



Research Paper

Control System for U-Arm Robot Arm Movement with Linear Gripper Based on Inverse Kinematic Method

Aditya P. P. Prasetyo^{*1}, Ikang Rahmatullah¹, Kemahyanto Exaudi¹, Rendyansyah²

¹Program Studi Teknik Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya, Kota Palembang, Indonesia

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Kota Palembang, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: January 12th, 2023

Revised: March 11th, 2024

Available online: December 30th, 2024

KEYWORDS

Robotic Arm, Inverse Kinematic, Servo Motor, DoF, Gripper

CORRESPONDENCE

Phone: -

E-mail: aditrecca@gmail.com

ABSTRACT

This research presents the development of a U-Arm model robot with three degrees of freedom, utilizing Inverse Kinematic calculations. The novelty of this project lies in its precise control of the robot arm's movements through advanced kinematic algorithms. Inverse Kinematics is a mathematical process used to determine the joint angles of the robot arm from known (x, y, z) coordinates of the end-effector and the lengths of each link. The robotic arm consists of four links with lengths of 8.2 cm, 15 cm, 16 cm, and 18.4 cm, respectively, and is equipped with a gripping module for object manipulation. The methodology involves calculating the joint angles required for the desired end-effector position, ensuring accurate and efficient movement. Testing results indicate an average coordinate error of 7.13%, demonstrating the system's precision and reliability. This error rate provides valuable insights into the performance and potential areas for improvement in the kinematic model. Additionally, this research includes the development of a program to control the servo motor speed using For and delay functions. This program enhances the robot's operational efficiency by allowing precise speed adjustments, which are crucial for various applications. Overall, this study contributes to the field of robotics by offering a detailed analysis of kinematic control and program development for a multi-link robotic arm, highlighting its potential for practical applications.

PENDAHULUAN

Robot merupakan alat mekanik yang dapat diprogram sesuai dengan kebutuhan dibidangnya, robot juga dapat melakukan suatu pekerjaan yang berulang-ulang dan dapat mempermudah pekerjaan manusia[1]. Robot dapat diterapkan di berbagai bidang salah satunya pada bidang industry. Pada bidang industri jenis robot yang umum digunakan adalah robot manipulator atau disebut juga lengan robot[2].

Robot manipulator atau robot lengan merupakan rangkaian dari lengan mekanik yang terhubung oleh sendi (*link*), sendi pada lengan robot berfungsi sebagai sistem gerak pada robot, jumlah sendi dari lengan robot disebut juga dengan derajat kebebasan (*Degree of Freedom*)[3]. Robot manipulator pada dasarnya terdiri dari : Tangan Mekanik (*Mechanical Arm*) tersusun dari beberapa bagian (*Base, Shoulder, Elbow*). *End-Effector* merupakan ujung dari lengan robot yang terdapat sistem mekanik pencengkram (*Gripper*)[4]. Penggerak (*Actuator*) merupakan sistem penggerak robot yang dapat berupa Motor Servo, Sensor berfungsi sebagai masukan umpan balik pada proses pengendalian lengan robot[5]. Secara umum lengan robot merupakan alat mekanik yang dapat

melakukan pekerjaan secara presisi, cepat dan dapat melakukan tugas secara berulang-ulang[6]. Salah satu masalah dalam pembuatan robot adalah menemukan persamaan kinematic dari robot lengan. Kinematik terdiri dari dua jenis, yaitu *Forward Kinematic* dan *Invers Kinematic*.

Forward Kinematic adalah analisis kinematik untuk mendapatkan posisi koordinat (x,y,z), dengan memberikan masukkan berupa sudut dari sendi lengan robot. Sedangkan, *Invers Kinematic* adalah analisis kinematik untuk mendapatkan sudut-sudut untuk setiap sendi lengan robot, dengan memberikan koordinat posisi (x,y,z)[7]. Pada pengembangan proyek ini menggunakan metode Invers Kinematic sebagai metode untuk menganalisa pergerakan lengan robot.

Penerapan metode Invers Kinematic ini bertujuan untuk mendapatkan posisi akhir dari end-effector gripper dan mengetahui perpindahan sudut dari masing-masing sendi (*link*) dengan memberikan masukkan posisi koordinat (x, y, z) [8]. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah dalam pengendalian presisi lengan robot, khususnya dalam menentukan sudut-sudut sendi yang tepat untuk mencapai posisi end-effector yang diinginkan. Masalah yang sering dihadapi adalah

ketidakakuratan dalam perhitungan sudut sendi yang dapat menyebabkan kesalahan posisi end-effector [9]. Dengan menggunakan metode Invers Kinematic, penelitian ini berusaha untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi gerakan lengan robot, sehingga dapat digunakan dalam aplikasi yang memerlukan presisi tinggi, seperti dalam industri manufaktur [10] dan medis[11].

Lengan robot ini kendalikan oleh mikrokontroler *Arduino UNO R3*. Mikrokontroler merupakan otak pengendalian dari suatu alat dengan memasukkan program untuk mengendalikan alat tersebut[12]. *Arduino Uno R3* merupakan mikrokontroler berbasis ATmega328 yang memiliki 14 pin digital *Input/Output* yang 6 diantaranya pin PWM, memiliki 6 pin *input* analog, dan osilator 16MHZ. Program Arduino diunggah menggunakan kabel USB [13], untuk sumber tegangan ke *Arduino* dapat menggunakan kabel *jack* 5,5 mm ke *port jack* pada *Arduino* atau menggunakan sambungan USB yang terhubung ke komputer. Tegangan *input* Arduino 7-12 Volt[14]. Sendi lengan robot ini digerakkan menggunakan motor servo. Motor servo adalah perangkat listrik yang berputar sesuai sudut masukan, terdapat 2 jenis servo : AC motor servo dan DC motor servo [15].

METODE

Rekayasa Kebutuhan

Untuk alat dapat bekerja sesuai tujuan, terdapat beberapa kebutuhan yang diperlukan untuk merancang *Software* sistem kendali lengan robot dengan metode *Invers Kinematic* yang meliputi kebutuhan fungsional *software*, kebutuhan perangkat keras (*Hardware*) dan kebutuhan perangkat lunak (*software*).

Kebutuhan Fungsional Sistem

Kebutuhan fungsional Sistem adalah kebutuhan yang harus dimiliki sistem untuk dapat melayani *user* sesuai dengan tujuan awal dari dirancangnya sistem tersebut. Kebutuhan fungsional ini wajib terpenuhi agar sistem dapat berfungsi dengan baik yaitu fungsi pengontrolan lengan robot menggunakan motor servo. Fungsi ini mengharuskan sistem mampu mengontrol motor servo sesuai masukan x,y,z dengan menggunakan metode *Invers kinematic*[16].

Kebutuhan Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak pada sistem ini terdiri sebagai berikut beserta penjelasannya pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Kebutuhan Perangkat Keras

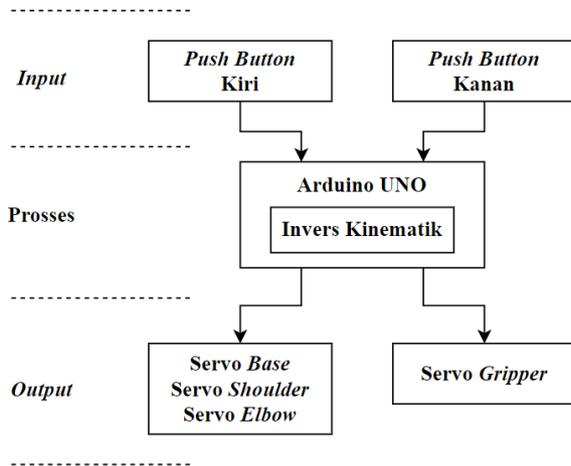
Perangkat Keras	Fungsi	Konfigurasi dan Skema Koneksi
Arduino UNO	Mengolah data x,y,x untuk dirubah menjadi keluaran dalam bentuk sudut dengan metode <i>Invers Kinematic</i> .	Terhubung ke laptop melalui kabel USB untuk pemrograman dan daya. Pin digital pada Arduino digunakan untuk mengontrol motor servo dan membaca input dari push button.
Motor Servo MG995	Menggerakkan lengan robot sesuai dengan keluaran sudut dari Arduino UNO	Terhubung ke pin PWM pada Arduino untuk menerima sinyal kontrol. Daya untuk servo ini disuplai dari sumber daya eksternal yang sesuai dengan spesifikasi servo.
Motor Servo MG90S	Menggerakkan <i>gripper linear</i> lengan robot	Terhubung ke pin PWM lain pada Arduino untuk kontrol gripper. Sama seperti MG995, daya disuplai dari sumber daya eksternal.
<i>Push Button</i>	Untuk memberikan masukan pergerakan lengan robot	Terhubung ke pin digital pada Arduino dengan resistor pull-down untuk membaca status tombol (ditekan atau tidak ditekan).
Laptop	Melakukan pemrograman pada Arduino dengan menggunakan <i>software</i> Arduino IDE	Digunakan untuk menulis dan mengunggah kode ke Arduino melalui Arduino IDE

Tabel 2. Kebutuhan Perangkat Lunak

Kebutuhan Perangkat Lunak	Fungsi	
Arduino IDE	Sebagai <i>software</i> untuk membuat dan memasukkan program ke dalam board arduino UNO	Digunakan untuk menulis kode dalam bahasa pemrograman C/C++. Kode dimulai dengan mengimpor library <code><Servo.h></code> dan mendeklarasikan variabel serta objek servo. Fungsi <code>setup()</code> digunakan untuk menginisialisasi pin dan mengatur komunikasi serial jika diperlukan. Fungsi <code>loop()</code> berisi logika utama yang dijalankan berulang kali, termasuk membaca input dari push button, menghitung sudut menggunakan <i>Invers Kinematic</i> , dan mengirim sinyal ke motor servo.
Invers Kinematic	Sebagai metode untuk menentukan posisi end-effector dari lengan robot	Algoritma <i>Invers Kinematic</i> diimplementasikan dalam fungsi khusus yang menerima input koordinat (x, y, z) dan mengembalikan sudut-sudut sendi $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$. Perhitungan ini melibatkan penggunaan persamaan matematika untuk menentukan sudut yang diperlukan agar end-effector mencapai posisi yang diinginkan. Hasil perhitungan sudut kemudian digunakan untuk menggerakkan motor servo
Library <code><Servo.h></code>	Untuk mengontrol motor servo	Library ini menyediakan fungsi <code>attach()</code> untuk menghubungkan objek servo dengan pin PWM pada Arduino. Fungsi <code>write()</code> digunakan untuk mengatur posisi sudut servo berdasarkan hasil perhitungan <i>Invers Kinematic</i> . Contoh penggunaan: <code>servo1.write(theta1)</code> ; untuk menggerakkan servo ke sudut θ_1

Perancangan Alat

Alat yang dibangun adalah sebuah sistem yang dapat mengendalikan lengan robot untuk memindahkan kaleng dari tangan ke kiri dan dari tengah ke kanan dengan *push button* menggunakan metode *Invers Kinematic*, kemudian output yang dihasilkan dapat memindahkan kaleng sesuai dengan *push button* yang ditekan. Adapun *flowchart* rangkaian dari keseluruhan sistem dapat dilihat pada Gambar 1.

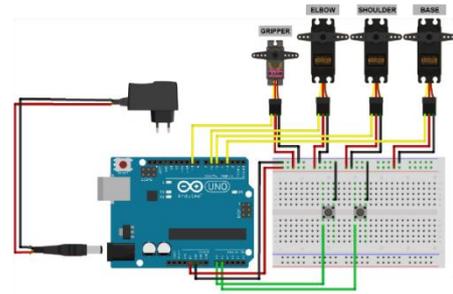


Gambar 1. Diagram Rangkaian Alat

Dari diagram pada gambar 1 diatas, dapat diketahui bahwa terdiri dari tiga tahap proses pada alat, yaitu *Input*, Proses (*Invers Kinematic*) dan *Output*. Pada tahap input, terdapat 2 tombol kondisi untuk lengan robot yaitu tombol kanan dan tombol kiri, fungsi dari kedua tombol tersebut untuk memeberikan kondisi posisi lengan robot ke kanan atau ke kiri. Kemudian masuk pada tahap proses, masukkan dari tombol akan diproses pada Arduino Uno dengan metode *Invers Kinematic* untuk memproses data masukkan x,y,z menjadi keluaran dalam bentuk sudut sesuai masukkan *push button* pada tahap *Input*. Selanjutnya, pada tahap Output, hasil dari proses *Invers Kinematic* pada Arduino UNO akan menghasilkan sudut untuk menggerakkan motor servo pada lengan robot, apabila tombol kanan yang ditekan, maka sudut yang dihasilkan akan menggerakkan lengan robot ke kanan dan gripper akan mencengram kaleng, lalu lengan robot akan memindahkan kaleng tersebut ke posisi lengan robot awal. Sebaliknya, apabila tombol kiri yang ditekan, maka sudut yang dihasilkan akan menggerakkan kengan robot ke kiri dan gripper akan mencengram kaleng, lalu lengan robot akan memindahkan kaleng tersebut ke posisi awal lengan robot.

Perancangan Perangkat Keras

Pada gambar 2 dibawah ini adalah skema keseluruhan dari perancangan *Hardware* yang terdiri beberapa komponen alat beserta fungsinya, yaitu *Servo Base* menggerakkan lengan robot ke kiri dan ke kanan, *servo shoulder* menggerakkan lengan robot maju dan mundur, *servo elbow* menggerakkan lengan robot naik dan turun dan *servo gripper* menggerakkan cengkraman untuk mencengkram kaleng. yang di proses oleh mikrokontroller Arduino UNO menggunakan perhitungan *Invers Kinematic*.



Gambar 2. Skema Rangkaian keseluruhan Hardware

Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan keseluruhan software ini merupakan gabungan dari beberapa proses perancangan *software* yang terdiri dari proses inialisasi, pembacaan *Push Button*, proses perhitungan *Inverse Kinematic* untuk mendapatkan sudut dan kendali servo *Base*, *Shoulder*, *Elbow* dan *Gripper*. Berikut pseudocode keseluruhan perancangan *Software* yang ditunjukkan pada gambar 3.

```

BEGIN
  // Initialize libraries and declare initial variables
  INITIALIZE libraries
  DECLARE initial variables

  // Determine the initial position of the robot arm
  GET initial position of robot arm

  // Provide input using buttons
  WHILE true DO
    IF left button is pressed THEN
      // Execute left position coordinates
      EXECUTE left position coordinates
    ELSE IF right button is pressed THEN
      // Execute right position coordinates
      EXECUTE right position coordinates
    END IF

    // Perform inverse kinematic calculations
    CALCULATE inverse kinematics
    OUTPUT theta1, theta2, theta3

    // Move servo based on theta values
    MOVE servo to theta1, theta2, theta3

    // Gripper action
    GRIP object

    // Move robot to the desired position
    MOVE robot to target position
  END WHILE

  // End of process
  END
  
```

Gambar 3. Pseudocode keseluruhan program Arduino UNO

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari kegiatan penelitian ini adalah pengukuran akurasi posisi end effector gerak lengan robot. Pengujian titik koordinat dari *end-effector* ini bertujuan untuk mengetahui *error* dari titik koordinat x,y,z dengan membandingkan *input* nilai titik koordinat di program dengan output titik koordinat pada alat secara langsung. Dan juga bertujuan untuk mengetahui *error* sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ dari hasil perhitungan *Invers Kinematic*, dengan membandingkan sudut perhitungan *Invers Kinematic* pada program dengan pengukuran secara langsung pada alat.

Pengujian Posisi Koordinat End-Effector dan Sudut Lengan Robot

Pada pengujian ini terdapat tiga posisi dari *end-effector* yang diuji, yaitu terdiri dari posisi awal ke posisi ambil, dari posisi ambil ke posisi kiri, dan dari posisi ambil ke posisi kanan. Masing-masing posisi diuji sebanyak 10 kali secara berulang. Pengujian dilakukan pada laboratorium Hardware FASILKOM UNSRI, dengan ukuran lengan robot sebagai berikut : link1 8,2 cm, link 2: 15 cm, link3: 16 cm dan link4: 18,4 cm. Objek yang diambil dan dipindahkan ialah botol kaleng dengan ukuran dimensi tinggi: sekitar 10,4 cm dan diameter: sekitar 5,3 cm.

Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Ambil

Hasil pengujian nilai *error* koordinat x,y,z pada posisi awal ke posisi ambil dapat dilihat pada Tabel 3. Pada hasil pada Tabel 3 diatas, untuk titik x menunjukkan rata-rata *error* yang kecil 1.43% di atas nilai *input*, untuk titik y menunjukkan rata-rata *error* yang kecil 2.49% di bawah nilai *input* dan untuk titik z menunjukkan rata-rata *error* yang cukup besar 8.26% di bawah nilai *input*. Hasil pengujian *error* sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ pada posisi awal ke posisi ambil yang ditunjukkan pada Tabel 4 .

Tabel 3. Hasil pengujian koordinat x,y,z posisi ambil

No	Nilai x,y,z posisi ambil						<i>Error</i> (%)		
	Input			Output					
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1.	25	25	7	25.4	24.4	6.4	1.57	2.45	9.37
2.	25	25	7	25.4	24.4	6.4	1.57	2.45	9.37
3.	25	25	7	25.3	24.3	6.4	1.18	2.46	9.37
4.	25	25	7	25.4	24.3	6.4	1.57	2.88	9.37
5.	25	25	7	25.4	24.3	6.4	1.57	2.88	9.37
6.	25	25	7	25.3	24.4	6.4	1.18	2.45	9.37
7.	25	25	7	25.5	24.4	6.5	1.38	2.04	7.69
8.	25	25	7	25.3	24.5	6.4	1.18	2.44	9.37
9.	25	25	7	25.4	24.4	6.4	1.57	2.45	9.37
10.	25	25	7	25.4	24.3	6.4	1.57	2.46	9.37
Rata-rata <i>Error</i> (%)							1.43	2.49	8.26

Pada hasil pada Tabel 4 di atas, untuk θ_1 menunjukkan rata-rata *error* 2.84% di bawah hasil perhitungan, untuk θ_2 menunjukkan rata-rata *error* 1.73% di atas hasil perhitungan, dan untuk θ_3 menunjukkan rata-rata *error* 0.91% di bawah hasil perhitungan. Nilai *error* ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk ketidakakuratan dalam model kinematika yang digunakan, toleransi mekanis pada sambungan dan link lengan robot, serta kesalahan dalam pengukuran posisi end-effector. Ketidakakuratan model kinematika dapat terjadi jika asumsi yang

digunakan dalam perhitungan tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi nyata. Toleransi mekanis, seperti kelonggaran pada sambungan atau ketidakpresisian dalam pembuatan link, juga dapat menyebabkan perbedaan antara hasil perhitungan dan posisi aktual. Kesalahan pengukuran posisi end-effector dapat terjadi karena keterbatasan sensor atau alat ukur yang digunakan.

Tabel 4. Hasil pengujian sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ posisi ambil

No.	Nilai $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ posisi ambil						<i>Error</i> (%)		
	Perhitungan ^o			Output ^o					
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
1.	45	56	66	43.5	57	65	3.44	1.75	1.53
2.	45	56	66	43.5	58	65	3.44	3.44	1.53
3.	45	56	66	44	58	65	2.27	3.44	1.53
4.	45	56	66	44	57	65	2.27	1.75	1.53
5.	45	56	66	44	58	65	2.27	3.44	1.53
6.	45	56	66	43.5	56	66	3.44	0	0
7.	45	56	66	43.5	57	65	3.44	1.75	1.53
8.	45	56	66	44	56	66	2.27	0	0
9.	45	56	66	44	57	66	2.27	1.75	0
10.	45	56	66	45.5	56	66	3.29	0	0
Rata-rata <i>Error</i> (%)							2.84	1.73	0.91

Pengaruh dari nilai *error* ini terhadap sistem adalah bahwa presisi gerakan lengan robot dapat berkurang, yang dapat mempengaruhi kemampuan robot untuk mencapai posisi yang diinginkan dengan tepat. Hal ini penting terutama dalam aplikasi yang memerlukan tingkat akurasi tinggi, seperti dalam industri manufaktur atau medis. Oleh karena itu, penting untuk terus mengkalibrasi dan memperbaiki model kinematika serta komponen mekanis untuk mengurangi nilai *error* dan meningkatkan keandalan sistem.

Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Kanan

Hasil pengujian nilai *error* koordinat x,y,z pada posisi awal ke posisi ambil dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kanan

No.	Nilai x,y,z posisi ambil						<i>Error</i> (%)		
	Input			Output					
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1.	40.5	9.5	15	41.4	8.4	14.4	2.17	13.09	4.16
2.	40.5	9.5	15	41.5	8.3	14.4	2.40	13.77	4.16
3.	40.5	9.5	15	41.5	8.2	14.3	2.52	15.85	4.89
4.	40.5	9.5	15	41.6	8.1	14.3	2.64	17.28	4.89
5.	40.5	9.5	15	42	8.1	14.3	3.57	17.28	4.89
6.	40.5	9.5	15	42	8.1	14.3	3.57	17.28	4.89
7.	40.5	9.5	15	42	8	14.3	3.57	18.75	4.89
8.	40.5	9.5	15	41.9	8.3	14.4	3.34	13.77	4.16
9.	40.5	9.5	15	41.9	8.1	14.3	3.34	17.39	4.89
10.	40.5	9.5	15	41.9	8.0	14.3	3.34	18.01	4.89
Rata-rata <i>Error</i> (%)							3.04	16.24	4.71

Pada hasil pada Tabel 5 diatas, untuk titik x menunjukkan rata-rata *error* yang kecil 3.04% di atas nilai *input*, untuk titik y menunjukkan rata-rata *error* yang besar 16.24% di bawah nilai *input* dan untuk titik z menunjukkan rata-rata *error* yang cukup besar kecil 4.71% di bawah nilai *input*.

Berikut hasil pengujian *error* sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ pada posisi tengah ke posisi kanan yang ditunjukkan pada Tabel 6 di bawah.

Tabel 6. Hasil pengujian sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ Posisi Kanan

No.	Nilai $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ posisi ambil						Error (%)		
	Perhitungan ^o			Output ^o					
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
1.	13	57	102	13	57	104	0	0	1.92
2.	13	57	102	13	57	105	0	0	2.85
3.	13	57	102	13	58	105	0	1.72	2.85
4.	13	57	102	12.5	57	106	4	0	3.77
5.	13	57	102	12	58	105	8.33	1.72	2.85
6.	13	57	102	12	58	105	8.33	1.72	2.85
7.	13	57	102	12	58	106	8.33	1.72	3.77
8.	13	57	102	12	58	105	8.33	1.72	2.85
9.	13	57	102	12	58	105	8.33	1.72	2.85
10.	13	57	102	12.5	58	105	4	1.72	2.85
Rata-rata Error (%)							4.96	1.20	2.94

Pada hasil pada Tabel 6 diatas, untuk θ_1 menunjukkan rata-rata error 4.96% di bawah hasil perhitungan, untuk θ_2 menunjukkan rata-rata error 1.20% di atas hasil perhitungan, dan untuk θ_3 menunjukkan rata-rata error 2.94% di atas hasil perhitungan.

Hasil dan Analisis Pengujian Posisi Kiri

Hasil pengujian nilai error koordinat x,y,z pada posisi awal ke posisi ambil dapat dilihat pada Tabel 7 di bawah.

Tabel 7. Hasil pengujian koordinat x,y,z Posisi Kiri

No	Nilai x,y,z posisi ambil						Error (%)		
	Input			Output					
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1.	9.5	40.5	15	11.6	40.9	14.6	18.10	0.97	2.73
2.	9.5	40.5	15	12	40.7	14.6	20.83	0.49	2.73
3.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0.74	2.73
4.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0	2.73
5.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0	2.73
6.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0	2.73
7.	9.5	40.5	15	12.9	40.5	14.6	26.35	0	2.73
8.	9.5	40.5	15	13	40.5	14.6	26.92	0	2.73
9.	9.5	40.5	15	13	40.4	14.6	26.92	0.24	2.73
10.	9.5	40.5	15	12.9	40.4	14.6	26.35	0.24	2.73
Rata-rata Error (%)							25.08	0.26	2.73

Pada hasil pada Tabel 7 diatas, untuk titik x menunjukkan rata-rata error yang besar 25.08% di bawah nilai input, untuk titik y menunjukkan rata-rata error yang sangat kecil 0.26% di bawah nilai input dan untuk titik z menunjukkan rata-rata error yang kecil dan stabil di 10 percobaan, yaitu 2.73% di bawah nilai input.

Hasil pengujian error sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ pada posisi tengah ke posisi kiri yang ditunjukkan pada Tabel 8. Pada hasil Tabel 8, θ_1 menunjukkan rata-rata error 5.04% di bawah hasil perhitungan, θ_2 menunjukkan rata-rata error 1.72% di atas hasil perhitungan, dan θ_3 menunjukkan rata-rata error 2.75% di atas hasil perhitungan. Error ini disebabkan oleh ketidakakuratan model kinematika, toleransi mekanis, dan kesalahan pengukuran. Error ini dapat mengurangi presisi gerakan lengan robot, mempengaruhi kemampuan mencapai posisi yang diinginkan. Penting untuk mengkalibrasi dan memperbaiki model serta komponen mekanis untuk meningkatkan akurasi sistem.

Tabel 8. Hasil pengujian sudut $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ Posisi Kiri

No.	Nilai $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ posisi ambil						Error (%)		
	Perhitungan ^o			Output ^o					
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3	θ_1	θ_2	θ_3
1.	77	57	102	75	58	105	2.66	1.72	2.85
2.	77	57	102	74	58	105	4.05	1.72	2.85
3.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
4.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
5.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
6.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
7.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
8.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
9.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
10.	77	57	102	73	58	105	5.47	1.72	2.85
Rata-rata Error (%)							5.04	1.72	2.75

Pengujian Kecepatan Lengan Robot

Pengujian kecepatan lengan robot ini bertujuan untuk mengetahui waktu lengan robot untuk mencapai posisi dari *end-effector*. Pada pengujian ini terdapat tiga posisi yang diuji, yaitu terdiri dari posisi awal ke posisi ambil, posisi awal ke posisi kanan dan poisisi awal ke posisi kiri.

Waktu gerakan diukur dengan menggunakan timer yang mencatat durasi dari saat perintah gerakan diberikan hingga lengan robot mencapai posisi yang diinginkan. Perbedaan dalam waktu yang diperlukan untuk bergerak ke posisi yang berbeda dapat disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk jarak yang harus ditempuh oleh lengan robot, kecepatan motor servo, dan kompleksitas perhitungan kinematika. Posisi yang lebih jauh atau memerlukan perubahan sudut yang lebih besar biasanya membutuhkan waktu lebih lama untuk dicapai. Selain itu, beban yang dibawa oleh gripper dan resistensi mekanis juga dapat mempengaruhi waktu gerakan. Pengukuran waktu ini penting untuk mengevaluasi efisiensi dan responsivitas sistem, serta untuk mengidentifikasi area yang memerlukan peningkatan dalam hal kecepatan dan akurasi gerakan.

Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Ambil

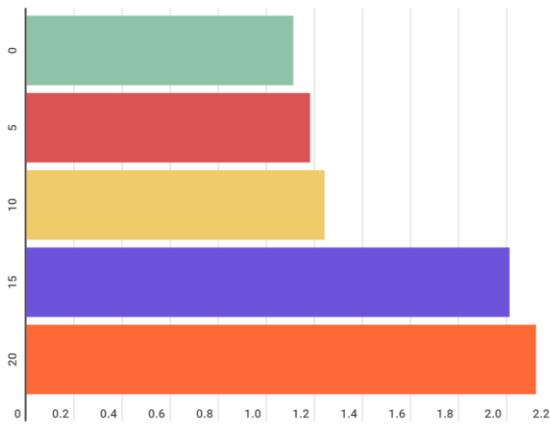
Hasil pengujian kecepatan lengan robot ke posisi ambil dapat dilihat pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Hasil pengujian kecepatan servo posisi ambil

No.	Kecepatan Posisi Awal ke Posisi Ambil (25, 25, 7)		
	Input Delay	Waktu (detik)	Selisih
1.	0	1.11	0
2.	5	1.18	0.07
3.	10	1.24	0.06
4.	15	2.01	0.07
5.	20	2.12	0.11
Rata-rata selisih(detik)			0,06

Pada hasil Tabel 8 di atas menunjukkan selisih pada pengujian ke posisi ambil sebesar 0.06 detik. Selisih kecepatan lengan robot tidak terlalu signifikan, pada input delay 0 sampai 10 kecepatan

masih sangat cepat. Tapi pada input 15 dan 20 terlihat perubahan kecepatan yang signifikan. Untuk perbandingan visual dapat dilihat pada diagram batang yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Kecepatan Posisi Ambil

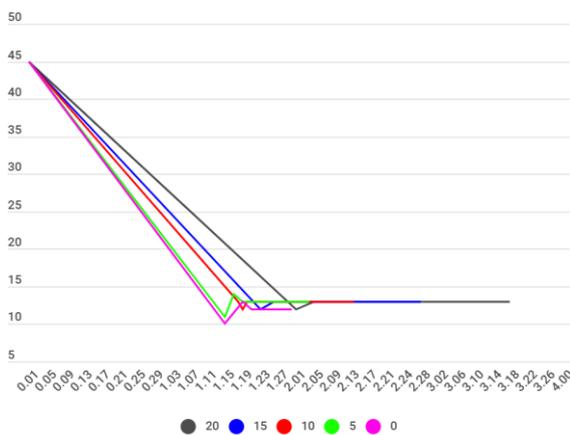
Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Kanan

Hasil pengujian kecepatan lengan robot ke posisi ambil dapat dilihat pada Tabel 9 di bawah.

Tabel 9. Hasil pengujian kecepatan servo posisi kanan

Kecepatan Posisi Awal ke Posisi Kanan			
No.	Input Delay	Waktu (detik)	Selisih
1.	0	1.29	0
2.	5	2.03	0.04
3.	10	2.13	0.10
4.	15	2.27	0.14
5.	20	3.17	0.20
Rata-rata selisih			0.09

Pada hasil Tabel 9 di atas menunjukkan selisih pada pengujian ke posisi kanan sebesar 0.09 detik. Pada pergerakan ke posisi kanan dengan *input* nilai 0 terdapat pergerakan yang tidak stabil pada lengan robot, pergerakan yang disebabkan karena pergerakan lengan robot yang terlalu cepat, sehingga menghasilkan gerak yang berlebihan dari sudut yang ditujuh (sudut 13°). Gerakan yang berlebihan tersebut dapat dilihat pada grafik garis yang ditunjukkan oleh Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Grafik Kecepatan Posisi Kanan

Grafik pada gambar 5 diatas menunjukkan dimana semakin besar *input delay*, maka semakin lambat gerakan lengan robot dan

menghasilkan gerakan yang stabil. Tetapi apabila *input delay* lebih dari 20, pergerakan lengan robot tidak efektif, karena pergerakan lengan robot sangat lambat.

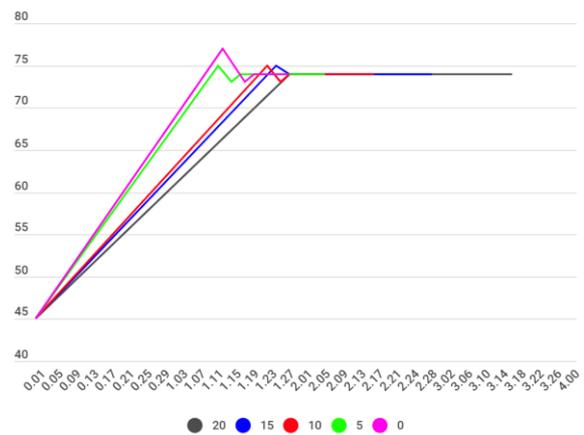
Hasil dan Analisis Pengujian Kecepatan Ke Posisi Kiri

Hasil pengujian kecepatan lengan robot ke posisi ambil dapat dilihat pada Tabel 10 di bawah.

Tabel 10. Hasil pengujian kecepatan servo posisi kiri

Kecepatan Posisi Awal ke Posisi Kiri			
No.	Input Delay	Waktu (detik)	Selisih
1.	0	1.27	0
2.	5	2.05	0.08
3.	10	2.16	0.11
4.	15	2.28	0.12
5.	20	3.16	0.18
Rata-rata selisih			0.09

Pada hasil Tabel 10 di atas menunjukkan selisih pada pengujian ke posisi kanan sebesar 0.09 detik. Pada pergerakan ke posisi kanan dengan *input* nilai 0 terdapat pergerakan yang tidak stabil pada lengan robot, pergerakan yang disebabkan karena pergerakan lengan robot yang terlalu cepat, sehingga menghasilkan gerak yang berlebihan dari sudut yang ditujuh (sudut 13°). Gerakan yang berlebihan tersebut dapat dilihat pada grafik garis yang ditunjukkan oleh Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Grafik Kecepatan Posisi Kiri

Grafik pada Gambar 6 diatas menunjukkan dimana semakin besar *input delay*, maka semakin lambat gerakan lengan robot dan menghasilkan gerakan yang stabil. Tetapi apabila *input delay* lebih dari 20, pergerakan lengan robot tidak efektif, karena pergerakan lengan robot sangat lambat.

KESIMPULAN

Setelah merancang hardware dan software serta mengimplementasikan metode Invers Kinematic pada lengan robot, hasil pengujian menunjukkan keberhasilan metode ini dalam menentukan sudut sendi yang diperlukan untuk mencapai posisi end-effector yang diinginkan. Pada Posisi Ambil, sudut yang dihasilkan adalah $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 56^\circ$, dan $\theta_3 = 66^\circ$; pada Posisi Kanan, $\theta_1 = 13^\circ$, $\theta_2 = 57^\circ$, dan $\theta_3 = 102^\circ$; dan pada Posisi Kiri, $\theta_1 = 77^\circ$, $\theta_2 = 57^\circ$, dan $\theta_3 = 102^\circ$. Pergerakan lengan robot ini stabil dengan rata-rata error sebesar 9.86% untuk x, 6.33%

untuk y, dan 5.23% untuk z, menunjukkan keandalan sistem untuk aplikasi dengan presisi sedang. Selain itu, perbandingan posisi kiri dan kanan menunjukkan bahwa sudut θ_1 pada Posisi Kanan lebih kecil dibandingkan dengan Posisi Kiri, yang berarti lengan robot harus melakukan penyesuaian lebih besar untuk mencapai posisi kiri, penting untuk desain dan pengendalian lengan robot.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Widodo, Ignatius Gunawan, et al. "Desain dan Analisis Model Lengan Robot untuk Memindahkan Material." *Jurnal Rekayasa Mesin* 18.2 (2023): 313-318.
- [2] Pamungkas, Daniel S., and Muhammad Samsu Noviansyah. "Simulator Robot Lengan Dua Derajat Kebebasan." *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)*. Vol. 7. No. 1. 2021.
- [3] Satrio, Muhammad Andhy, et al. "Rancang Bangun Robot Arm 4 DOF Berbasis Mikrokontroler ATmega328." *Mechatronics Journal in Professional and Entrepreneur (MAPLE)* 3.2 (2021): 59-63.
- [4] Bhaskoro, Susetyo Bagas, dan Muhammad Azhar Abdul Aziz. "Pengendalian Gerak Robot menggunakan Semantik Citra Gestur Tangan Manusia." *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika* 8.1 (2020): 80.
- [5] Sitompul, Erwin, and Sodri Sodri. "Prototipe Manipulator Lengan Robot Berbasis Arduino dengan Metoda Kendali Lead-Through." *Jurnal ELEMENTER (Elektro dan Mesin Terapan)* 6.1 (2020): 1-14.
- [6] Sutisna, Nanang Ali. "Rancang Bangun Robot Arm Berbasis Raspberry Pi Menggunakan Printer 3D." *Jurnal Teknik Mesin dan Mekatronika (Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics)* 7.2 (2022): 131-146.
- [7] Iskandar, Fathur Rokhman, Imam Suchayyo, and Meta Yantidewi. "Penerapan Metode Invers kinematik Pada Kontrol Gerak Robot Lengan Tiga Derajat Bebas." *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI)* 9.2 (2020): 64-71.
- [8] Raharjo, Muhamad Singgih. *Rancang Bangun Kinematik Lengan Robot 4 DOF Berbasis Arduino Uno Dengan Simulasi Matlab*. Diss. Universitas Islam Sultan Agung, 2022.
- [9] Abdullah, Riztan Hanif, et al. "Perancangan Sistem Kontrol Vibrasi pada Robot Single Link Flexible Joint Manipulator dengan PID Tuning Genetic Algorithm." *Jurnal Teknik Elektro* 10.1 (2021): 9-17.
- [10] Pranoto, Bayu, and Ahmad Firdaus. "Rancang Bangun Lengan Robot dengan Sistem Kontrol Otomatis dan Human Machine Interface untuk Mesin Operasional Industri Manufaktur." *Jurnal Energi dan Teknologi Manufaktur (JETM)* 4.01 (2021): 13-16.
- [11] Marwinsyah, Rizky, et al. "Rancang Bangun Arm Robot Sebagai Pemindah Tabung Reaksi Sampel PCR pada Prototype Liquid Handling System." *Jurnal Rekayasa Mesin* 8.1 (2023): 90-95.
- [12] Abrianto, H. Heru, Kumala Sari, and Irmayani Irmayani. "Sistem Monitoring Dan Pengendalian Data Suhu Ruang Navigasi Jarak Jauh Menggunakan WEMOS D1 Mini." *Jurnal Nasional Komputasi dan Teknologi Informasi* 4.1 (2021): 38-49.
- [13] Berlianti, Rahmi, and Fibriyanti Fibriyanti. "Perancangan Alat Pengontrolan Beban Listrik Satu Fasa Jarak Jauh Menggunakan Aplikasi Blynk Berbasis Arduino Mega." *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri* 5.1 (2020): 17-26.
- [14] ALFI, RIZKY M., et al. "Perancangan Sistem Packing Beras Otomatis Menggunakan Arduino Uno." *Jurnal Teknik Industri* 9.2 (2021).
- [15] Prakarsa, Fadli Bima, and Edidas Edidas. "Rancang bangun alat sortir panen ikan lele berbasis Arduino Uno R3." *Jurnal Pendidikan Tambusai* 6.1 (2022): 1202-1218.
- [16] Nugraha, I. Defra, D. Putu, and M. Santika. "Pendekatan Geometri untuk Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot 4 Derajat Kebebasan." *J. Tek. Mesin ITI* 5.1 (2021): 1.

BIOGRAFI PENULIS



Aditya Putra Perdana Prasetyo

Penulis adalah lulusan magister di bidang Teknik Elektro dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya tahun 2015. Beliau bekerja sebagai dosen dan peneliti di Prodi Teknik Komputer, Universitas Sriwijaya dari tahun 2016. Minat penelitiannya mencakup *Industrial Internet of Things*, Robotika dan Kecerdasan Buatan.



Ikgang Rahmatullah

Penulis adalah alumni dari Program Studi D3-Teknik Komputer, Universitas Sriwijaya Tahun 2023. Sekarang bekerja sebagai engineer di Perusahaan Swasta. Minat penelitiannya di bidang Instrumentasi dan *Internet of Things*.



Kemahyanto Exaudi

Penulis adalah lulusan magister di bidang Teknik Elektro dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya tahun 2015. Beliau bekerja sebagai dosen dan peneliti di Prodi Teknik Komputer, Universitas Sriwijaya dari tahun 2016. Minat penelitiannya mencakup Elektronika, *Human Machine Interface* dan *Internet of Things*.



Rendyansyah

Penulis adalah lulusan magister di bidang Teknik Elektro dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya tahun 2015. Beliau bekerja sebagai dosen dan peneliti di Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sriwijaya dari tahun 2022. Minat penelitiannya mencakup Robotika dan Kecerdasan Buatan.