

RANCANG BANGUN ROBOT LENGAN 4-DOF PEMINDAH OBJEK OTOMATIS MENGUNAKAN METODE INVERSE KINEMATICS DAN YOLO

Nirwana Hamid Afif¹, Irfan Maulana^{*2}, Satyo Nuryadi³, Wira Fadlun⁴

^{1,2,3,4}Universitas Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta

Email: ¹nirwanahamidafif15@gmail.com, ²fandhz19@gmail.com, ³satyo.nuryadi@uty.ac.id,

⁴wira.fadlun@staff.uty.ac.id

^{*}Penulis Korespondensi

(Naskah masuk: 26 Desember 2024, diterima untuk diterbitkan: 30 Oktober 2025)

Abstrak

Kebutuhan akan otomasi robot lengan di berbagai industri menjadi alasan utama untuk pengembangan sistem robot lengan cerdas. Penggunaan robot lengan dalam dunia industri sangat mengandalkan akurasi posisi dalam pemindahan objek. Akurasi ini ditentukan oleh kemampuan sistem dalam menghitung konfigurasi sudut tiap sendi robot secara tepat, yang dapat dicapai melalui metode *inverse kinematics*. Selain itu, kemampuan dalam mengenali dan memilah objek secara otomatis menjadi hal yang penting, sehingga diperlukan integrasi dengan sistem pengolahan citra. Penelitian ini mengembangkan sistem robot lengan 4-DOF yang menggunakan metode *inverse kinematics* untuk pergerakan dan algoritma YOLO (*You Only Look Once*) sebagai pendeteksi objek secara real-time. Dataset citra terdiri dari 2128 citra yang dibagi menjadi 1706 citra pelatihan, 294 citra validasi, dan 128 citra pengujian. Dataset citra diperoleh melalui proses ekstraksi frame dari video yang diambil langsung dari atas (*top-view*) terhadap objek. Sistem ini terdiri dari kamera, Raspberry Pi, Arduino, dan robot lengan. Kamera menangkap area kerja, kemudian Raspberry Pi memproses citra dan mengirimkan data koordinat serta jenis objek ke Arduino untuk menghitung konfigurasi *inverse kinematics*. Robot lengan selanjutnya bergerak untuk mengambil dan memindahkan objek. Hasil pengujian menunjukkan bahwa deteksi objek mencapai tingkat kesesuaian 100% terhadap 4 kategori objek yang digunakan. Pada pengujian koordinat objek, hasil pengukuran kesalahan dalam ruang *Euclidean* 3 dimensi sebesar 0,77 cm. Penelitian ini menunjukkan kombinasi metode *inverse kinematics* dan algoritma YOLO dapat diterapkan secara efektif dalam robot lengan untuk memindahkan objek secara otomatis dengan tingkat akurasi yang baik.

Kata kunci: *robot lengan, inverse kinematics, you only look once, object detection, pengolahan citra.*

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A 4-DOF ROBOTIC ARM FOR AUTOMATIC OBJECT TRANSFER USING INVERSE KINEMATICS AND YOLO

Abstract

The need for automation of arm robots in various industries is the main reason for the development of intelligent arm robot systems. The use of arm robots in the industrial world relies heavily on positional accuracy in moving objects. This accuracy is determined by the system's ability to calculate the exact angular configuration of each robot joint, which can be achieved through the *inverse kinematics* method. In addition, the ability to recognize and sort objects automatically is important, so integration with image processing systems is needed. This research develops a 4-DOF robotic arm system that uses the *inverse kinematics* method for movement and the YOLO (*You Only Look Once*) algorithm for real-time object detection. The image dataset consists of 2128 images divided into 1706 training images, 294 validation images, and 128 testing images. The image dataset is obtained through the process of extracting frames from videos taken directly from the *top-view* of objects. The system consists of a camera, Raspberry Pi, Arduino, and robot arm. The camera captures the work area, then the Raspberry Pi processes the image and sends the coordinate data and object type to the Arduino to calculate the *inverse kinematics* configuration. The robot arm then moves to pick up and move the object. The test results show that object detection achieves a 100% match rate for the 4 object categories used. In the object coordinate test, the error measurement result in 3-dimensional *Euclidean* space is 0.77 cm. This research shows that the combination of *inverse kinematics* method and YOLO algorithm can be effectively applied in a robot arm to move objects automatically with a good level of accuracy.

Keywords: *arm-robot, inverse kinematics, you only look once, object detection, image processing.*

1. PENDAHULUAN

Salah satu penerapan sistem otomasi dalam dunia industri dan manufaktur adalah robot lengan (*arm robot* atau manipulator). Robot lengan adalah jenis robot yang berbentuk manipulator yang bekerja layaknya lengan manusia (Rendyansyah et al., 2022). Robot lengan telah mengambil peran penting dalam sektor industri saat ini, karena terbukti sangat membantu untuk efisiensi waktu dan tenaga serta optimalisasi produksi industri (Campilho and Silva, 2023).

Metode *inverse kinematics* adalah metode untuk menggerakkan lengan robot berdasarkan titik koordinat tujuan. Metode *Inverse Kinematics* (IK) adalah suatu pendekatan matematis dengan masukan berupa titik koordinat dan luaran berupa konfigurasi sudut dalam satuan derajat yang akan diterapkan pada sistem lengan robot (Dewi et al., 2020). IK dapat memberikan hasil luaran sudut yang lebih baik dan presisi daripada *forward kinematics* (FK) karena perbandingan sudut pandang FK yang lebih mengutamakan estimasi sudut untuk menentukan posisi koordinat ujung lengan daripada menghitung sudut berdasarkan posisi yang ditetapkan.

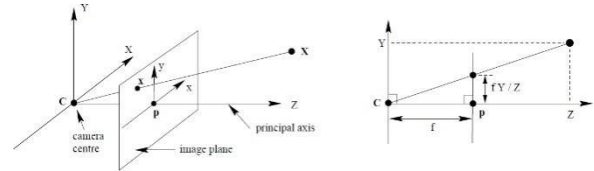
Dengan menerapkan teknik pengolahan citra digital, robot lengan tersebut akan mampu mengklasifikasikan sebuah produk. Salah satu algoritma yang dapat mendeteksi sebuah objek untuk klasifikasi adalah *you only look once* (YOLO) (Septyan Nu, Sofyan and Rafi Al Tahtawi, 2020). Algoritma ini banyak digunakan karena kecepatan dan akurasi nya yang tinggi. Sistem pendeteksian YOLO menggunakan teknik repurpose classifier atau localizer untuk mendeteksi objek. Sebuah model diterapkan pada sebuah citra di beberapa lokasi dan skala. Daerah dengan citra yang memiliki skor paling tinggi akan dianggap sebuah pendeteksian (Hidayatulloh, 2021).

Berdasarkan permasalahan kebutuhan akan adanya otomasi di berbagai perusahaan sektor industri dan perlunya metode sistem kendali robot lengan yang tepat, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk merancang prototype robot lengan yang dapat memindahkan objek sesuai dengan kategorinya. Penelitian ini akan berfokus pada rancangan robot lengan 4-DoF dengan menerapkan metode *inverse kinematics* untuk pergerakan robot dan metode *you only look once* untuk deteksi objek, dimana system bekerja dengan mendeteksi objek menggunakan YOLO dari kamera secara *real-time*. Titik tengah *bounding box* hasil deteksi digunakan untuk menghitung posisi koordinat objek. Informasi posisi koordinat objek kemudian digunakan sebagai input *inverse kinematics* untuk menghitung sudut-sudut motor servo sehingga robot lengan dapat memindahkan objek secara otomatis.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Kalibrasi Kamera

Kamera dapat mengubah gambar 3D (koordinat dunia) menjadi 2D (bidang gambar) dengan menghasilkan gambar 2D dari gambar nyata 3D. Salah satu model kamera adalah kamera pinhole, yang menghasilkan gambar perspektif dengan kamera sebagai pusat proyeksi (Zophie and Himawan Triharminto, 2023).



Gambar 1. Pinhole Kamera

- $Z = f = \text{focal plane atau image plane}$
- $C = \text{Pusat Proyeksi kamera}$
- $P = \text{Garis tegak lurus pusat kamera ke bidang gambar (image plane) = principal axis}$
- Titik pertemuan *principal axis* dan *image plane* disebut *principal point*.

Dapat dihitung bahwa titik di $(X, Y, Z)^T$ dipetakan ke $(\frac{fx}{z}, \frac{fy}{z}, f)^T$ sehingga diperoleh persamaan (1).

$$(X, Y, Z)^T \rightarrow \left(\frac{fx}{z}, \frac{fy}{z}, f \right)^T \quad (1)$$

Sehingga akan didapat sebuah matriks pada persamaan (2).

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

a. Kalibrasi Intrinsik

Kalibrasi intrinsik diperlukan untuk mengubah koordinat objek ke dalam koordinat kamera. Model kamera *pinhole* menjelaskan bagaimana gambar terbentuk dengan prinsip kamera (Novia Anggraini, 2021). Di mana pusat proyeksi adalah koordinat asli kamera (x_0, y_0, z_0) . Dimana sumbu z tegak lurus dengan bidang gambar. Sudut euler ω, ϕ, k dirotasikan pada tiga sudut x, y , dan z untuk merotasi titik pada gambar. Rotasi pertama terjadi pada x -axis, rotasi kedua terjadi pada y -axis, dan rotasi terakhir terjadi pada z -axis (Eko et al., 2012). Untuk mendapatkan titik P koordinat (X_i, Y_i, Z_i) dalam koordinat gambar, pertama-tama kita harus mengubah titik tersebut menjadi koordinat kamera (X_i, Y_i, Z_i) . Transformasi ini terdiri dari transformasi dan rotasi (Alauddin and Rosadi, 2023), jika diformasikan dalam matriks dapat dilihat pada persamaan (3).

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Dimana :

$$m_{11} = \cos\varphi \cos K$$

$$m_{21} = \cos\varphi \sin K$$

$$m_{31} = -\sin\varphi$$

$$m_{12} = \sin\omega \sin\varphi \cos K - \cos\omega \sin K$$

$$m_{22} = \sin\omega \sin\varphi \sin K + \cos\omega \cos K$$

$$m_{32} = \sin\omega \cos\varphi$$

$$m_{13} = \cos\omega \sin\varphi \cos K + \sin\omega \sin K$$

$$m_{23} = \cos\omega \sin\varphi \sin K - \sin\omega \cos K$$

$$m_{33} = \cos\omega \cos\varphi$$

Dalam intrinsik kamera terdapat *focal length* (f), faktor skala (s_u), dan pusat gambar (u_0, v_0) atau *principal point*. Koefisien koordinat (D_u, D_v) dalam bidang gambar diubah menjadi pixel. Dari frame kamera, nilai ini biasanya berbeda karena panjang fokus (f) dan faktor skala (s_u) masih ada. Dengan menggunakan *pinhole* untuk proyeksi titik (x_i, y_i, z_i) pada gambar didapat dengan persamaan (4).

$${}_R \begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix} = \frac{f}{z_i} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

Koordinat gambar (u_i, v_i) dalam *pixel* diperoleh dari proyeksi ($\tilde{u}_i, \tilde{v}_i$) dengan menerapkan transformasi seperti pada persamaan (5).

$${}_R \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_u & s_u \\ D_v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_i \\ \tilde{v}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

Model ini menghubungkan objek dengan koordinat gambar melalui persamaan matematis. Hasil yang diperoleh selama kalibrasi internal kamera adalah nilai matriks K, seperti yang terlihat pada persamaan (6).

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

b. Kalibrasi Ekstrinsik

Kalibrasi ekstrinsik diperlukan untuk mengetahui posisi relatif kamera terhadap koordinat dunia. Kalibrasi parameter ekstrinsik menghasilkan sebuah matriks yang terdiri dari matriks rotasi (R) dan matriks translasi (T) (Azmi, Defit and Sumijan, 2023). Persamaan matriks rotasi (R) dan matriks translasi (T) dapat dilihat pada persamaan (7) dan (8).

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Menurut (Adityo et al., 2012), matriks rotasi merupakan gabungan dari rotasi terhadap sumbu X,

Y, dan Z yang masing-masing berotasi dengan sudut (ψ, θ, φ) sehingga menghasilkan persamaan (9).

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dimana :

R = matriks parameter rotasi

$r_{11}, \dots, r_{33}, \dots$ = elemen matriks R

T = matriks parameter translasi

x_0, y_0, z_0 = koordinat dalam bidang gambar

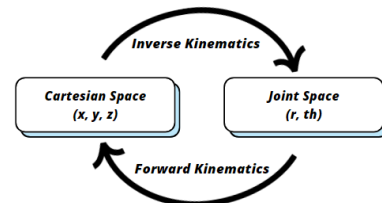
2.2 You Only Look Once

You Only Look Once (YOLO) adalah algoritma pendeteksian yang banyak digunakan di bidang industri karena karakteristiknya yang *real-time* dan presisi tinggi (Kang et al., 2025). Sistem deteksi yang digunakan *repurpose classifier* atau *localizer* untuk melakukan deteksi. Model ini diterapkan pada gambar di beberapa lokasi dan skala. Daerah dengan citra yang memperoleh skor tinggi dianggap sebuah pendeteksian (Jupiyandi Saniputra, Pratama and Yoga Dharmawan, 2019).

YOLO menggunakan pendekatan jaringan syaraf tiruan (JST) untuk mengenali objek dalam gambar. Jaringan ini membagi gambar menjadi beberapa wilayah dan memprediksi setiap kotak pembatas serta probabilitas untuk setiap wilayah. Kotak pembatas ini kemudian dibandingkan dengan setiap probabilitas yang diprediksi. YOLO memiliki beberapa keunggulan dibandingkan sistem yang berorientasi pada *classifier* (Fadhlurrahman, 2021).

2.3 Inverse Kinematics

Salah satu hal yang menjadi fokus utama sekaligus tantangan dalam perancangan robot lengan adalah menyelesaikan model *inverse kinematics* (Calzada-Garcia et al., 2025). *Inverse Kinematics* (IK) adalah metode untuk menentukan nilai dari sudut joint berdasarkan input posisi dan orientasi *end effector* relatif serta semua nilai geometri parameter lengan (Widyacandra, Al Tahtawi and Martin, 2022). Gambaran umum perbedaan *forward kinematics* dan *inverse kinematics* seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbedaan FK dan IK

Forward Kinematics akan mengalkulasi koordinat akhir berdasarkan kombinasi *joint* yang

diberikan, sedangkan *inverse kinematics* akan mengalkulasi kombinasi sudut *joint* untuk mendapatkan koordinat *end effector* berdasarkan posisi inputnya.

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan model *inverse kinematics*. Diantara metode tersebut adalah *close-form solutions* yang meliputi metode aljabar dan geometri, serta *numerical methods* yang meliputi metode eliminasi, *continuation methods*, dan metode iterasi. Metode paling umum yang dapat digunakan dalam analisis *inverse kinematics* adalah metode analitik geometri. Metode analitik geometri dilakukan dengan menganalisa struktur lengan robot yang berupa bentuk bidang, panjang lengan, dan ruang lingkup kerja robot lengan untuk menghasilkan kombinasi sudut setiap *joint* agar menghasilkan output yang sesuai (Fajar Wirayudha and Wahyu Wiriasto, 2024).

Metode analitik geometri juga sering disebut sebagai metode numerik secara umum karena meliputi proses analitik numerik terhadap parameter-parameter fisik robot lengan (Andrieiev et al., 2025).

3. PERANCANGAN SISTEM

3.1 Perancangan Mekanik Robot Lengan

Rancangan elektronik dilakukan dengan *software AutoCAD* 3D CAD dengan hasil seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Rancangan Mekanik

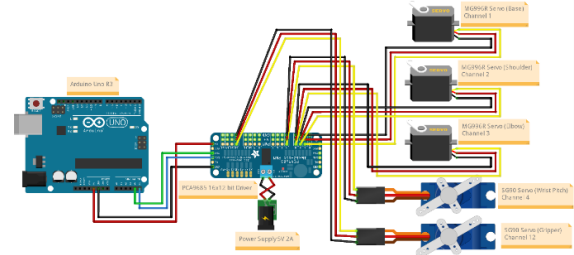
Robot lengan 4-DoF terdiri dari beberapa bagian yang kemudian disusun menjadi satu bagian utuh dan dapat digerakkan oleh aktuator berupa motor servo.

3.2 Perancangan Elektronika Robot Lengan

Rancangan elektronik dilakukan dengan *software Fritzing* dengan hasil seperti pada Gambar 4.

Output yang langsung terhubung dengan *microcontroller* Arduino uno R3 adalah PCA9685 *Driver*. PCA9685 *driver* terhubung dengan Arduino uno R3 menggunakan komunikasi *Integrated Circuit* (I2C) dengan pin SCL pada pin A5 dan SDA pada pin A4. Input *power supply* maksimum yang dapat diterima *driver* adalah 6V, dan pada rangkaian ini

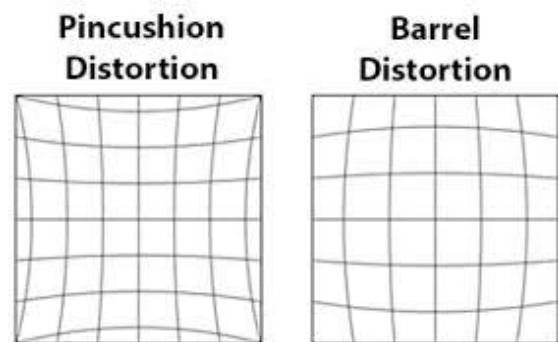
digunakan input tegangan 5V 2A. Pin dengan alamat 1 digunakan untuk servo MG996R (*Base*), alamat 2 untuk servo MG996R (*Shoulder*), alamat 3 untuk servo MG996R (*Elbow*), alamat 4 untuk servo SG90 (*Wrist Pitch*) dan alamat 12 untuk servo SG90 (*Gripper*).



Gambar 4. Rancangan Elektronik

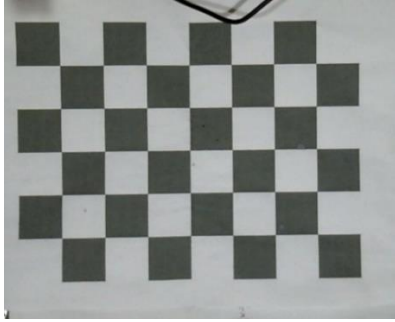
3.3 Kalibrasi Kamera

Kamera merupakan salah satu bagian penting dalam penelitian ini. Kamera modern di pasaran menawarkan teknologi yang bagus dengan harga terjangkau dan mudah ditemukan (Joko Setiyono, 2019). Namun, kamera yang diproduksi secara massal memiliki kekurangan seperti cacat produksi dan tingkat akurasi yang rendah. Oleh karena itu, kalibrasi diperlukan untuk memastikan gambar atau video yang diambil memiliki tingkat akurasi yang baik. Kamera sendiri memiliki dua jenis distorsi yaitu *barrel distortion* dan *pincushion distortion* (Andika, 2019) seperti pada gambar 5.

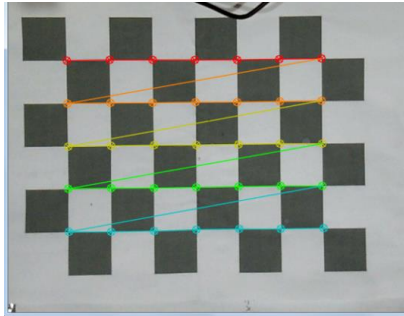


Gambar 5 Jenis Distorsi Kamera

Untuk mengatasi distorsi pada kamera, dilakukan terlebih dahulu pembuatan program kalibrasi kamera. Program ini sudah tersedia pada library *OpenCV*. Kalibrasi kamera dengan *OpenCV* memerlukan citra papan catur atau citra dot untuk kalibrasi (Afrisal, Soesanti and Cahyadi, 2019) seperti yang ditunjukkan pada gambar 6. Papan catur dicetak pada ukuran kertas A4 dan harus dengan kualitas yang baik agar kalibrasi juga lebih baik. Kalibrasi dilakukan dengan mengambil beberapa sampel gambar pada papan catur dengan posisi yang berbeda untuk memaksimalkan hasil kalibrasi untuk semua posisi objek. Proses kalibrasi menggunakan library *OpenCV* dapat dilihat pada gambar 7.



Gambar 6. Citra Papan Catur

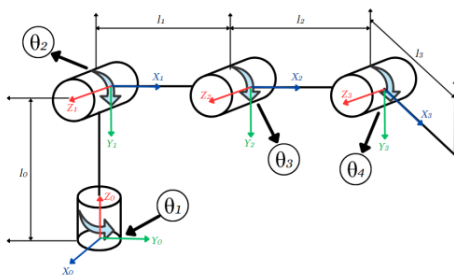


Gambar 7. Proses Kalibrasi

Hasil dari proses kalibrasi berupa matriks kamera yang berisi nilai *focal length* untuk acuan jarak dari titik fokus (lensa) ke bidang gambar, *rotation vector* (rvec) untuk mengetahui bagaimana dan orientasi sumbu kamera berubah terhadap sumbu dunia, *translation vector* (tvec) untuk menyatakan posisi dari pusat kamera dalam koordinat dunia, sistem koordinat 2D untuk mempresentasikan titik-titik dalam gambar 2D dan koefisien distorsi pada kamera.

3.4 Analisis Inverse Kinematics

Dalam rancangan robot lengan 4-DoF maka dapat ditentukan parameter *Denavit-Hartenberg* terlebih dahulu. Parameter *Denavit-Hartenberg* (D-H) adalah metode yang digunakan dalam kinematika robot untuk memodelkan hubungan antara sambungan (*joint*) dan segmen (*link*) dari robot lengan (Sampul and Haryanto, 2023). Metode ini mereduksi kompleksitas perhitungan transformasi koordinat antara sambungan dengan menggunakan empat parameter untuk setiap pasangan sambungan-segmen. Parameter D-H pada rancangan penelitian robot lengan 4-DoF ini disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Pemetaan Rotasi dan Translasi

Berdasarkan pemetaan rotasi *joint* robot lengan 4-DoF tersebut, maka nilai setiap parameter disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Tabel Parameter Denavit-Hartenberg

i	a (cm)	α (deg)	θ_i (deg)	d_i (cm)
0	$a_{0,1} = 0$	$\alpha_{0,1} = -\frac{\pi}{2}$	$\theta_{0,1} = \theta_1$	$d_{0,1} = l_0$
1	$a_{1,2} = l_1$	$\alpha_{1,2} = 0$	$\theta_{1,2} = \theta_2$	$d_{1,2} = 0$
2	$a_{2,3} = l_2$	$\alpha_{2,3} = 0$	$\theta_{2,3} = \theta_3$	$d_{2,3} = 0$
3	$a_{3,4} = 0$	$\alpha_{3,4} = \frac{\pi}{2}$	$\theta_{3,4} = \theta_4$	$d_{3,4} = 0$

Dengan :

$a_{i,i+1}$ = Jarak sepanjang x_{i+1} diukur dari z_i hingga z_{i+1}

$\alpha_{i,i+1}$ = Sudut dari z_i ke z_{i+1} (ditinjau dari x_{i+1})

$\theta_{i,i+1}$ = Sudut dari x_i ke x_{i+1} (ditinjau dari z_i)

$d_{i,i+1}$ = Jarak sepanjang z_i diukur dari x_i hingga x_{i+1}

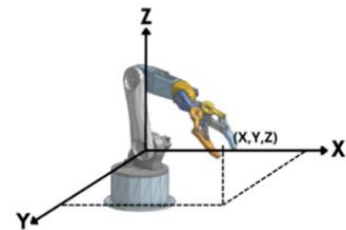
Berdasarkan nilai ke-empat parameter D-H tersebut, maka matriks transformasi homogen untuk gerakan rotasi dan translasi yang dibentuk sesuai Persamaan 10 dan 11.

$$T_i^{i-1} = Trans(a_i) \times Rot(\alpha_i) \times Rot(\theta_i) \times Trans(d_i) \quad (10)$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

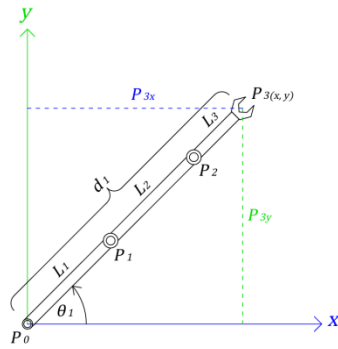
Setelah didapatkan parameter D-H dan matriks transformasi, maka analisis *inverse kinematics* dimulai dengan mengamati parameter fisik dari robot lengan yang bersifat konstan.

Parameter ini meliputi nilai pengukuran fisik robot lengan dan kesepakatan orientasi koordinat kartesius robot lengan. Gambar 9 menunjukkan orientasi koordinat kartesius yang akan digunakan untuk analisis.



Gambar 9. Koordinat Kartesius Robot Lengan

Titik pusat $P_{0(0, 0, 0)}$ berada tepat sejajar dengan *joint* 1 robot lengan. Dengan memanfaatkan nilai koordinat akhir $P_{3(x, y, z)}$, maka dapat ditentukan besar sudut θ_1 terhadap sumbu z (z -axis) seperti pada Gambar 10.

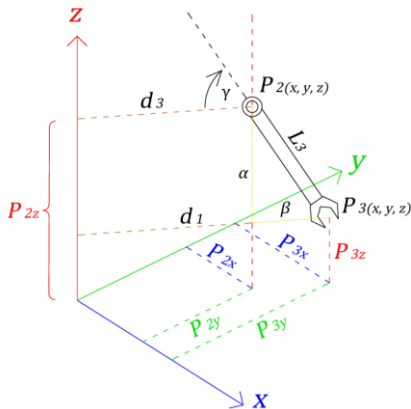


Gambar 10. Skema Koordinat P3(x, y)

Dari gambar 10 dapat ditentukan panjang d_1 dan besar sudut θ_1 pada Persamaan (12).

$$\tan(\theta_1) = \frac{P_{3y}}{P_{3x}}, \text{ maka } \theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_{3y}}{P_{3x}}\right) \quad (12)$$

Setelah sudut pertama didapatkan dengan analisis sumbu x dan y , maka dapat dilanjutkan dengan analisis sumbu x , y dan z . Pada tahap ini, ada tiga lengan yang harus dikonfigurasi terhadap titik akhir $P_{3(x, y, z)}$, dimana ketiga lengan tidak akan membentuk bangun segitiga sehingga akan sulit diterapkan metode geometri. Langkah yang dapat dilakukan adalah dengan memberikan aturan bahwa lengan ketiga (L_3) akan membentuk sudut (γ) yang bernilai konstan seperti pada Gambar 11.



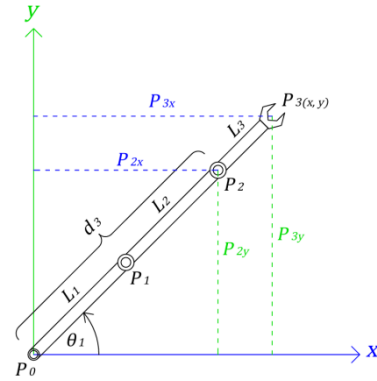
Gambar 11. Skema Lengan 3 Robot Lengan

Dengan sudut γ yang konstan maka dapat ditentukan panjang sisi α dan β . Kemudian, dapat ditentukan koordinat posisi d_3 dan P_{2z} seperti Persamaan (13) dan (14).

$$d_3 = d_1 - L_3 \cos(\gamma) \quad (13)$$

$$P_{2z} = P_{3z} + L_3 \sin(\gamma) \quad (14)$$

Sedangkan, untuk koordinat posisi P_{2x} dan P_{2y} dapat ditentukan dengan analisis koordinat x dan y seperti pada Gambar 12.



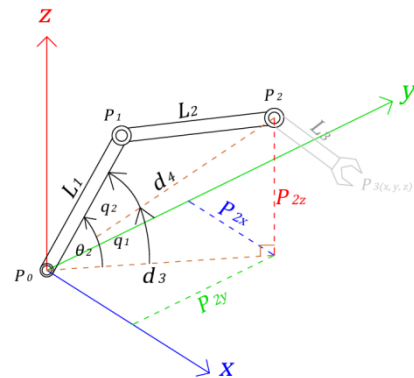
Gambar 12. Skema Koordinat P2(x, y)

Dengan aturan tangen maka didapatkan panjang P_{2y} P_{2x} dengan Persamaan (15) dan (16).

$$P_{2y} = d_3 \sin(\theta_1) \quad (15)$$

$$P_{2x} = \frac{P_{2y}}{\tan(\theta_1)} \quad (16)$$

Menggunakan nilai $P_{2(x, y, z)}$ maka dapat ditentukan besar sudut untuk setiap *joint*. *Joint* pertama dengan besar sudut θ_2 dapat diperhatikan pada Gambar 13.



Gambar 13. Skema Sudut Joint 1

Pada 13 dapat ditentukan panjang d_4 seperti pada Persamaan 25.

$$d_4 = \sqrt{d_3^2 + P_{2z}^2} \quad (17)$$

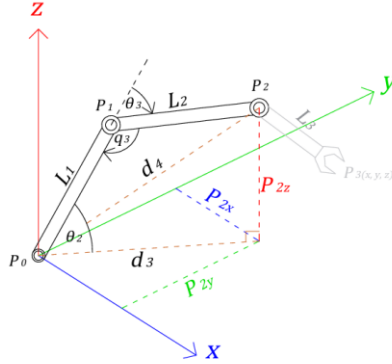
Sudut θ_2 terdiri dari dua komponen sudut yaitu q_1 dan q_2 yang masing-masing nilainya ditentukan pada Persamaan (18), (19) dan (20).

$$\tan(q_1) = \frac{P_{2z}}{d_3}, \text{ maka } q_1 = \tan^{-1}\left(\frac{P_{2z}}{d_3}\right) \quad (18)$$

$$q_2 = \cos^{-1}\left(\frac{d_3^2 + P_{2z}^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{d_3^2 + P_{2z}^2}}\right) \quad (19)$$

$$\theta_2 = q_1 + q_2 \quad (20)$$

Sudut θ_3 dapat ditentukan dengan menentukan besar sudut q_3 seperti pada Gambar 14.



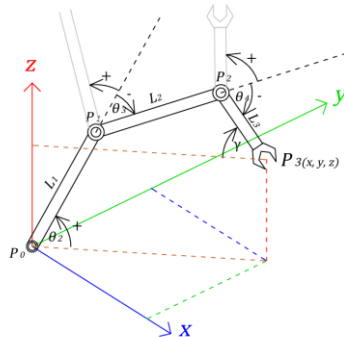
Gambar 14. Skema Sudut Joint 2

Sudut θ_3 dan q_3 masing-masing ditentukan pada Persamaan (21) dan (22).

$$q_3 = \cos^{-1} \left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - (d_3^2 + P_{2z}^2)}{2L_1L_2} \right) \quad (21)$$

$$\theta_3 = \pi - q_3 \quad (22)$$

Untuk sudut pada joint terakhir yaitu θ_4 dapat ditentukan dengan mengakumulasi total sudut yang dibentuk oleh joint 1 dan joint 2 seperti pada Gambar 5.



Gambar 15. Skema Sudut Joint 3

Maka sudut θ_4 dapat ditentukan dengan Persamaan (23).

$$\theta_4 = \gamma + (\theta_2 - \theta_3) \quad (23)$$

Adapun nilai parameter lengan robot L_1 , L_2 dan L_3 yang masing-masing sepanjang 120 mm.

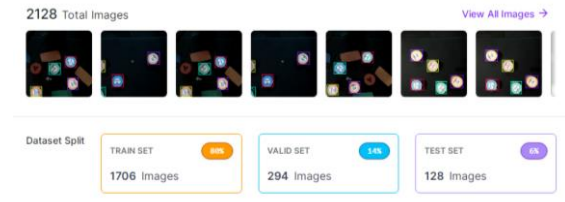
3.5 Pengumpulan, Pelabelan, dan Pelatihan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan mengambil gambar produk menggunakan kamera digital dalam kondisi pencahayaan terang untuk menjaga kualitas citra. Kamera diletakkan secara tegak lurus dari atas (*top-view*), sejajar dengan bidang kerja robot, sehingga seluruh area objek terlihat jelas dari sudut atas. Jarak antara kamera dan objek disesuaikan sekitar 40cm agar seluruh area objek terdeteksi

optimal oleh system deteksi YOLO. Total 2128 gambar dikumpulkan berdasarkan kejernihan dan kejelasan objek.

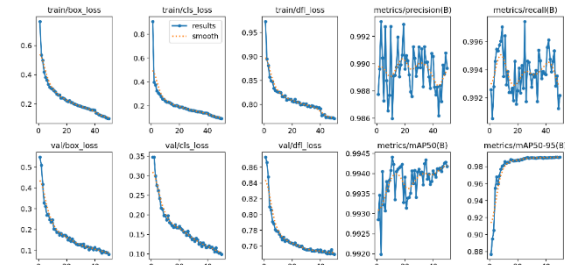
Setelah citra dikumpulkan, pelabelan objek dilakukan menggunakan platform Roboflow. Setiap citra dianotasi secara manual dengan memberikan bounding box pada area objek yang terdeteksi, kemudian diberi label kelas sesuai kategorinya. Empat kategori objek yang digunakan adalah gayo, kalossi, kintamani, dan wamena.

Dataset kemudian dikonfigurasi menjadi tiga bagian: 1706 citra untuk pelatihan, 294 citra untuk validasi, dan 128 citra untuk pengujian. Proporsi ini mengikuti praktik umum dalam deep learning untuk menjaga *generalisasi* model dan menghindari *overfitting*.



Gambar 16. Skema Sudut Joint 3

Pelatihan model dilakukan menggunakan *Google Colaboratory* dengan dukungan GPU. Proses pelatihan menggunakan model YOLOv8 dengan parameter pelatihan seperti jumlah *epoch*, ukuran gambar, dan file konfigurasi dataset. Selama pelatihan, model menunjukkan nilai *precision* dan *recall* yang konsisten di atas 0.98 dan 0.99.

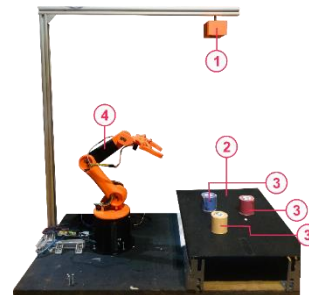


Gambar 17. Skema Sudut Joint 3

4. HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Purwarupa

Hasil purwarupa Rancang Bangun Robot Lengan 4-DOF Pemindah Objek Otomatis Menggunakan Metode *Inverse Kinematics* dan YOLO dapat dilihat pada gambar 17.



Gambar 17. Skema Sudut Joint 3

Tabel 2. Nama Komponen

No	Nama Komponen
1	Kamera
2	Area yang digunakan
3	Objek
4	Robot Lengan

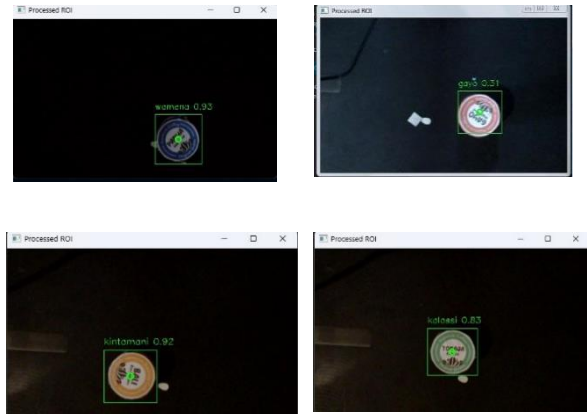
Gambar 17 di atas merupakan hasil model fisik dari penelitian yang telah diselesaikan berdasarkan rancangan mekanik dan elektronik.

4.2 Pengujian Deteksi Objek

Tabel 3. Hasil Pengujian Deteksi Objek

No	Objek	Hasil deteksi	Nilai Confidence	Keterangan
1	Gayo	Gayo	0.89	Sesuai
2	Gayo	Gayo	0.92	Sesuai
3	Gayo	Gayo	0.72	Sesuai
4	Gayo	Gayo	0.89	Sesuai
5	Gayo	Gayo	0.64	Sesuai
6	Kintamani	Kintamani	0.94	Sesuai
7	Kintamani	Kintamani	0.92	Sesuai
8	Kintamani	Kintamani	0.81	Sesuai
9	Kintamani	Kintamani	0.92	Sesuai
10	Kintamani	Kintamani	0.83	Sesuai
11	Kalossi	Kalossi	0.85	Sesuai
12	Kalossi	Kalossi	0.80	Sesuai
13	Kalossi	Kalossi	0.86	Sesuai
14	Kalossi	Kalossi	0.88	Sesuai
15	Kalossi	Kalossi	0.83	Sesuai
16	Wamena	Wamena	0.82	Sesuai
17	Wamena	Wamena	0.86	Sesuai
18	Wamena	Wamena	0.86	Sesuai
19	Wamena	Wamena	0.72	Sesuai
20	Wamena	Wamena	0.85	Sesuai
Total Nilai Confidence			17	
Rata-Rata Nilai Confidence			0.85	
Tingkat Kesesuaian (%)				100

Pengujian deteksi Pengujian deteksi objek dilakukan dengan menempatkan objek pada area yang digunakan secara bergantian sebanyak 20 kali dengan 5 kali setiap kategori objeknya pada posisi yang berbeda. Gambaran pengujian dapat dilihat pada gambar 18.



Gambar 18. Proses Pengujian Deteksi Objek

Data yang diambil pada pengujian deteksi objek berupa nilai *confidence* dengan rentang 0 - 1. Nilai *confidence* merupakan nilai yang menunjukkan tingkat keyakinan model terhadap prediksi keberadaan objek. Semakin dekat dengan nilai 1 semakin bagus sistem dapat mengenali suatu objek. Hasil pengujian deteksi objek dapat dilihat pada Tabel 3.

Dapat dilihat pada tabel 2 di atas, dengan rata-rata nilai *confidence* 0.85 dan tingkat kesesuaian deteksi mencapai 100%.

4.3 Pengujian Koordinat Objek

Pengujian koordinat objek bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan sistem deteksi objek dalam menentukan posisi (koordinat) objek pada sumbu *x* dan *y*. Pengujian koordinat objek dilakukan dengan menempatkan objek pada area yang tersedia kemudian mengambil koordinat sumbu *x* dan *y* objek dan membandingkannya dengan alat ukur mistar. Pengukuran dilakukan hingga didapatkan hasil yang signifikan dengan nilai *error* yang cukup kecil seperti yang terlihat pada gambar 19 Data hasil pengujian dapat data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 4.



Gambar 19. Proses Pengujian Koordinat objek

Tabel 4 merupakan hasil pengujian koordinat objek. Nilai selisih didapat dari membandingkan nilai koordinat yang dideteksi oleh sistem dengan nilai yang diukur oleh mistar atau nilai sebenarnya dalam centimeter (cm). Dalam ruang 3 dimensi,

maka selisih jarak antara *setpoint* dengan titik koordinat *end effector* sebenarnya dapat diukur dengan metode *Euclidean distance*. *Euclidean Distance* atau jarak *Euclidean* didefinisikan sebagai jarak antara dua titik dalam ruang *Euclidean*

berdimensi n (Sinaga and Pamungkas, 2020). Pada pengujian koordinat objek dapat ditentukan kesalahan atau selisih jarak *setpoint* dan jarak sebenarnya dalam ruang *Euclidean* 3 dimensi menggunakan Persamaan (24).

Tabel 4. Hasil Pengujian Koordinat Objek

Pengujian ke-	Koordinat Objek (cm)		Mistar (cm)		d (cm)
	X	Y	X	Y	
1	-9.4	26.1	-9	26	0.41
2	-6.2	22.9	-6	23	0.22
3	-5.8	29.3	-6	29	0.36
4	-9.4	32.9	-9	32	0.98
5	-5.8	32.6	-6	32	0.63
6	-9.7	22.8	-9	23	0.73
7	-5.9	26.1	-6	26	0.14
8	4.3	32.7	4	32	0.76
9	8	32.5	7	32	1.12
10	11.7	32.7	10	32	1.84
11	11.6	29.4	10	29	1.65
12	8.1	29.4	7	29	1.17
13	4.6	29	4	29	0.60
14	11.5	25.6	10	26	1.55
15	8.1	26.1	7	26	1.10
16	4.6	26.1	4	26	0.61
17	11.5	22.6	10	23	1.55
18	8	22.9	7	23	1.00
19	4.3	22.8	4	23	0.36
20	0	22.7	0	23	0.30
21	-0.1	26	0	26	0.10
22	0.2	29	0	29	0.20
23	0.1	23.4	0	23	0.41
Rata-rata					0,77

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2} \quad (24)$$

Dengan:

- d = Jarak *Euclidean* (cm)
- i = Jumlah titik
- n = Jumlah dimensi
- A_i = Koordinat titik semula/*setpoint* (cm)
- B_i = Koordinat titik kedua/terukur (cm)
- x_i = Koordinat titik terhadap x -axis (cm)
- y_i = Koordinat titik terhadap y -axis (cm)

Dari hasil pengujian titik koordinat didapatkan hasil pengukuran kesalahan dalam ruang *Euclidean* 3 dimensi (kolom d) sebesar 0,77 cm.

4.4 Pengujian Koordinat Robot Lengan

Pengujian koordinat robot lengan dilakukan dengan memberikan input koordinat *end effector* bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan robot lengan dalam menentukan posisi (koordinat) robot lengan sumbu x , y , dan z . Koordinat input tersebut akan menghasilkan kombinasi sudut setiap joint untuk menggerakkan masing-masing aktuator, sehingga *end effector* dapat berada pada posisi yang sesuai dengan koordinat input. Setelah *end effector* mencapai koordinat tujuan, maka posisi *end effector* diukur menggunakan mistar yang memiliki ketelitian 1 mm dengan peluang kesalahan pengukuran sebesar 1 mm. Data hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Koordinat Robot Lengan

Pengujian ke-	Koordinat Input (cm)			Koordinat Terukur (cm)			<i>d</i> (cm)
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	
1	0	20	0,3	0	21	0,3	1
2	0	25	0,3	0	25,5	0,3	0,5
3	0	30	0,3	0	29,5	0,4	0,51
4	5	20	0,3	5	20,8	0,3	0,8
5	5	25	0,3	4,8	25,2	0,3	0,283
6	5	30	0,3	5	30	0,3	0
7	10	20	0,3	9,8	20,9	0,3	0,922
8	10	25	0,3	9,5	25,3	0,3	0,583
9	10	30	0,3	9,7	29,9	0,3	0,316
10	15	20	0,3	15	20,2	0,3	0,2
11	15	25	0,3	15	25	0,4	0,1
12	20	20	0,3	19,8	20,1	0,3	0,224
13	20	25	0,3	19,5	24,4	0,3	0,781
14	-5	20	0,3	-5	21	0,3	1
15	-5	25	0,3	-4,8	25	0,3	0,2
16	-5	30	0,3	-5	30	0,3	0
17	-10	20	0,3	-9,8	20,5	0,3	0,539
18	-10	25	0,3	-9,5	25,3	0,4	0,592
19	-10	30	0,3	-9,7	30	0,3	0,3
20	-15	20	0,3	-15	21,1	0,3	1,1
21	-15	25	0,3	-15	25	0,3	0
22	-20	20	0,3	-19,8	19,8	0,3	0,283
23	-20	25	0,3	-19,5	24,4	0,3	0,781
Rata-rata							0,479

Dalam ruang 3 dimensi, maka selisih jarak antara *setpoint* dengan titik koordinat *end effector* sebenarnya dapat diukur dengan metode *Euclidean distance*. *Euclidean Distance* atau jarak *Euclidean* didefinisikan sebagai jarak antara dua titik dalam ruang *Euclidean* berdimensi *n* (Sinaga and Pamungkas, 2020). Pada pengujian titik koordinat dapat ditentukan kesalahan atau selisih jarak *setpoint* dan jarak sebenarnya dalam ruang *Euclidean* 3 dimensi menggunakan persamaan (25) dibawah ini.

$$d(x, y, z) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2} \quad (25)$$

$$d(x, y, z) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

d = Jarak *Euclidean* (cm)

Dengan:

- i* = Jumlah titik
- n* = Jumlah dimensi
- A_i* = Koordinat titik semula/*setpoint* (cm)
- B_i* = Koordinat titik kedua/terukur (cm)
- x_i* = Koordinat titik terhadap *x*-axis (cm)
- y_i* = Koordinat titik terhadap *y*-axis (cm)
- z_i* = Koordinat titik terhadap *z*-axis (cm)

Dari hasil pengujian titik koordinat didapatkan hasil pengukuran kesalahan dalam ruang *Euclidean* 3 dimensi (kolom *d*) sebesar 0,479 cm.

4.4. Pengujian Akhir Robot

Pengujian akhir robot bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan robot lengan dalam sumbu *x* dan *y*. Pengujian akhir robot dilakukan dengan membandingkan selisih hasil pembacaan koordinat dari sistem pengolahan citra dengan hasil pengukuran posisi *end-effector*. Hasil pengolahan citra akan diinputkan ke sistem lengan robot dan kemudian akan diukur posisi *end-effector* yang dibentuk. Data hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 merupakan hasil pengujian koordinat akhir robot. Dari hasil pengujian titik koordinat didapatkan hasil pengukuran kesalahan dalam ruang *Euclidean* 3 dimensi (kolom *d*) sebesar 0.69 cm.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem rancang bangun robot lengan 4-DOF pemindah objek otomatis menggunakan metode inverse kinematics dan algoritma YOLO telah berhasil diterapkan secara efektif. Sistem mampu mendeteksi objek dengan tingkat kesesuaian mencapai 100%, serta memiliki rata-rata nilai *confidence* 0,85, yang menunjukkan performa deteksi yang sangat baik. Pada pengujian koordinat objek, diperoleh rata-rata kesalahan dalam ruang *Euclidean* 3 dimensi sebesar 0,77 cm, sedangkan pada pengujian koordinat robot lengan tingkat kesalahan yang dihasilkan sebesar 0,479 cm, dan pada pengujian akhir robot sebesar

0,69 cm. Hasil ini menunjukkan tingkat akurasi sistem yang konsisten dan sesuai dengan hipotesis.

Keberhasilan integrasi antara metode *inverse kinematics* dan YOLO dalam sistem ini memperlihatkan potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut, khususnya dalam otomasi industri yang

memerlukan ketelitian tinggi dalam klasifikasi dan pemindahan objek. Selain itu, sistem ini memiliki keunggulan dalam hal responsivitas *real-time*, portabilitas, dan biaya implementasi yang relatif rendah karena menggunakan komponen open-source seperti Raspberry Pi dan Arduino.

Tabel 6. Hasil Pengujian Akhir Robot

Koordinat Kamera (cm)		Koordinat End-Effector (cm)		Selisih (cm)		d (cm)
x	y	x	y	x	y	
-9,4	26,1	-9,9	25,7	0,5	0,4	0,82
-6,2	22,9	-6,8	22,3	0,6	0,6	0,78
-5,8	29,3	-6,6	29,2	0,8	0,1	0,51
-9,4	32,9	-9,7	33,3	0,3	0,4	0,54
-5,8	32,6	-6,1	33,1	0,3	0,5	0,70
-9,7	22,8	-9,0	23,1	0,7	0,3	0,39
-5,9	26,1	-5,6	26,3	0,3	0,2	0,89
4,3	32,7	4,8	31,9	0,5	0,8	0,60
8,0	32,5	7,5	32,2	0,5	0,3	0,86
11,7	32,7	12,4	33,3	0,7	0,6	0,94
11,6	29,4	12,4	30,0	0,8	0,6	0,69
8,1	29,4	8,4	30,0	0,3	0,6	1,01
4,6	29,0	5,3	29,7	0,7	0,7	0,75
11,5	25,6	10,9	26,0	0,6	0,4	0,14
8,1	26,1	8,1	26,2	0,0	0,1	1,23
4,6	26,1	3,8	25,1	0,8	1,0	0,67
11,5	22,6	11,4	21,9	0,1	0,7	0,39
8,0	22,9	8,2	22,5	0,2	0,4	0,88
4,3	22,8	5,0	23,3	0,7	0,5	0,24
0,0	22,7	0,0	22,5	0,0	0,2	0,26
-0,1	26,0	0,0	25,8	0,1	0,2	0,71
0,2	29,0	0,2	28,3	0,0	0,7	0,13
0,1	23,4	0,0	23,5	0,1	0,1	0,59
Rata-rata						0,69

DAFTAR PUSTAKA

- ADITYO, R.D., YUNIARNO, E.M., PURNAMA, I.K.E. AND PURNOMO, M.H., 2012. Kalibrasi Parameter Kamera Dengan Proyeksi Patern Menggunakan Projector Pada Proses Rekonstruksi 3D Berbasis Structured Light. *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi Terapan (Semantik 2012)*, 2012(Semantik), pp.194–200.
- AFRISAL, H., SOESANTI, I. AND CAHYADI, A.I., 2019. Estimasi Posisi Dengan Menggunakan Kamera Monokular. *digilib.unila.ac.id*, 21(1), p.1. <https://doi.org/10.14710/transmisi.21.1.1-9>.
- ALAUDDIN, A.F. AND ROSADI, A., 2023. Penerapan Algoritma Yolo Untuk Mendeteksi Ketersediaan Lahan Parkir Di Umsurabaya. *SEMASTER: Seminar Nasional Teknologi Informasi & Ilmu Komputer*, 2(1), pp.387–391.
- ANDIKA, A.A., 2019. Analisis Pengaruh Intensitas cahaya terhadap Pemodelan Objek 3D Menggunakan Kamera Digital Single Lens Reflex (DSLR). *Sustainability (Switzerland)*, 11(1), pp.1–14.
- ANDRIEIEV, Y., BRESLAVSKY, D., SHABANOV, H., NAUMENKO, K. AND ALTENBACH, H., 2025. Solution to the Inverse Problem of the Angular Manipulator Kinematics with Six Degrees of Freedom. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/app15052840>.
- AZMI, K., DEFIT, S. AND SUMIJAN, S., 2023. Implementasi Convolutional Neural Network (CNN) Untuk Klasifikasi Batik Tanah Liat Sumatera Barat. *Jurnal Unitek*, 16(1), pp.28–40. <https://doi.org/10.52072/unitek.v16i1.504>.
- CALZADA-GARCIA, A., VICTORES, J.G., NARANJO-CAMPOS, F.J. AND BALAGUER, C., 2025. A Review on Inverse Kinematics, Control and Planning for Robotic Manipulators With and Without Obstacles via Deep Neural Networks.

- Algorithms*,
<https://doi.org/10.3390/a18010023>.
- CAMPILHO, R.D.S.G. AND SILVA, F.J.G., 2023. Industrial Process Improvement by Automation and Robotics. *Machines*, 11(11), pp.1–5. <https://doi.org/10.3390/machines11110111>.
- DEWI, T., NURMAINI, S., RISMA, P., OKTARINA, Y. AND RORIZ, M., 2020. Inverse kinematic analysis of 4 DOF pick and place arm robot manipulator using fuzzy logic controller. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 10(2), pp.1376–1386. <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i2.pp1376-1386>.
- EKO, F.P., MULYANTO, E., KETUT EDY PURNAMA, I. AND HERY PURNOMO, M., 2012. Kalibrasi Parameter Kamera Dengan Plate Calibration Pada 3D Laser Scanner. *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi*, 2012(Snati), pp.15–16.
- FADHLURRAHMAN, F., 2021. Livestream Pengenalan Penyakit Padi Menggunakan Algoritma Yolo Berbasis Raspberry. *Repository.Pnj.Ac.Id*, pp.33–34.
- FAJAR WIRAYUDHA, M. AND WAHYU WIRIASTO, G., 2024. Prototype Model 3D Robot Lengan dan Simulasi Kendali Pergerakan pada 4-DOF Berbasis Virtual Reality. 11(2), pp.159–166.
- HIDAYATULLOH, M.S., 2021. Sistem Pengenalan Wajah Menggunakan Metode Yolo (You Only Look Once). *Universitas Medika*, pp.i–43.
- JOKO SETIYONO, 2019. Pemanfaatan Kamera Digital. *Institutional Repository ISI Surakarta*, 4, pp.22–23.
- JUPIYANDI SANIPUTRA, PRATAMA, F.R. AND YOGA DHARMAWAN, 2019. PENGEMBANGAN DETEKSI CITRA MOBIL UNTUK MENGETAHUI JUMLAH TEMPAT PARKIR MENGGUNAKAN CUDA DAN MODIFIED YOLO. *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIIK)*, 6(4), pp.413–419. <https://doi.org/10.25126/jtiik.201961275>.
- KANG, S., HU, Z., LIU, L., ZHANG, K. AND CAO, Z., 2025. *Object Detection YOLO Algorithms and Their Industrial Applications: Overview and Comparative Analysis. Electronics (Switzerland)*, <https://doi.org/10.3390/electronics14061104>.
- NOVIA ANGGRAINI, S.P., 2021. *Kamera Lubang Jarum*. [online] OIF UMSU. Available at: <<https://oif.umsu.ac.id/2021/02/kamera-lubang-jarum-klj/>>.
- RENDYANSYAH, R., PRASETYO, A.P.P., EXAUDI, K., SEMBIRING, S., TARIGAN, B.A. AND AMARIA, M.A., 2022. Pergerakan Robot Lengan Pengambil Objek Dengan Sistem perekam Gerak Berbasis Komputer. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, 8(2), p.230. <https://doi.org/10.24036/jtev.v8i2.113147>.
- SAMPUL, H. AND HARYANTO, S., 2023. *Perancangan Model Kinematika Maju Robot Manipulator Menggunakan Metode Denavit-Hartenberg*.
- SEPTYAN NU, H., SOFYAN, Y. AND RAFI AL TAHTAWI, A., 2020. Pengendalian Robot Lengan Pemilah Benda Berdasarkan Bentuk Menggunakan Teknologi Computer Vision. *SEMNASTERA (Seminar Nasional Teknologi dan Riset Terapan)*, 2(0), pp.42–48.
- SINAGA, M.A.H.K. AND PAMUNGKAS, D.S., 2020. Invers Kinematik Robot Arm 4 Dof Menggunakan Sensor Leap Motion. *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-6 ISAS Publishing Series: Engineering and Science*, 6(1), pp.363–371.
- WIDYACANDRA, A., AL TAHTAWI, A.R. AND MARTIN, M., 2022. Forward and inverse kinematics modeling of 3-DoF AX-12A robotic manipulator. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, 2(2), pp.139–150. <https://doi.org/10.35313/jitel.v2.i2.2022.139-150>.
- ZOPHIE, J. AND HIMAWAN TRIHARMINTO, H., 2023. Implementasi Algoritma You Only Look Once (YOLO) menggunakan Web Camera untuk Mendeteksi Objek Statis dan Dinamis. *TNI Angkatan Udara*, 1(1). <https://doi.org/10.62828/jpb.v1i1.50>.