

IMPLEMENTASI GERAKAN MANIPULATOR LENGAN ROBOT DENGAN METODE PENDEKATAN NUMERIK INVERS KINEMATIK

Regina Chelinia Erianda Putri

Fakultas Sains dan Teknologi, Program Studi Teknik Elektro
Universitas Sanata Dharma Yogyakarta
Email: regina.chelinia@usd.ac.id

ABSTRAK

Lengan robot yang memiliki 2 DoF (Degree of Freedom) merupakan dasar fundamental penting dalam kemajuan dan perkembangan sistem robotika. Sistem ini digunakan untuk mempelajari prinsip-prinsip kinematika, kontrol, dan perencanaan pergerakan lengan robot. Tantangan utama saat merancang dan mengoperasikan lengan robot adalah menemukan titik tujuan dari posisi *end-effector* dari lengan robot yang masih sangat terbatas dan masih jarang diekspose. Solusi kinematika invers (inverse kinematics/IK) yang tepat dapat digunakan untuk menentukan titik koordinat posisi yang diinginkan dari *end-effector*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis serta membandingkan solusi kinematika invers melalui teori, simulasi, dan penerapan langsung pada perangkat keras (*hardware*). Dalam perhitungan IK teoritis, metode geometris diterapkan dan hasilnya diuji dengan simulasi dan percobaan langsung pada prototipe lengan robot 2 DoF. Penelitian menunjukkan perbedaan yang sangat kecil antara posisi *end-effector* yang dihitung secara teoritis dan posisi asli pada penerapan, dengan kesalahan maksimum kurang dari 1%. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan geometris pada kinematika invers dapat diterapkan dengan efektif dan akurat pada sistem robotika yang sederhana dan menyediakan dasar yang kuat untuk pengembangan kontrol robotika yang lebih rumit.

Kata kunci: kinematika; invers; robotik; 2 DOF; implementasi robotik; robotika dasar

ABSTRACT

A robotic arm with 2 DoF (Degrees of Freedom) is an important fundamental basis in the advancement and development of robotic systems. This system is used to study the principles of kinematics, control, and motion planning of robotic arms. The main challenge in designing and operating a robotic arm is finding the target point of the end-effector position of the robotic arm, which is still very limited and rarely exposed. An appropriate inverse kinematics (IK) solution can be used to determine the desired coordinate point position of the end-effector. This study aims to analyze and compare inverse kinematics solutions through theory, simulation, and direct implementation on hardware. In theoretical IK calculations, the geometric method is applied, and the results are tested with simulations and direct experiments on a 2 DoF robotic arm prototype. Research shows a very small difference between the theoretically calculated end-effector position and the actual position in application, with a maximum error of less than 1%. This demonstrates that the geometric approach to inverse kinematics can be applied effectively and accurately to simple robotic systems and provides a solid foundation for the development of more complex robotic control.

Keywords: kinematics; inverse; robotics; 2 DOF; robotics implementation; fundamental robotics

1. PENDAHULUAN

Sebuah mesin otomatis yang dapat melakukan tugas-tugas secara otomatis disebut robot, memiliki fleksibilitas yang tinggi dan beberapa kemampuan berpikir yang mirip dengan manusia atau makhluk hidup lainnya. Kemampuan tersebut termasuk persepsi, perencanaan, tindakan, dan kolaborasi [1]. Robot dapat bekerja sedara mandiri ataupun dengan sedikit pengawasan. Teknologi dalam bidang robotika pun sudah berkembang pesat dan sudah diterapkan pada banyak industri seperti kesehatan, perakitan, manufaktur dan bahkan militer [2-4]. Robot dapat dikategorikan menurut jenis gerakannya untuk menyelesaikan tugas tertentu [5]. Hal ini disebabkan oleh kemampuan dari lengan robot yang dapat bekerja terus menerus tanpa lelah dengan tingkat presisi yang tinggi. Penggunaan teknologi lengan robot dapat memberikan keuntungan dari segi tingkat produktifitas.

Dalam pergerakannya sebuah robot perlu dapat bergerak di dalam suatu area untuk mencapai lokasi tertentu, yaitu bergerak maju dan mundur, bergerak ke kiri dan kanan, serta bergerak atas dan bawah. Dalam ilmu matematika, pergerakan ini dikenal sebagai pergerakan pada sumbu X, Y, dan Z dalam sebuah diagram

kartesius. Umumnya lengan robot terdiri dari beberapa buah lengan (*link*) dan sendi (*joint*) yang saling terhubung dan berikat. Mempelajari lengan robot yang digunakan di industri, memerlukan pengetahuan tentang teori dari kinematika lengan robot. Ada beberapa jenis kinematika dasar dalam robotika, yakni kinematika maju dan kinematika mundur [6]. Lengan robot memerlukan ketepatan perhitungan dalam menentukan tiap gerakannya, perhitungan ini didapat dari menerapkan kinematika-kinematika tersebut. Penentuan arah gerak maupun besar sudut yang dibentuk dari link dan joint pada lengan robot diawali dari cara berpikir secara numerik dalam menentukan sudut-sudut dari link. Namun menentukan titik tujuan dari posisi *end-effector* dari lengan robot yang masih sangat terbatas dan masih jarang diekspose.

Derajat kebebasan atau biasa disebut *Degree of Freedom* (DOF) pada suatu mekanisme adalah pertimbangan pertama dalam studi kinematika dan dinamika mekanisme suatu manipulator [7]. Robot manipulator dengan 2 DOF merupakan sistem robotik dasar yang memiliki komponen penting dalam memahami fundamental robotika. Tingkat kebebasan mengacu pada jumlah sumbu gerak bebas yang termasuk dalam sistem mekanis. Lengan DOF robot 2 memiliki dua koneksi putar yang memungkinkan pergerakan di bidang x dan y . Lengan robot dengan 2 DOF merupakan salah satu konfigurasi paling sederhana tetapi cukup efisien untuk menyelesaikan tugas pemindahan dan manipulasi posisi objek pada titik koordinat dua dimensi. Meskipun sederhana, robot 2 DOF memiliki kompleksitas tersendiri dalam hal kinematika dan sistem kontrol. Robot jenis ini dapat bergerak dalam bidang dua dimensi dan memiliki aplikasi luas mulai dari sistem pendidikan hingga implementasi industri sederhana. Penelitian terkait robot 2 DOF telah berkembang secara signifikan dalam beberapa dekade terakhir [8, 9]. Menyajikan fondasi dasar untuk analisis kinematika robot, termasuk robot 2 DOF [10]. Sementara itu, salah satu buku membahas secara mendalam aspek dinamika dan kontrol robot manipulator, memberikan kerangka kerja untuk pengembangan sistem kontrol robot [11].

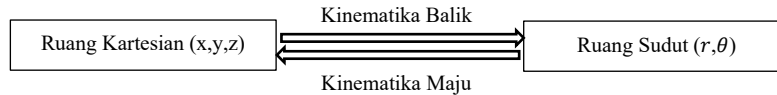
Manipulator robot sering digunakan untuk melakukan tugas pengambilan, penempatan, dan perakitan dalam industri. Manipulator ini dapat dibedakan berdasarkan jenis sambungan, jumlah derajat kebebasan (DOF), tipe gerakan sambungan, dan karakteristik lainnya dimana pada pengendaliannya membutuhkan perhitungan baik secara matematis maupun simulasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan simulasi matematis serta menganalisis gerakan lengan robot yang memiliki dua derajat kebebasan (2 DOF) dengan menggunakan pendekatan kinematika robot. Di samping itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengimplementasikan representasi lengan robot 2 DOF. Metode yang digunakan meliputi simulasi manipulasi 2 DOF menggunakan MATLAB [12] dan analisis prototipe sederhana yang didasarkan pada sudut yang diinginkan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan adanya perbedaan yang sangat kecil antara posisi *end-effector* yang dihitung secara teoritis dan posisi asli pada penerapan dengan kesalahan kurang dari 1%.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Manipulator robot sering dimanfaatkan dalam proses pengambilan, penempatan, dan perakitan dalam industri. Ada beberapa cara untuk mengklasifikasikan robot manipulator, seperti berdasarkan tipe sambungan penghubung, banyaknya derajat kebebasan, jenis gerakan pada sambungan, dan lainnya [13]. Lengan robot dengan dua sendi merupakan evolusi dari konsep robot lengan dengan satu sendi, karena pada dasarnya robot ini dibangun dari dua robot tangan dengan satu sendi. Jenis robot ini dirancang untuk mencapai titik Cartesian secara langsung di sepanjang sumbu X dan Y [14]. Pada penelitian ini akan membandingkan manipulator dua DOF yang disimulasikan melalui MATLAB dengan prototipe sederhana yang dianalisis pada sudut yang diinginkan.

2.1. Kinematika Maju

Interaksi timbal balik antara ruang Kartesian dalam sistem robotika ditunjukkan pada Gambar 1. Proses kinematika maju berfungsi untuk mengetahui lokasi dan orientasi ujung efektor di ruang Kartesian dengan mengacu pada nilai sudut-sudut sendi dalam ruang sudut. Di sisi lain, kinematika balik digunakan untuk menentukan sudut-sudut sendi yang diperlukan agar ujung efektor bisa mencapai posisi tertentu di ruang Kartesian. Hubungan antara ruang Kartesian (x, y, z) dan ruang sudut (r, θ) dalam sistem kinematika robot ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Kinematika Maju dan Kinematika Balik [15]

Pada robot manipulator, setiap sambungan memainkan peran penting dalam menentukan letak dan arah ujung lengan robot. Kinematika menjelaskan hubungan antara gerakan sambungan dan posisi end-effector tersebut, banyaknya sendi dan lengan yang saling terhubung akan menyebabkan adanya tingkat kebebasan dari sebuah manipulator. Tingkat kebebasan dalam kinematika maju merujuk pada cara menghitung posisi *end-effector* (ujung lengan robot) berdasarkan panjang sambungan dan sudut di setiap sendi. Tujuan dari kinematika maju adalah untuk menemukan posisi *end-effector* dalam sistem koordinat kartesian (x, y) dengan menggunakan sudut sendi yang diketahui, yaitu θ_1 dan θ_2 . Pada manipulator robot planar yang memiliki 2 derajat kebebasan (2 DOF), posisi *end-effector* ditentukan dengan metode transformasi geometris, di mana persamaan kinematika maju melibatkan panjang lengan l_1 dan l_2 atau menggunakan persamaan berikut [16].

$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

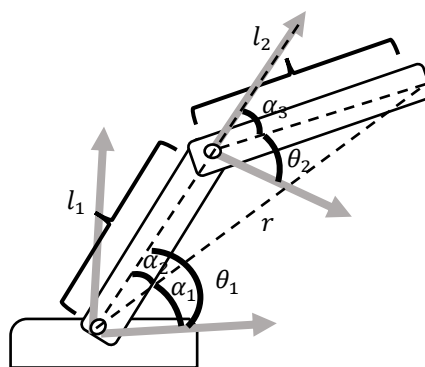
$$y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

Dimana (x,y) merupakan koordinat kartesian *end-effector*, l_1 dan l_2 adalah panjang lengan pertama dan kedua θ_1 dan θ_2 adalah sudut sendi pertama dan kedua. Forward Kinematics atau Kinematika Maju merupakan sebuah metode yang sering disebut metode trial error system, namun metode ini kurang fleksibel karena jika kita merubah gerakan robot maka pengguna sendiri yang akan melakukan trial and error sehingga memerlukan waktu lebih lama.

2.2. Kinematika Balik

Metode *invers kinematics* atau kinematika balik adalah metode analisis yang merubah koordinat x,y,z untuk menentukan konfigurasi sendi yang dibutuhkan agar lengan robotik mencapai titik tertentu di ruang [17]. Kinematika balik adalah suatu metode yang merupakan kebalikan dari kinematika maju, dimana metode kinematika mundur menentukan posisi pada ujung lengan (*end effector*). Posisi tersebut yang akan dicari berupa sudut yang harus diubah untuk setiap joint atau servo agar dapat mencapai *end effector* tersebut. Perhitungan pada kinematika ini melibatkan penyelesaian sistem persamaan trigonometri. Metode kinematika balik maka akan didapatkan nilai sudut – sudut tiap lengan robot dengan memasukan nilai posisi dari *end effector*.

Kinematika Balik adalah proses menghitung sudut koneksi koordinat target efektor akhir dengan menentukan sudut sendi (θ_1, θ_2) dari panjang lengan pertama l_1 dan panjang lengan kedua (l_2) berdasarkan posisi koordinat *end-effector* yang diinginkan (x, y) . Untuk robot 2 DOF memiliki skematik seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri Lengan Robot 2 DOF

Menghitung sudut-sudut sendi berdasarkan posisi *end-effector* yang diinginkan, dari titik tumpu utamanya. Menentukan sudut-sudut yang digunakan maka membutuhkan data koordinat tujuan (x,y). Solusi kinematika balik dapat diperoleh secara analitik dengan mensubstitusikan ke persamaan berikut.

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2)} \tag{3}$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) \tag{4}$$

Kemudian masukan hasil perhitungan dari persamaan 3 dan 4 ke persamaan berikut

$$l_2^2 = r^2 - l_1^2 - 2 r l_1 \cos \alpha_2 \tag{5}$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{r^2 + l_1^2 - l_2^2}{2 r l_1} \right) \tag{6}$$

Sehingga didapatkan persamaan θ_1

$$\theta^1 = \alpha_1 - \alpha_2 \tag{7}$$

Begitupula untuk mencari nilai θ_2

$$r^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2 l_1 l_2 \cos \alpha_3 \tag{8}$$

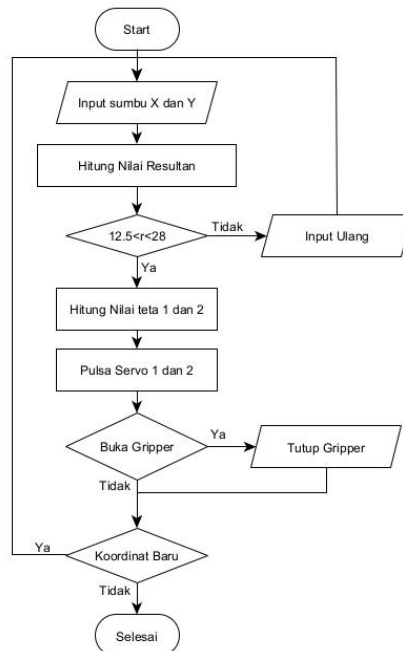
$$\alpha_3 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2 l_1 l_2} \right) \tag{9}$$

Sehingga nilai dari θ_2

$$\theta_2 = 180^\circ - \alpha_3 \tag{10}$$

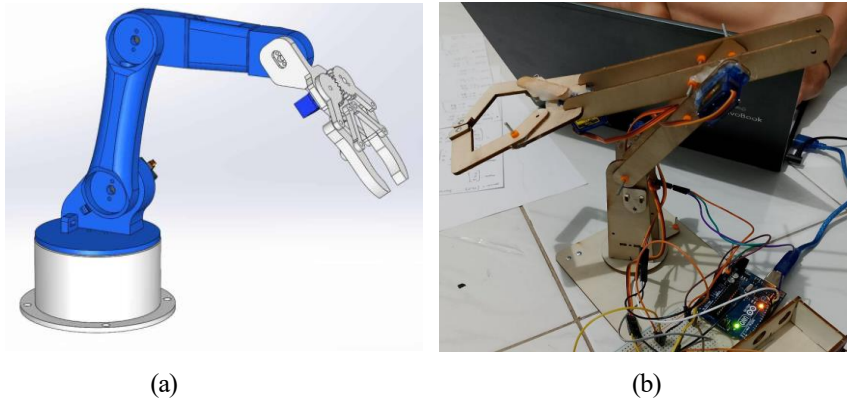
2.3. Implementasi

Cara kerja sistem kontrol untuk robot lengan dengan dua derajat kebebasan (2 DOF) yang dilengkapi dengan gripper. Proses ini dimulai dengan memasukkan koordinat tujuan (X, Y). Selanjutnya, sistem melakukan perhitungan jarak resultan r berdasarkan rumus kinematika invers. Setelah itu, sinyal PWM dikirim ke motor servo untuk mencapai posisi yang diinginkan. Begitu lengan robot mencapai koordinat target, *gripper* akan diperintahkan untuk membuka atau menutup sesuai dengan arahan (mengambil atau melepaskan benda). Sistem juga akan memeriksa apakah ada koordinat baru untuk diproses. Jika tidak ada, maka proses akan selesai. Diagram alir dari implementasi lengan robot ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram Alir Lengan Robot 2 DOF

Implementasi dilakukan dengan menghubungkan lengan pertama ke servo pertama sebagai *base* dengan panjang 12.5 cm, sedangkan lengan kedua dihubungkan ke servo kedua sebagai *joint* kedua dengan panjang 15.5 cm. Servo 3 dipasang di ujung lengan kedua untuk menggerakkan *gripper*. Dengan desain dari lengan robot ditunjukkan pada gambar 4(a) dan implementasi seperti ditunjukkan pada gambar 4(b).



Gambar 4 Desain (a) dan Implementasi (b) Lengan Robot 2 DOF

Ada pun komponen yang digunakan untuk implementasi robot 2 DOF ini adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Komponen lengan robot 2DOF

Komponen	Jumlah	Spesifikasi Mikrokontroler
Mikrokontroler	1	Arduino Mega 328P
Motor Servo SG90	3	Motor Servo SG90

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

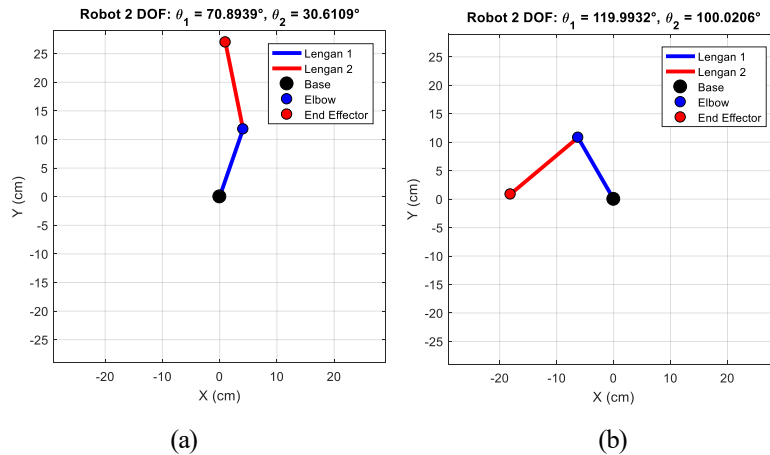
Hasil percobaan dari simulasi sistem dibandingkan dengan data percobaan *hardware*, teoritis dan percobaan simulasi MATLAB dan disajikan dalam tabel seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Pada Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian sudut sendi (θ_1 dan θ_2) dalam sistem kinematika balik dengan dua derajat kebebasan (2 DOF). Dalam tabel ini, terdapat tiga set data dibandingkan, yaitu hasil yang diperoleh secara teoritis, hasil dari perhitungan menggunakan MATLAB, dan hasil yang diperoleh melalui pengukuran atau percobaan fisik. Kolom yang mencantumkan koordinat (x, y) menunjukkan lokasi titik akhir (end-effector) yang diinginkan, sedangkan nilai θ_1 dan θ_2 memperlihatkan sudut rotasi masing-masing sendi untuk mencapai posisi yang ditentukan.

Tabel 2 Tabel Percobaan

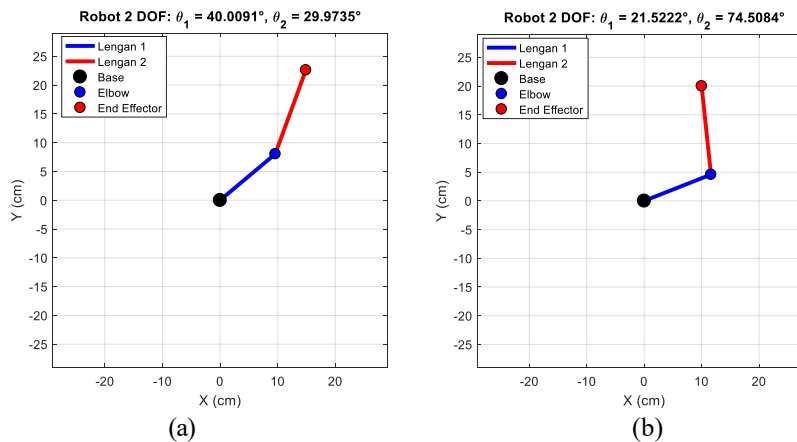
Perc.	Koordinat		Teoritis		Matlab		Aktual	
	x	y	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
1	1	27	70.87°	30.6°	70.8989°	30.6109°	70°	30°
2	-18.26	0.86	120°	100°	119.9932°	100.0206°	119°	100°
3	14.88	22.6	40.01°	30°	40.0091°	29.9735°	40°	29°
4	-11.2	8.5	71.67°	120.87°	71.675°	120.8677°	71°	120°
5	2	25	55.79°	53.13°	55.7945°	53.1301°	55°	53°
6	-20	4	119.32°	87.12°	119.3151°	87.1155°	119°	87°
7	10	20	21.52°	74.51°	21.5222°	74.5084°	21°	74°
8	-1	20	42.15°	89.33°	42.1497°	89.3346°	42°	89°

Simulasi pada MATLAB menampilkan ilustrasi sederhana seperti ditunjukkan pada Gambar berikut. Gambar 5(a) menunjukkan nilai sudut yang dibentuk lengan pada koordinat $x = 1$ dan $y = 27$ sedangkan Gambar 5(b) menunjukkan posisi sudut lengan pada koordinat $x = -18,26$ dan $y=0,86$.

Sedangkan pada Gambar 6(a) menunjukkan nilai sudut yang dibentuk lengan pada koordinat $x = 18.44$ dan $y = 22.6$ sedangkan Gambar 6(b) menunjukkan posisi sudut lengan pada koordinat $x = 10$ dan $y = 20$. Dari data yang ada, terlihat bahwa hasil perhitungan menggunakan Matlab sangat dekat dengan hasil teoritis, yang menunjukkan bahwa algoritma kinematika yang diterapkan memiliki tingkat akurasi yang tinggi. Perbedaan kecil yang muncul antara nilai teoritis, hasil Matlab, dan hasil aktual mungkin disebabkan oleh faktor-faktor eksperimen seperti kesalahan dalam pengukuran, toleransi mekanis dari lengan robot, atau keterbatasan pada sensor.



Gambar 5 Simulasi MATLAB (a) Koordinat (1,27) (b) Koordinat (-18.26, 0.86)



Gambar 6 Simulasi MATLAB (a) Koordinat (18.44, 22.6) (b) Koordinat (10,20)

Dari hasil percobaan yang terdapat dalam Tabel 3, perbedaan antara posisi ujung lengan robot yang dihitung secara teoritis dan posisi aktual memiliki error yang cukup kecil, didapatkan error paling besar sebesar 2.42% yaitu pada nilai θ_1 untuk kombinasi pada koordinat $x = 10$ dan $y = 20$ dengan sudut perhitungan secara teoritis membentuk $\theta_1 = 21.52^\circ$ dan $\theta_2 = 74.51^\circ$ sedangkan aktualnya menunjukkan sudut yang terbentuk adalah $\theta_1 = 21^\circ$ dan $\theta_2 = 74^\circ$. Total rerata error yang ditunjukkan Tabel 3 menunjukkan bahwa model kinematika balik yang digunakan untuk memprediksi sudut dari target *end-effector* pada aplikasi lengan robot 2 DOF memberikan hasil yang cukup akurat.

Tabel 3 Tabel Perbandingan Teoritis dan Aktual

Perc.	Koordinat		Teoritis		Aktual		Error (%)	
	x	y	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
1	1	27	70.87°	30.6°	70°	30°	1.23%	1.96%
2	-18.26	0.86	120°	100°	119°	100°	0.83%	0.00%

3	14.88	22.6	40.01°	30°	40°	29°	0.02%	3.33%
4	-11.2	8.5	71.67°	120.87°	71°	120°	0.93%	0.72%
5	2	25	55.79°	53.13°	55°	53°	1.42%	0.24%
6	-20	4	119.32°	87.12°	119°	87°	0.27%	0.14%
7	10	20	21.52°	74.51°	21°	74°	2.42%	0.68%
8	-1	20	42.15°	89.33°	42°	89°	0.36%	0.37%
Total Rerata Error							0.93%	0.93%

Dari hasil percobaan yang terdapat dalam Tabel 4, merupakan perbandingan antara simulasi MATLAB dengan keluaran aktual dari *hardware*. Dari tabel tersebut dapat dilihat perbedaan antara posisi ujung lengan robot yang dihitung secara teoritis dan posisi aktual tidak memiliki perbedaan yang sangat kecil, didapatkan rata-rata error untuk $\theta_1=0.94\%$ dan $\theta_2=0.93\%$ perbedaan sudut ini dikarenakan adanya pembulatan pada program sistem.

Tabel 4 Tabel Perbandingan Simulasi Matlab dan Aktual

Perc.	Koordinat		Matlab		Aktual		Error (%)	
	x	y	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
1	1	27	70.8989°	30.6109°	70°	30°	1.27%	2.00%
2	-18.26	0.86	119.9932°	100.0206°	119°	100°	0.83%	0.02%
3	14.88	22.6	40.0091°	29.9735°	40°	29°	0.02%	3.25%
4	-11.2	8.5	71.675°	120.8677°	71°	120°	0.94%	0.72%
5	2	25	55.7945°	53.1301°	55°	53°	1.42%	0.24%
6	-20	4	119.3151°	87.1155°	119°	87°	0.26%	0.13%
7	10	20	21.5222°	74.5084°	21°	74°	2.43%	0.68%
8	-1	20	42.1497°	89.3346°	42°	89°	0.36%	0.37%
Total Rerata Error							0.94%	0.93%

Secara keseluruhan, tabel 2,3 dan 4 menunjukkan adanya validasi yang baik antara model teoritis dan penerapan komputasi menggunakan Matlab dengan hasil yang nyata, menegaskan bahwa metode kinematika terbalik yang digunakan efektif dalam menentukan posisi *end-effector* dengan tepat.

Selain aspek mekanis, perbedaan yang ada antara posisi yang seharusnya, hasil simulasi MATLAB, kesalahan posisi aktual juga mungkin disebabkan oleh kesalahan dalam pengukuran sudut yang diterima oleh mikrokontroler. Sinyal PWM yang dikirimkan ke motor servo juga bisa mengalami gangguan atau penundaan (*delay*) saat sinyal diolah, yang mengakibatkan adanya perbedaan pada posisi akhir dari *end-effector*. Hasil dari eksperimen menunjukkan bahwa perhitungan kinematika balik yang dilakukan dalam koordinat ortogonal (x, y) dengan menggunakan metode trigonometri sesuai dengan teori, serta dapat diterapkan secara langsung dan efisien dalam sistem robotika.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan yang dilakukan pada lengan robot 2 DOF, baik dengan simulasi maupun *hardware* dapat disimpulkan bahwa sistem kinematika balik yang digunakan untuk memprediksi posisi *end-effector* memberikan hasil yang akurat. Perbedaan antara posisi teoritis dan aktual yang tercatat dalam pengujian berada dalam rentang error $< 1\%$, yang menunjukkan bahwa model kinematik bekerja dengan baik untuk aplikasi lengan robot sederhana dengan dua derajat kebebasan. Secara keseluruhan, percobaan ini menunjukkan bahwa lengan robot 2 DOF dapat beroperasi secara efektif dan akurat. Diharapkan sistem ini dapat ditingkatkan melalui peningkatan kalibrasi motor servo, penyempurnaan kontrol posisi, dan aspek lainnya. Sistem ini berpotensi untuk lebih dioptimalkan dan diterapkan pada tugas yang lebih kompleks di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Yang and S. Hu, "Review of robotics technologies and its applications," in *2023 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, 2023, pp. 322-329: IEEE.
- [2] S. Anam, M. Iqbal, and I. A. J. J. E. Rozaq, "Prototype Robot Pengantar Pesanan Otomatis Berbasis Arduino," vol. 2, no. 2, pp. 18-31, 2022.
- [3] G. R. Lucas, "Industrial Challenges of Military Robotics 1," in *The Just War Tradition: Applying Old Ethics to New Problems*: Routledge, 2017, pp. 171-192.
- [4] R. H. Taylor and P. Kazanzides, "Medical robotics and computer-integrated interventional medicine," in *Biomedical Information Technology*: Elsevier, 2008, pp. 393-416.
- [5] H. D. J. M. i. Siswaja, "Prinsip kerja dan klasifikasi robot," vol. 7, no. 3, pp. 147-157, 2008.
- [6] C. G. J. C. Lee, "Robot arm kinematics, dynamics, and control," vol. 15, no. 12, pp. 62-80, 1982.
- [7] J.-S. Zhao, K. Zhou, Z.-J. J. M. Feng, and M. Theory, "A theory of degrees of freedom for mechanisms," vol. 39, no. 6, pp. 621-643, 2004.
- [8] J. J. Craig, "Introduction to Robotics : Mechanics and Control 3rd Ed," 2005. London: Pearson Prentice Hall.
- [9] A. J. M. Cammarata and m. theory, "Optimized design of a large-workspace 2-DOF parallel robot for solar tracking systems," vol. 83, pp. 175-186, 2015.
- [10] A. Syahiidutama, S. Ardhi, J. P. Sugiono, H. J. J. O. I. S. Sutiksno, Graphics, Hospitality, and Technology, "Implementasi Kinematika Robot Lengan Pemindah Barang Dua Sendi (2 DOF) dengan Metode Kinematika Maju Untuk Menentukan Koordinat dalam Pemindahan Sebuah Object," vol. 2, no. 01, 2020.
- [11] S. H. Mark W. Spong, M. Vidyasagar, "A New Edition Featuring Case Studies and Examples of the Fundamentals of Robot Kinematics, Dynamics, and Control," 2020. Wiley
- [12] M. S. Raharjo, "Rancang Bangun Kinematik Lengan Robot 4 DOF Berbasis Arduino Uno Dengan Simulasi Matlab," Universitas Islam Sultan Agung, 2022.
- [13] R. C. g. K.S Fu, C. S. G. Lee "Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence,," 1987. McGraw-Hill College
- [14] D. Suwarno and R. Putri, "2D and 3D robot arms simulation using GeoGebra," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, vol. 2684, no. 1, p. 012002: IOP Publishing.
- [15] A. El-Sherbiny, M. A. Elhosseini, and A. Y. J. A. S. E. J. Haikal, "A comparative study of soft computing methods to solve inverse kinematics problem," vol. 9, no. 4, pp. 2535-2548, 2018.
- [16] S. Kucuk and Z. Bingul, *Robot kinematics: Forward and inverse kinematics*. INTECH Open Access Publisher London, UK, 2006.
- [17] H. Kanada, T. Ogawa, and H. Matsuura, "A Solution of Inverse Kinematics of Robot Arm Using Network Inversion," in *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, 2006: IEEE.