Arduino dan dijalankan secara multitasking di laptop. Sistem kendali memiliki dua fungsi utama, yaitu menghitung serta memperbarui sudut gerak berdasarkan input posisi target, dan mengirimkan data posisi ke servo melalui antarmuka komunikasi TTL. Saat sistem berjalan, mikrokontroler menerima koordinat target setiap kaki, menghitung sudut gerak yang sesuai, lalu mengirimkan perintah ke servo. Semua proses dilakukan secara real-time untuk menjaga sinkronisasi dan kestabilan gerakan robot.

Pengujian dilakukan di permukaan datar maupun miring, dengan mengamati kemampuan robot mengeksekusi manuver seperti berjalan lurus, berputar, dan bergerak lateral. Evaluasi kinerja mencakup perbandingan posisi akhir kaki dengan posisi target hasil perhitungan, pengukuran waktu respons servo, serta pengamatan kestabilan dan ketepatan langkah. Data yang diperoleh digunakan untuk memverifikasi akurasi algoritma serta keandalan keseluruhan sistem kendali yang dirancang. Penelitian ini merupakan penelitian terapan yang bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pengendali gerak pada robot berkaki empat menggunakan metode inverse kinematics. Metode ini digunakan untuk menentukan konfigurasi sudut sendi yang diperlukan agar ujung kaki robot (*end-effector*) dapat mencapai posisi yang ditentukan dalam ruang tiga dimensi. Dengan pendekatan ini, setiap gerakan kaki robot seperti maju, mundur, belok kanan, belok kiri, geser kanan, dan geser kiri dapat diatur secara terkoordinasi dan presisi. Robot quadruped dalam penelitian ini dirancang memiliki empat kaki, masing-masing dengan tiga derajat kebebasan (3-DOF), yaitu coxa (sendi horizontal), femur (sendi vertikal

pertama), dan tibia (sendi vertikal kedua), yang dioperasikan oleh total dua belas unit servo Dynamixel AX-12A.

Laptop digunakan sebagai unit pemroses utama yang bertugas menghitung sudut sendi berdasarkan posisi target kaki serta mengirimkan perintah kendali ke servo. Proses inverse kinematics diawali dengan transformasi koordinat target (X, Y, Z) dari ruang tiga dimensi ke sudut-sudut rotasi masing-masing sendi kaki. Sudut coxa dihitung berdasarkan arah horizontal kaki terhadap tubuh robot, menggunakan fungsi trigonometri $\text{atan2}(Y, X)$. Selanjutnya, panjang vektor dari titik proyeksi horizontal ke titik target digunakan untuk menghitung sudut tibia dengan rumus hukum cosinus, dan sudut femur diperoleh dari selisih sudut elevasi total dengan hasil sudut tibia. Ketiga sudut ini kemudian dikonversikan ke dalam nilai digital yang dapat dikenali oleh servo AX-12A, dengan skala 0 hingga 1023 yang mewakili rentang -150° hingga $+150^\circ$. Rumus konversi tersebut adalah $\text{Posisi} = ((\theta + 150^\circ) / 300^\circ) \times 1023$.

Perhitungan *inverse kinematics* diprogram menggunakan Arduino IDE dengan pustaka *Dynamixel2Arduino*, dan dijalankan secara multitasking pada Laptop. Sistem pengendalian terdiri dari dua tugas utama: pertama, perhitungan dan pembaruan sudut gerak berdasarkan input posisi target; kedua, pengiriman data posisi ke servo AX-12A melalui antarmuka komunikasi TTL. Setiap kali sistem aktif, mikrokontroler menerima input koordinat target dari setiap kaki, menghitung sudut gerak yang sesuai, dan mengirimkannya ke masing-masing servo. Mekanisme ini berlangsung secara *real-time* untuk memastikan gerakan robot tetap sinkron dan stabil.

Pengujian dilakukan pada permukaan datar dan miring, dengan mengamati bagaimana robot mengeksekusi berbagai jenis manuver seperti berjalan lurus, berputar, serta bergerak ke samping. Evaluasi performa dilakukan dengan mencatat posisi aktual kaki setelah gerakan dibandingkan dengan posisi target hasil perhitungan. Selain itu, respons waktu servo, kestabilan gerakan, dan ketepatan langkah turut diamati untuk menilai keberhasilan sistem inverse kinematics yang dikembangkan. Hasil pengamatan ini digunakan untuk memverifikasi akurasi algoritma dan

keandalan sistem kendali secara keseluruhan.

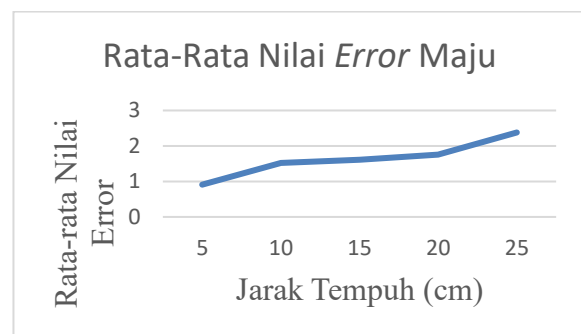
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan sebuah prototipe robot berkaki empat (*quadruped*) yang mampu melakukan manuver gerak maju, mundur, belok kanan, belok kiri, serta geser kanan dan kiri. Implementasi metode inverse kinematics pada masing-masing kaki robot berhasil mengatur sudut rotasi sendi coxa, femur, dan tibia secara terkoordinasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kendali yang dirancang mampu menjalankan perintah gerakan secara tepat, meskipun terdapat variasi tingkat akurasi antar jenis gerakan.

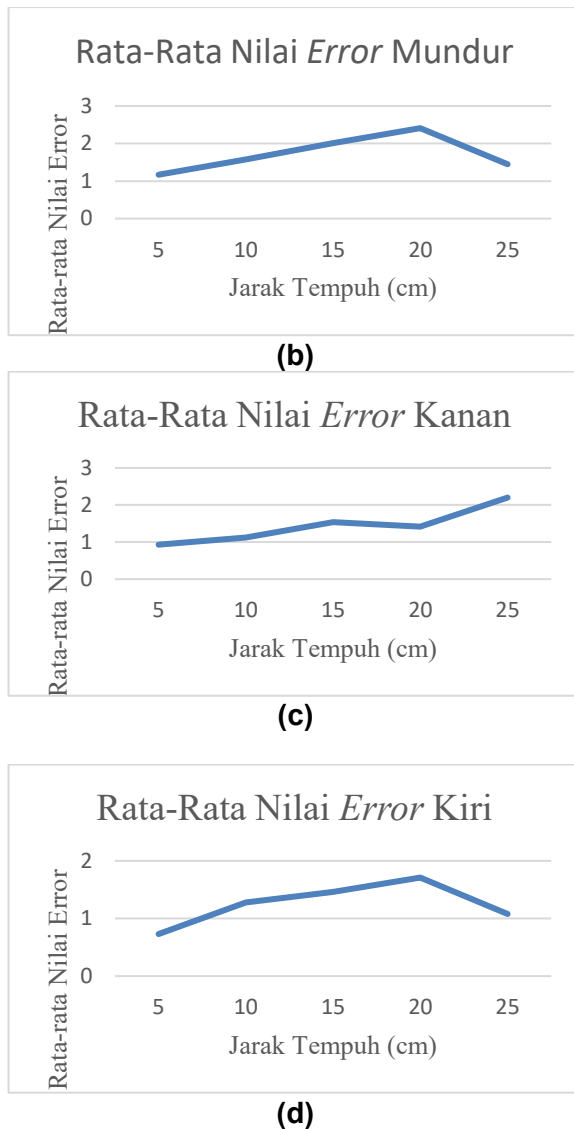
Pengujian dilakukan pada permukaan datar dengan berbagai arah gerakan. Data yang diperoleh meliputi *error* posisi rata-rata dari gerakan aktual terhadap posisi target yang dihitung secara geometris. Gerakan maju memiliki error rata-rata sebesar 3,51%, mundur 4,35%, belok kanan 3,79%, belok kiri 4,41%, geser kanan 5,12%, dan geser kiri 4,85%. Tabel berikut menyajikan hasil pengujian tersebut secara ringkas:

Tabel 1. Rata-rata Error Posisi Kaki Robot pada Berbagai Jenis Gerakan

Jenis Gerakan	Error Posisi (%)
Maju	3,51
Mundur	4,35
Belok Kanan	3,79
Belok Kiri	4,41
Geser Kanan	5,12
Geser Kiri	4,85



(a)



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Rata Rata Nilai Error Terhadap Jarak Tempuh Arah (a) Maju, (b) Mundur, (c) kanan, dan (d) kiri

Berdasarkan data tersebut, dapat dilihat bahwa gerakan maju dan belok kanan memiliki tingkat error terendah, sedangkan gerakan geser kanan dan kiri menunjukkan error yang lebih tinggi. Secara ilmiah, fenomena ini dapat dijelaskan oleh distribusi beban dan tumpuan kaki saat robot melakukan manuver lateral. Pada gerakan geser, perpindahan tumpuan tubuh ke arah samping menyebabkan beban tidak merata dan titik pusat massa berpindah secara cepat, yang memperbesar kesalahan posisi ujung kaki. Sementara pada gerakan maju atau berbelok, distribusi beban lebih simetris sehingga sistem inverse kinematics dapat menghasilkan hasil yang lebih akurat.

Dari segi respons aktuator, servo AX-12A mampu merespons sinyal dari Laptop dengan baik tanpa terjadi delay yang signifikan. Sistem kontrol berbasis pustaka *Dynamixel2Arduino* pada Laptop mampu mengirim sinyal posisi ke dua belas servo secara simultan menggunakan komunikasi TTL. Berdasarkan pengamatan visual dan rekaman waktu tanggap gerakan, rata-rata waktu respons servo berada di kisaran 40–50 ms, yang masih ideal untuk aplikasi robot edukasional.

Temuan ilmiah utama dari penelitian ini adalah bahwa implementasi *inverse kinematics* secara *real-time* dapat dilakukan tanpa sensor eksternal, selama posisi awal, panjang segmen kaki, dan sudut kerja servo telah dikalibrasi secara presisi. Meskipun tidak dilengkapi dengan sistem umpan balik (*feedback loop*), error posisi masih dapat ditekan di bawah 6%. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan berbasis pemodelan kinematika sudah cukup efektif untuk menghasilkan gerakan yang presisi pada robot *quadruped* sederhana.

Fenomena peningkatan error pada gerakan lateral juga menunjukkan perlunya pengembangan kontrol distribusi gaya atau penambahan sensor keseimbangan (seperti IMU) untuk meningkatkan adaptasi terhadap pergeseran pusat massa. Selain itu, penggunaan struktur mekanik yang lebih kaku dan desain kaki yang ringan dapat meningkatkan akurasi gerakan di masa mendatang.

Sebagai tambahan, pengamatan terhadap lintasan gerak menunjukkan bahwa pada gerakan maju sejauh 50 cm, deviasi maksimum terhadap garis lurus hanya sebesar 2,1 cm, sedangkan pada gerakan geser deviasi mencapai 3,6 cm. Ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki stabilitas gerak yang baik, terutama pada pola gerakan linier.

Dengan demikian, hasil penelitian ini secara langsung menjawab rumusan masalah yang diajukan, yaitu bahwa inverse kinematics mampu digunakan untuk mengendalikan gerakan robot *quadruped* secara presisi dan *real-time*, serta dapat menghasilkan manuver multi-arah dengan akurasi yang dapat diterima untuk keperluan edukasi dan pengembangan robotik.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perancangan dan implementasi sistem kendali gerak robot berkaki empat menggunakan metode *inverse kinematics* dapat dilakukan secara efektif dan efisien. Sistem yang dikembangkan mampu menghasilkan gerakan multi-arah seperti maju, mundur, berbelok, dan bergerak lateral dengan tingkat akurasi yang memadai meskipun tanpa dukungan sensor eksternal. Hal ini membuktikan bahwa *inverse kinematics* dapat berfungsi sebagai solusi kontrol gerak yang presisi bahkan dalam sistem kontrol terbuka, selama pemodelan kinematika dan struktur mekanik robot dilakukan secara tepat.

Secara ilmiah, penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan matematis berbasis *inverse kinematics* dapat digunakan untuk mengubah koordinat posisi target dalam ruang tiga dimensi menjadi konfigurasi sudut servo secara akurat, bahkan dalam lingkungan pengendalian yang terbatas sumber daya. Temuan ini sangat relevan untuk pengembangan platform robotik edukasional karena menunjukkan bahwa teknologi servo cerdas seperti Dynamixel AX-12A dapat dimanfaatkan secara optimal tanpa perlu perangkat sensorik kompleks yang mahal. Selain itu, penggunaan Laptop dalam eksekusi perhitungan dan kendali gerak memperlihatkan bahwa sistem tertanam (*embedded system*) dengan sumber daya terbatas tetap mampu menangani algoritma gerak real-time dengan baik.

Penelitian ini juga mengidentifikasi keterbatasan utama pada aspek gerakan lateral, di mana *error* posisi cenderung meningkat dibandingkan gerakan linier. Secara teknis, hal ini disebabkan oleh distribusi beban dinamis yang tidak simetris saat kaki melakukan pergeseran menyamping, serta keterbatasan torsi puncak dari aktuator yang digunakan. Fenomena ini membuka ruang untuk eksplorasi metode kompensasi beban atau pengembangan algoritma koreksi berbasis sensor.

Dengan demikian, seluruh rumusan masalah dan tujuan penelitian telah terjawab, baik dari sisi perancangan mekanik, pengembangan algoritma *inverse kinematics*, hingga implementasi sistem kendali. Sebagai tindak lanjut, pengembangan robot ini dapat diarahkan ke sistem kontrol tertutup berbasis sensor IMU atau *force sensor*, integrasi pembelajaran mesin untuk adaptasi medan,

serta optimalisasi konsumsi daya dan efisiensi pergerakan melalui pengembangan gait generator berbasis energi. Penelitian ini juga dapat dijadikan fondasi awal untuk pengembangan robot *quadruped* dengan aplikasi di bidang pertanian presisi, pencarian dan penyelamatan, atau eksplorasi di medan tidak beraturan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fan, Y., Pei, Z., Wang, C., Li, M., Tang, Z. and Liu, Q. (2024), A Review of Quadruped Robots: Structure, Control, and Autonomous Motion. *Adv. Intell. Syst.*, 6: 2300783. <https://doi.org/10.1002/aisy.202300783>
- [2] García, M., López, P., & Santos, J. (2020). *Thermal Management and Performance Degradation in Dynamixel AX-12 Under Continuous Operation*. *Journal of Mechatronics*, 68, 102456.
- [3] Kim, S., Lee, J., & Park, H. (2021). Durability and Performance Evaluation of Metal Gear Servos in Legged Robotics. *Journal of Advanced Robotics*, 15(1), 45–58.
- [4] Handaru A A, Afroni M J, Basuki B M. (2019). Rancang Bangun Alat Pendeteksi Hujan Otomatis Menggunakan Modul Gsm Berbasis Mikrokontroler Atmega 328p. *Science Electro*, 10(1).
- [5] Di Carlo, J., Wensing, P. M., Katz, B., Bledt, G., & Kim, S. (2018). Dynamic Locomotion in the MIT Cheetah 3 Through Convex Model-Predictive Control. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1–9.
- [6] Rodríguez, L., Martínez, F., & Delgado, A. (2023). *Comparative Performance Analysis of Dynamixel AX-12A and MX-28 in Quadruped Locomotion*. *Journal of Robotics and Automation*, 12(2), 89–103.
- [7] Soim, A., Rahman, A., & Nugroho, I. (2022). Akselerasi gerakan maju pada robot berkaki empat menggunakan Fuzzy Logic. *Jurnal Teknologi Robotika dan Mekatronika*, 8(1), 45–53.
- [8] Syakur, A. A., Fauzi, F., & Hakim, M. A. (2020). *Perancangan dan Analisis Kinematika Invers Robot Hexapod Menggunakan Servo Dynamixel AX-12*.

- Jurnal Robotika dan Kecerdasan Buatan, 8(2), 101–108.
- [9] Prayogo, R. C., Hartono, S., & Widodo, L. (2018). Implementasi stabilization algorithm pada robot quadruped dengan IMU 6-DOF. *Jurnal Sistem Kontrol dan Instrumentasi*, 5(2), 101–110.
- [10] Čížek, P., & Faigl, J. (2018). *On Locomotion Control Using Position Feedback Only in Traversing Rough Terrains with Hexapod Crawling Robot*. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/figure/Utilized-hexapod-crawling-robot-with-18-Dynamixel-AX-12A-servo-motors-and-Odroid-XU-4_fig1_328005960
- [11] Elarabawy, A. (2018). *12-DOF Quadrupedal Robot: Inverse Kinematics*.
https://www.elarabawy.com/images/IK_Model.pdf
- [12] Mildes, R., Hartono, P., & Siregar, D. (2022). Durability Analysis of Metal Gearbox in Dynamixel AX-12 Actuators. *International Journal of Robotics and Mechatronics*, 5(2), 78–85.