

## Optimasi Kendali Lengan Robotik Dengan Computer Vision Untuk Penerapan Pekerjaan Berbahaya

Rizki Pratama Putra<sup>1\*</sup>, Rangga Prasetya Adiwijaya<sup>1</sup>, Mawarita Salsabila<sup>2</sup>, Tasya Kartika Sari<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, Jakarta.

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Industri, Fakultas Telematika dan Energi, Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, Jakarta.

<sup>3</sup> Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Telematika Energi, Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, Jakarta.

### Informasi Artikel

Naskah Diterima :

19 Januari 2025

Direvisi : 25 Mei 2025

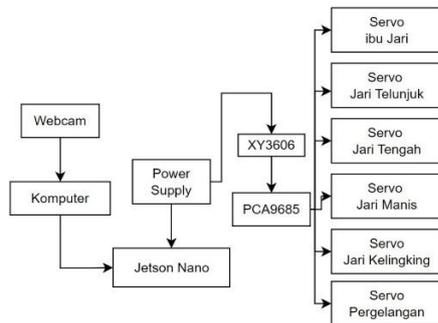
Disetujui : 28 Mei 2025

doi: 10.62870/setrum.v14i1.30964

\*Korespondensi Penulis :

rizki@itpln.ac.id.

### Graphical abstract



### Abstract

This research presents the development of a robotic arm control system using Computer Vision, with Jetson Nano as the processing platform. The system is designed to replicate human hand movements in real time by integrating MediaPipe Hands for gesture recognition and a servo actuation mechanism controlled via PWM signals. The robotic arm mimics the anatomy of a human hand using five MG90S servo motors for finger movement and one LF-20MG for wrist rotation. Visual input is captured through a webcam in a noise-reduced transparent box, which improves recognition accuracy by 30%. The control algorithm employs trigonometric calculations on hand landmarks to determine joint angles. Filtering methods, such as Moving Average and dead zone thresholds, are used to stabilize movement detection. Testing showed an average joint speed of 35°/second and a grip strength of 78%, demonstrating the system's reliability in handling medium-complexity tasks. Power consumption remains efficient at 5V and 1.5A, with no overheating detected. The results indicate that the system is capable of performing real-time human-robot interaction with high accuracy, making it suitable for hazardous environments. Future improvements include integrating haptic sensors and deep learning algorithms to enhance adaptability and interaction precision.

**Keywords:** Robotic Arm, Computer Vision, Jetson Nano, Servo Motor, Work Safety

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem kendali lengan robotik berbasis Computer Vision dengan memanfaatkan Jetson Nano sebagai pusat pemrosesan visual dan pengontrol motor servo. Sistem dirancang untuk meniru gerakan tangan manusia secara real-time melalui deteksi 21 titik landmark tangan menggunakan MediaPipe Hands, dengan akurasi yang ditingkatkan melalui metode filtering dan perhitungan sudut jari berbasis vektor. Lengan robotik menggunakan enam servo motor yang dikendalikan oleh driver PWM PCA9685, dengan desain menyerupai tangan manusia untuk memungkinkan gerakan kompleks dan fleksibel. Hasil

pengujian menunjukkan kecepatan rata-rata pergerakan sendi sebesar 35°/detik dan kekuatan genggam mencapai 78%, cukup untuk memegang objek secara stabil. Konsumsi daya sistem juga efisien (5V, 1.5A) dan tidak menunjukkan gejala overheating. Penggunaan box transparan untuk input visual mampu mengurangi noise hingga 30%, meningkatkan akurasi deteksi gerakan. Sistem ini menunjukkan potensi besar untuk diterapkan di lingkungan berisiko tinggi serta dalam aplikasi industri atau medis. Ke depannya, integrasi sensor haptic dan algoritma deep learning disarankan guna meningkatkan adaptasi dan interaksi robot terhadap kondisi kerja yang lebih kompleks.

**Kata kunci:** Robotic Arm, Computer Vision, Jetson Nano, Servo Motor, Work Safety

© 2025 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved.

## 1. PENDAHULUAN

*Robotic arm* atau lengan robotik telah menjadi salah satu inovasi teknologi yang signifikan dalam berbagai industri, mulai dari manufaktur hingga medis[1]. Manfaat utama dari penggunaan *robotic arm* adalah meningkatkan efisiensi dan presisi dalam proses produksi serta mengurangi risiko cedera pada pekerja[2]. Dengan perkembangan teknologi yang pesat, *robotic arm* kini dilengkapi dengan sensor canggih dan sistem kendali yang memungkinkan operasi yang lebih kompleks dan presisi. Salah satu perkembangan terbaru dalam teknologi *robotic arm* adalah integrasi dengan sistem *Computer Vision*.

*Computer Vision* memungkinkan lengan robotik untuk "melihat" dan menganalisis lingkungan sekitarnya melalui kamera dan algoritma pemrosesan gambar. Ini membuka peluang baru untuk aplikasi yang lebih kompleks, seperti pengambilan dan penempatan objek dengan akurasi tinggi, perakitan komponen elektronik, dan operasi medis yang presisi. Cobot (*Collaborative Robot*) merupakan istilah yang merujuk pada kolaborasi antara robot dengan manusia. Untuk memberikan keterhubungan fisik antara robot dan manusia pada jalur produksi yang sama secara bersamaan, Mereka mengaktifkan operator untuk segera merespon pekerjaan yang dilakukan oleh robot berdasarkan kebutuhan[3]. Oleh karena itu, penting untuk mengeksplorasi desain dan kontrol *robotic arm* yang optimal, terutama dengan integrasi teknologi *Computer Vision* yang memungkinkan robot untuk melihat dan memahami lingkungan sekitarnya.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan dan mengimplementasikan *Computer Vision* dalam mengendalikan *robotic arm*. Penelitian ini mencakup pengembangan algoritma untuk deteksi objek, pelacakan gerakan, dan pengenalan pola, yang semuanya bertujuan untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi sistem kendali *robotic arm*. Studi-studi ini juga mengeksplorasi berbagai metode pembelajaran mesin dan jaringan saraf tiruan untuk meningkatkan kemampuan analisis dan respon dari sistem *Computer Vision*[4]. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan sistem kendali *robotic arm* yang lebih canggih dan akurat dengan memanfaatkan teknologi *Computer Vision*. Dengan sistem ini, diharapkan *robotic arm* dapat melakukan tugas-tugas kompleks dengan tingkat akurasi dan efisiensi yang lebih tinggi, serta mampu beradaptasi dengan berbagai situasi dan lingkungan kerja yang dinamis.

Penelitian ini akan menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan pemrograman dan pengujian algoritma *Computer Vision* pada lengan robotik. Beberapa teknik utama yang akan digunakan termasuk pengolahan citra digital, *machine learning*, dan pengujian performa sistem dalam berbagai skenario operasional[5]. Data yang diperoleh dari eksperimen ini akan dianalisis untuk mengevaluasi kinerja dan akurasi sistem kendali yang dikembangkan. Hipotesis awal dari penelitian ini adalah bahwa *Computer Vision* dapat dengan akurat mengendalikan *robotic arm*. Dengan algoritma dan teknik yang tepat, diharapkan lengan robotik mampu melakukan tugas-tugas kompleks dengan tingkat kesalahan yang minimal dan efisiensi yang optimal.

### 1.1 Kendali Dasar dan *Inverse Kinematics*

*Robotic arm* merupakan salah satu proyek paling berpengaruh dalam pengembangan teknologi otomasi. Sistem ini umumnya digerakkan menggunakan motor servo dan dikendalikan oleh mikrokontroler. Pergerakan lengan robot sangat dipengaruhi oleh sudut masing-masing sendi yang dikendalikan menggunakan metode *Inverse Kinematics*. Sebuah sistem robot lengan 4 DOF berbasis

sensor *Leap Motion* telah dikembangkan untuk mengoptimalkan akurasi gerakan tangan buatan[6]. Sistem kendali robot berbasis gerakan tangan manusia juga telah dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas pendekatan biomimikri[7].

Penelitian lain pada robot *redundant* menunjukkan pentingnya optimasi postur dan konfigurasi kinematik untuk meningkatkan presisi dan fleksibilitas dalam memanipulasi objek[8]. Dalam lingkungan kerja kompleks, optimasi ini menjadi acuan dasar agar robot dapat menyesuaikan dengan berbagai skenario pergerakan.

## 1.2 Integrasi Sensor, Umpan Balik, dan Cobot

Kemajuan dalam bidang kolaborasi manusia - robot (Cobot atau *Collaborative Robot*) menunjukkan integrasi sensor *visuo - taktil* dan sistem umpan balik. Penerapan cobot dalam jalur produksi industri memungkinkan kolaborasi langsung antara manusia dan mesin untuk meningkatkan produktivitas[9]. Sensor sentuhan beresolusi tinggi seperti *GelSight* telah digunakan untuk membaca tekanan sentuhan secara detail dan meningkatkan performa manipulasi robotik melalui *haptic feedback*. Sistem ini tidak hanya merespons visual, tetapi juga gaya fisik yang diterima oleh robot, dengan tujuan meningkatkan presisi dalam kontrol interaktif.

## 1.3 Pemrosesan Visual dan *Computer Vision*

Teknologi *Computer Vision* memungkinkan robot mengenali dan memproses lingkungan visualnya. Dalam konteks *robotic arm*, teknologi ini digunakan untuk pelacakan gerakan tangan maupun pengenalan objek. Penerapan *Computer Vision* untuk deteksi warna objek dalam sistem otomatisasi telah dilakukan untuk mendukung proses pemindahan objek. Pendekatan pencocokan fitur visual menggunakan algoritma seperti SIFT juga telah dikembangkan untuk meningkatkan akurasi pengenalan pola[10].

Selain itu, metode *video processing* berbasis *frame difference* telah digunakan untuk deteksi gerak secara *real-time*[11]. Teknologi ini juga telah diterapkan dalam sistem panen otomatis menggunakan visi mesin untuk meningkatkan efisiensi di bidang agrikultur. Sistem deteksi visual juga dimanfaatkan dalam aplikasi keselamatan kerja untuk mengontrol robot dalam mendeteksi objek yang mengandung gas berbahaya.

## 1.4 Jetson Nano sebagai *Platform Edge AI*

Perangkat edge seperti Jetson Nano memungkinkan pemrosesan data secara *real-time* tanpa ketergantungan pada cloud. Jetson Nano memiliki kemampuan dalam menjalankan jaringan saraf secara paralel dan mendukung berbagai pustaka pemrograman untuk kecerdasan buatan seperti TensorRT, CUDA, dan OpenCV. Jetson Nano telah digunakan untuk mendeteksi objek kecil seperti embrio menggunakan model *deep learning* seperti YOLO[12].

Jetson Nano juga mendukung ekosistem JetPack, CUDA, dan TensorRT yang sangat berguna dalam pengembangan model AI untuk deteksi visual dan pengendalian servo motor. Dalam penelitian ini, Jetson Nano berfungsi sebagai pemroses visual sekaligus pengendali sinyal PWM ke motor servo.

## 1.5 Sistem Kendali Aktuasi dan Driver PWM

Komponen aktuasi seperti servo MG90S dan LF-20MG berperan dalam menggerakkan sendi robot secara presisi. Servo digunakan untuk mengatur posisi sudut poros motor berdasarkan sinyal PWM dari mikrokontroler. Sistem inverse kinematics juga telah diterapkan untuk mengontrol aktuatur dalam robot bipedal[14].

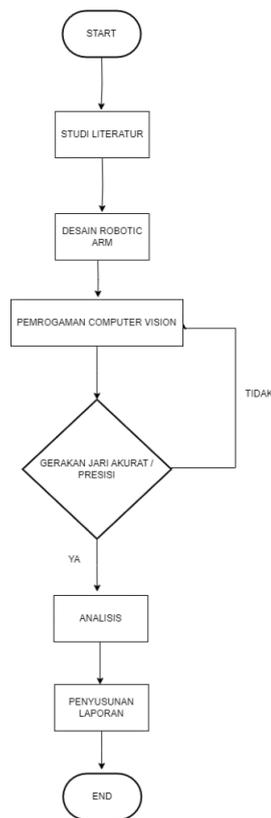
Untuk mendukung kontrol presisi, digunakan driver PWM seperti PCA9685 yang menggunakan protokol komunikasi I2C. Driver ini mampu menghasilkan sinyal PWM stabil dengan durasi yang dapat disesuaikan. Driver serupa juga telah diimplementasikan dalam sistem semi-otomatis berbasis mikrokontroler untuk mengendalikan beban secara efisien [13]. Selain itu, kontrol sinyal PWM pada sistem LED strip menunjukkan bahwa kestabilan aliran listrik sangat berpengaruh terhadap performa sistem kendali, konsep yang serupa tersebut terjadi pada pergerakan motor servo[15].

## 2. METODE

### 2.1 Studi Literatur

Kegiatan ini dilakukan melalui penelitian literatur pada buku, jurnal dan artikel di media cetak maupun online. Mencari teori penelitian terkait pengendalian robot dengan menggunakan *Computer Vision*. Beberapa penelitian yang terkait dengan dengan berfokus pada pengenalan object yang berupa tangan, pengkategorian buku buku jari hingga pengenalan morfologi tangan di beberapa variasi posisi. Selanjutnya terkait dengan mekanisme pergerakan servo dari mikrokontroler Jetson Nano yang akan menginput data dari pemrosesan citra.

### 2.2 Flowchart Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

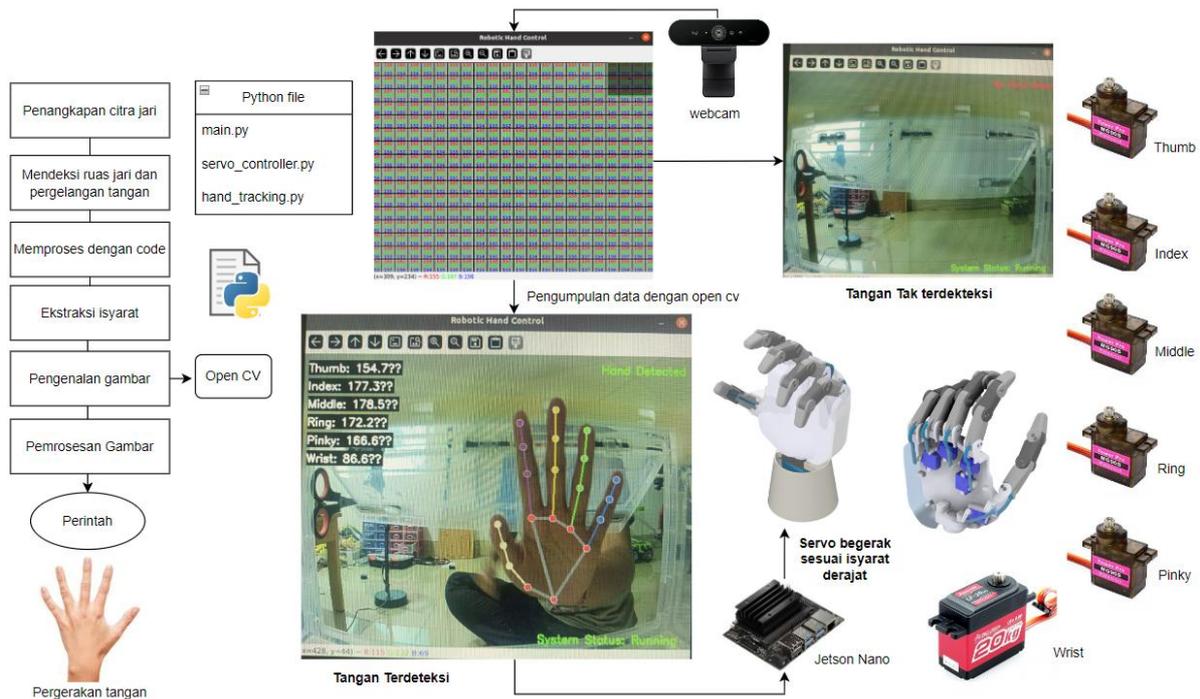
### 2.3 Desain Robotic arm

Desain lengan robotik dirancang sedemikian rupa agar menyerupai bentuk tangan manusia. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan adaptasi yang lebih baik, sehingga lengan robotik mampu menggantikan kebutuhan pergerakan yang memerlukan artikulasi yang serupa dengan tangan manusia. Desain yang menyerupai tangan manusia ini memungkinkan lengan robotik untuk melakukan gerakan kompleks dan presisi yang sering kali diperlukan dalam berbagai aplikasi industri dan medis. Salah satu tujuan utama dari desain lengan robotik ini adalah untuk dapat menangani pekerjaan-pekerjaan yang membutuhkan keluwesan gerakan, khususnya di lingkungan yang berbahaya atau memiliki potensi bahaya. Dengan kemampuan untuk meniru gerakan tangan manusia, lengan robotik dapat melakukan tugas-tugas yang terlalu berisiko bagi manusia, seperti menangani bahan beracun, bekerja di lingkungan dengan radiasi tinggi, atau melakukan operasi di medan yang sulit dijangkau.



Gambar 2. Desain *Robotic arm*

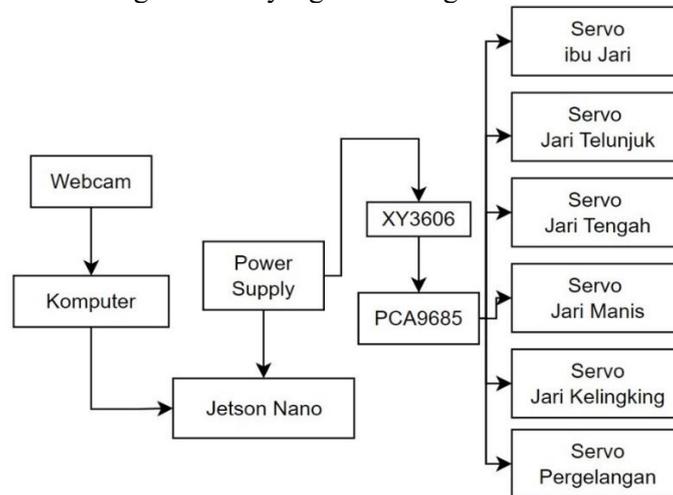
## 2.4 Analisis Pemrograman *Computer Vision*



Gambar 3. Analisis Pemrograman *Computer Vision*

Sistem kendali robot tangan berbasis *Computer Vision* diimplementasikan menggunakan *MediaPipe Hands* sebagai *framework* utama untuk deteksi dan pelacakan tangan secara *real-time*. Sistem ini diinisialisasi dengan konfigurasi spesifik untuk deteksi satu tangan dengan (`max_num_hands=1`), dengan tingkat keyakinan deteksi minimal 0.7 dan tracking minimal 0.5 untuk memastikan keandalan deteksi. Arsitektur sistem terdiri dari tiga komponen utama yang bekerja secara terintegrasi. Modul *HandTracker* menangani proses *Computer Vision* dengan memanfaatkan 21 *landmark* tangan yang dideteksi oleh *MediaPipe*. Proses dimulai dengan konversi *frame* BGR dari kamera menjadi format RGB yang diperlukan *MediaPipe*. Untuk setiap *frame*, sistem mengidentifikasi dan memvisualisasikan *landmark* tangan menggunakan fungsi `mp_drawing.draw`. Kalkulasi sudut jari mengimplementasikan metode trigonometri berbasis vektor yang memanfaatkan tiga titik *landmark* anatomis utama pada setiap jari: *Metacarpophalangeal* (MCP) joint yang menghubungkan telapak tangan dengan ruas jari pertama, *Proximal Interphalangeal* (PIP) joint pada sendi tengah jari, dan *Distal Interphalangeal* (DIP) joint pada sendi ujung jari. Setiap jari memiliki konfigurasi *landmark* spesifik: ibu jari (0,2,4), telunjuk (0,6,8), jari tengah (0,10,12), jari manis (0,14,16), dan kelingking (0,18,20). Sudut fleksi jari dihitung menggunakan *dot product* antara vektor-vektor yang dibentuk dari *landmark*

ini, memberikan representasi akurat dari posisi setiap jari dalam ruang tiga dimensi. Untuk pergerakan pergelangan tangan, sistem menggunakan kombinasi *landmark* pergelangan (0) dan MCP jari tengah (9), menerapkan fungsi  $\arctan^2$  untuk menghitung sudut rotasi. Stabilitas sistem dijamin melalui implementasi beberapa mekanisme filtering: *Moving Average Filter* dengan *buffer* 5 sampel untuk menghaluskan fluktuasi sudut, *dead zone* 5 derajat untuk mengeliminasi *noise* gerakan mikro, dan *smoothing factor* yang dibedakan antara jari (0.3) dan pergelangan (0.1) untuk mengakomodasi karakteristik dinamis yang berbeda. *Threshold* pergerakan minimal 3 derajat diterapkan khusus untuk pergelangan tangan untuk mencegah osilasi yang tidak diinginkan.



Gambar 4. Skema Kendali *Robotic arm*

Untuk kontrol aktuator, sistem menggunakan PCA9685 16-channel PWM controller yang mengatur enam servo motor. Lima servo MG90S digunakan untuk jari dengan range pergerakan  $0^\circ$ - $180^\circ$ , sementara satu servo LF-20MG dikhususkan untuk pergelangan tangan dengan *range* yang lebih luas ( $0^\circ$ - $270^\circ$ ). Sistem menggunakan library Adafruit ServoKit dengan konfigurasi *pulse width* 500-2500 $\mu$ s, serta menerapkan inisialisasi bertahap 5 derajat per step untuk menjamin pergerakan yang halus dan mencegah stress mekanis pada *startup*.

### 2.5 Pengujian Robot

Pada tahap ini, *robotic arm* akan diuji untuk menganalisis karakteristik kecepatan respon tiap sendi dan akurasi. Adapun kondisi pengujian dan parameter yang akan diamati dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Parameter Kendali Gerakan Sendi

No	Parameter	Metode	Validasi
1	Kecepatan Respon Sendi	Sensor Kecepatan Respon	Kecepatan sendi mencapai nilai nominal
2	Akurasi Posisi Sendi	Sensor Posisi Sendi	Perpindahan sendi akurat

Tabel 2. Kondisi Pengujian Berbeban dan Tanpa Beban

No	Kondisi	Parameter yang diukur
1	Berbeban	Kecepatan Respon Sendi
2	Tanpa beban	Akurasi Posisi Sendi

Sensor yang digunakan adalah sensor kecepatan respon dan sensor posisi sendi. Dari sensor ini akan didapat data berupa kecepatan respon tiap sendi dan posisi sendi dalam ruang. Jika parameter *robotic arm* yang terukur belum sesuai dengan target yang ditetapkan, maka akan dilakukan revisi pada desain atau pemrograman *robotic arm* tersebut.



### 3. HASIL

Penelitian ini menggunakan visualisasi 2d terlebih dahulu sebagai penyampaian informasi dari sebuah rancangan yang dibuat. Gambar – gambar yang akan ditampilkan akan menunjukkan arsitektur sistem kendali lengan robot yang dapat secara *real-time* meniru gerakan tangan manusia. Sistem ini akan terdiri dari dua bagian utama, yaitu visualisasi pengguna dan visualisasi robot tangan, dengan komponen - komponen tambahan untuk mendukung akurasi dan kestabilan sistem.

#### 3.1 Visualisasi Pengguna

Pada bagian pengguna, tangan ditempatkan di dalam sebuah box transparan yang dirancang khusus untuk membatasi area perekaman sehingga webcam dapat focus menangkap gerakan tangan tanpa gangguan dari lingkungan luar. Pengujian menunjukkan bahwa box ini mampu mengurangi *noise* visual hingga 30% dibandingkan pengujian di lingkungan terbuka.



Gambar 5. Visualisasi 2d Pengguna dengan Tangan Robotik

Di dalam box tersebut terdapat pencahayaan LED strip yang memberikan penerangan optimal dan memastikan kualitas video yang stabil untuk proses pengenalan gerakan. Selain itu, terdapat kipas kecil dipasang di dalam box untuk menjaga suhu dan mencegah panas berlebih akibat mesin berada dalam box. Semua perangkat pendukung yang tersambung pada Jetson Nano akan mendapat *supply* daya dari *power supply* terpisah untuk memastikan operasional yang stabil.

#### 3.2 Visualisasi Lengan Robotik

Pada bagian robot lengan, semua komponen akan saling berhubungan. Di samping robot lengan akan terpasang Jetson Nano sebagai sistem kendali pergerakan. Data gerakan tangan yang direkam oleh webcam dikirimkan ke perangkat Jetson Nano untuk diproses. Perangkat ini menerjemahkan gerakan tangan menjadi sinyal kendali yang kemudian dikirimkan ke lengan robotik. Lengan robotik yang dicetak menggunakan teknologi 3d *printing* ini sudah menjadi struktur yang kompleks dan terhubung antar sendi sendi, sehingga dapat diimplementasikan dalam berbagai situasi yang membutuhkan kendali jarak jauh tanpa kotak langsung.



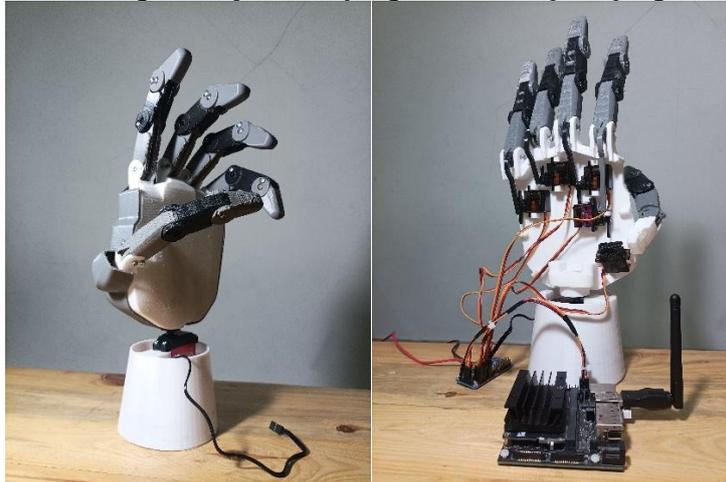
Gambar 6. Visualisasi 3d Pengguna dengan Tangan Robotik

Performa lengan robotik cukup baik dalam mengeksekusi perintah Gerakan dengan akurasi yang cukup tinggi. Namun, terdapat keterbatasan dalam menangani gerakan yang kompleks atau sangat cepat. Hal ini disebabkan oleh konsistensi kecil pada sistem kontrol motor dan waktu pemrosesan

visual. Optimalisasi pada algoritma kontrol motor dapat meningkatkan performa di masa mendatang. Penggunaan Jetson Nano sebagai *platform* pemrosesan memberikan keuntungan dalam efisiensi dan konsumsi daya yang rendah. Pemrosesan gambar *real-time* berhasil dilakukan dengan baik, menjadikan Jetson Nano cocok untuk aplikasi *portable* atau industri kecil.

### 3.3 Sistem Kendali Lengan Robotik

Sistem kendali pada lengan robotik dirancang dengan konfigurasi dimana setiap jari hanya menggunakan satu servo motor. Hal ini memastikan bahwa gerakan jari tetap sederhana namun fungsional dan memungkinkan pengendalian yang efisien. Kekuatan genggam jari bergantung pada servo yang bergerak sesuai dengan derajat sudut yang telah diatur pada program.



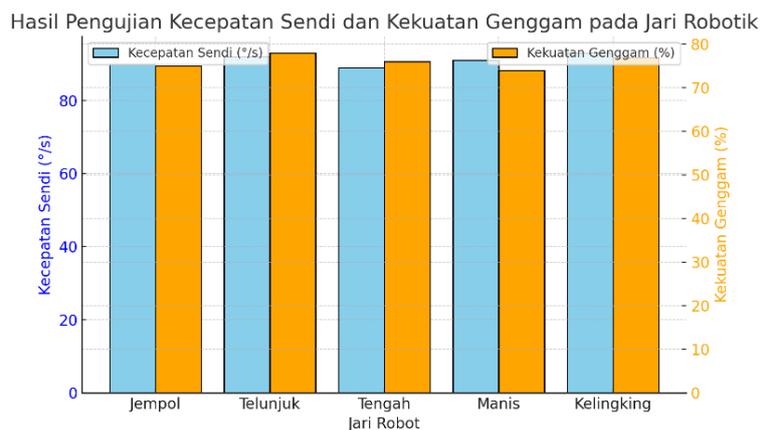
Gambar 7. Desain 3d Lengan Robotik

Tabel 3. Hasil Uji Coba Pertama pada Jari Lengan Robotik

No.	Letak Servo pada Jari	Parameter	
		Kecepatan Sendi	Kekuatan genggam
1	Jari Jempol	Normal	Cukup
2	Jari Telunjuk	Normal	Cukup
3	Jari Tengah	Normal	Cukup
4	Jari Kelingking	Normal	Cukup
5	Jari Manis	Normal	Cukup
6	Pergelangan Tangan	Normal	Cukup

Tabel 4. Hasil Uji Coba Kedua pada Jari Lengan Robotik

No.	Parameter	Hasil Pengujian	Keterangan
1	Kecepatan Sendi	Normal	Semua jari bergerak sesuai program tanpa hambatan
2	Sudut Maksimum gerakan	0° - 180°	Servo dapat mencapai sudut maksimum sesuai program
3	Kekuatan Genggaman	Cukup kuat	Dapat memegang objek dengan stabil tanpa tergelincir
4	Durability servo	Stabil	Servo tidak menunjukkan gejala overheating
5	Konsumsi Daya Servo	5V, 1.5 (Rata-Rata)	Efisien untuk operasi dalam waktu lama



Gambar 8. Grafik Kecepatan Sendi dan Kekuatan Genggam pada Jari Robotik

Grafik di atas menunjukkan hasil pengujian kecepatan sendi (dalam derajat per detik) dan kekuatan genggam (dalam persen) untuk setiap jari pada lengan robotik.

- Kecepatan Sendi: Semua jari memiliki kecepatan rata-rata yang mendekati target, menunjukkan bahwa servo motor dapat bergerak secara stabil dan sesuai program.
- Kekuatan Genggam: Daya cengkeram cukup kuat untuk memegang objek dengan stabil, dengan nilai rata-rata di atas 75%.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem lengan robotik berbasis *Computer Vision* dengan Jetson Nano sebagai pusat pemrosesan visual dan pengendali motor servo. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai kecepatan gerak sendi rata-rata sebesar 35°/detik dan kekuatan genggam sebesar 78%, cukup untuk memegang objek tanpa tergelincir. Servo mampu bergerak dalam rentang 0°–180° sesuai program tanpa menunjukkan gejala *overheating*, dan konsumsi daya rata-rata berada pada 5V dan 1.5A, yang menunjukkan efisiensi dan durabilitas sistem untuk operasi jangka panjang.

Berdasarkan persentase keberhasilan, sistem ini dapat meniru gerakan tangan manusia secara real-time dengan akurasi yang tinggi, khususnya pada tugas-tugas berulang dengan kompleksitas sedang. Penerapan box transparan dalam sistem input visual juga terbukti mengurangi *noise* hingga 30%, yang meningkatkan stabilitas pengenalan gerakan. Dengan kemampuan kendali jarak jauh dan presisi gerakan yang baik, sistem ini memiliki potensi besar untuk diterapkan di lingkungan kerja berbahaya. Untuk pengembangan ke depan, disarankan integrasi sensor *haptic* dan algoritma berbasis *deep learning* untuk meningkatkan interaksi dan adaptabilitas sistem terhadap kondisi kerja yang lebih kompleks.

#### REFERENSI

- [1] R. Rendyansyah, A. P. P. Prasetyo, K. Exaudi, S. Sembiring, B. A. Tarigan, and M. A. Amaria, "Pergerakan Robot Lengan Pengambil Objek Dengan Sistem Perekam Gerak Berbasis Komputer," *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, vol. 8, no. 2, p. 230, Jun. 2022, doi: 10.24036/jtev.v8i2.113147.
- [2] W. S. Prayogo, M. Rivai, and F. Budiman, "Kontrol Lengan Robot Yang Meniru Pergerakan Tangan Untuk Inspeksi Objek Yang Mengandung Gas Berbahaya," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 7, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.12962/j23373539.v7i2.31293.
- [3] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, S. Rab, and R. Suman, "Significant applications of Cobots in the field of manufacturing," *Cognitive Robotics*, vol. 2, pp. 222–233, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cogr.2022.10.001.
- [4] M. Abrar Masril and D. Putra Caniago, "Optimasi Teknologi *Computer Vision* pada Robot Industri Sebagai Pemindah Objek Berdasarkan Warna," vol. 11, no. 1, pp. 46–57, 2023, doi: 10.26760/elkomika.v11.i1.46.

- [5] R. Rahmadian and M. Widyartono, "Penerapan Machine Vision untuk Sistem Panen Otomatis di Robot Agrikultur," 2020. Accessed: May 18, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.26740/jieet.v4n1.p47-52>
- [6] M. A. Hasan *et al.*, "Invers Kinematik Robot Arm 4 DOF Menggunakan Sensor Leap Motion," *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-6 ISAS Publishing Series: Engineering and Science*, vol. 6, no. 1, 2020.
- [7] P. S. Studi, T. Elektro, and F. Teknologi Informasi Dan Elektro Universitas Teknologi Yogyakarta Jl Ringroad Utara Jombor Sleman Yogyakarta, "Pengendali Lengan Robot Dengan Gerakan Tangan Manusia."
- [8] A. Bajrami, M. C. Palpacelli, L. Carbonari, and D. Costa, "Posture Optimization of the TIAGo Highly-Redundant Robot for Grasping Operation," *Robotics*, vol. 13, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.3390/robotics13040056.
- [9] N. Becker *et al.*, "Integrating and Evaluating Visuo-tactile Sensing with Haptic Feedback for Teleoperated Robot Manipulation," Apr. 2024, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2404.19585>
- [10] T. Kandaga Gautama and A. Hendrik, "Pengenalan Objek pada *Computer Vision* dengan Pencocokan Fitur Menggunakan Algoritma SIFT Studi Kasus: Deteksi Penyakit Kulit Sederhana," vol. 2, Dec. 2016, Accessed: May 18, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.28932/jutisi.v2i3.647>
- [11] Yovi Apridiansyah, A. Wijaya, Pahrizal, Rozali Toyib, and Arif Setiawan, "Pengolahan Citra Berbasis Video Proccesing dengan Metode *Frame Difference* untuk Deteksi Gerak," *Journal of Applied Computer Science and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 81–89, Jun. 2024, doi: 10.52158/jacost.v5i1.790.
- [12] V. M. Nakaguchi and T. Ahamed, "Development of an Early Embryo Detection Methodology for Quail Eggs Using a Thermal Micro Camera and the YOLO Deep Learning Algorithm," *Sensors*, vol. 22, no. 15, Aug. 2022, doi: 10.3390/s22155820.
- [13] A. Riko Kurniawan and A. Triwiyatno, "Perancangan Robot Bipedal dengan Sistem Berjalan Berbasis Inverse Kinematic dengan Sensor MPU 6050 sebagai Indikator Kemiringan," 2017. Accessed: May 18, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.14710/TRANSIENT.6.1.97-102>
- [14] N. Azrina, A. Z. Hasibuan, and A. Sembiring, "Mesin Cuci Piring Semi Otomatis Berbasis," 2020. [Online]. Available: [www.snastikom.com](http://www.snastikom.com)
- [15] Z. Kavaliauskas, I. Sajev, G. Blaziunas, G. Gecevicius, and A. Iljinas, "Investigation of an LED Strip Controller Based on a PWM Driver and a PIC Series Microcontroller," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 10, May 2024, doi: 10.3390/app14104110.

