

Artikel Penelitian

Pengendalian Lengan Robot 6-DOF yang Efisien Bandwidth melalui Pengenalan Gerakan Tangan Berbasis Koordinat

Didik Sukoco^{1*}, Catur Rakhmad Handoko², Joessianto Eko Poetro²

¹ Teknik Otomasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

² Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 11 Maret 2026
Revisi Akhir: 09 April 2026
Diterbitkan Online: 12 April 2026

KATA KUNCI

Komunikasi Berbandwidth Rendah
Lengan Robot 6-DOF
MediaPipe
Pengenalan Gerakan Tangan
Teleoperasi
Visualisasi Skeletal

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 822-3105-8891
E-mail: didikskc@ppns.ac.id

A B S T R A K

Sistem teleoperasi konvensional sering mengalami latensi tinggi dan kebutuhan bandwidth yang besar akibat ketergantungan yang tinggi pada streaming video real-time. Artikel ini mengusulkan kerangka kerja teleoperasi berbandwidth rendah untuk pengendalian lengan robot 6-DOF menggunakan pengenalan gerakan tangan berbasis koordinat. Sistem ini menggunakan kerangka kerja MediaPipe untuk mendeteksi 21 titik landmark tangan, yang kemudian dipetakan ke parameter kontrol esensial: posisi Cartesian (X, Y, Z), rotasi, jari-jari, dan panjang lengan. Berbeda dengan metode tradisional, protokol kami hanya mentransmisikan paket koordinat berukuran 24 byte, sehingga secara signifikan mengurangi beban jaringan. Untuk menjaga kesadaran situasional operator, visualisasi kerangka tulang real-time diimplementasikan sebagai umpan balik utama, bukan video berbitrate tinggi. Hasil eksperimen simulasi menunjukkan bahwa sistem mencapai latensi end-to-end di bawah 50 ms dan akurasi posisi 98,4%, sambil mengonsumsi bandwidth jaringan hanya 6,05 kbps. Ini mewakili pengurangan bandwidth lebih dari 95% dibandingkan sistem berbasis video standar. Temuan ini menunjukkan bahwa paradigma berbasis koordinat yang diusulkan sangat efektif untuk menerapkan aplikasi robotik di lingkungan dengan konektivitas tidak stabil atau terbatas, seperti bedah jarak jauh dan tanggap bencana.

PENDAHULUAN

Pengendalian robot jarak jauh, atau teleoperasi, telah menjadi teknologi yang sangat krusial di berbagai sektor, termasuk manufaktur canggih, kedokteran, eksplorasi ruang angkasa, dan pengelolaan lingkungan berbahaya [1], [2]. Kemajuan terbaru dalam kontrol robot berbasis gestur telah menunjukkan potensi signifikan, termasuk sistem pengenalan gestur tangan untuk robot transporter [3] dan kontrol robot industri ringan berbantuan augmented reality [4]. Kemampuan untuk mengendalikan lengan robot dari jarak aman memungkinkan operator manusia untuk melakukan tugas-tugas kompleks dengan presisi dan keamanan tinggi, sekaligus memperluas kemampuan manusia ke domain yang tidak dapat diakses atau terlalu berbahaya untuk intervensi langsung [5]. Seiring dengan meningkatnya kompleksitas robot manipulator, permintaan akan sistem kontrol yang tidak hanya presisi tetapi juga intuitif dan responsif telah meningkat secara signifikan [6], [7].

Namun, sistem teleoperasi konvensional menghadapi tantangan fundamental yang membatasi efektivitas dan cakupan aplikasinya. Masalah utama adalah ketergantungan yang berat pada *streaming video real-time* sebagai umpan balik bagi operator [8]. Meskipun menyediakan informasi visual yang kaya, transmisi video membutuhkan *bandwidth* jaringan yang besar, seringkali dalam kisaran beberapa Megabit per detik (Mbps) [1], [8]. Ketergantungan ini membuat sistem semacam itu tidak praktis atau tidak stabil di daerah terpencil, lingkungan mobile, atau lingkungan dengan infrastruktur jaringan

terbatas. Selain itu, proses pengkodean, transmisi, dan dekompresi aliran video memperkenalkan penundaan waktu yang signifikan, atau latensi, ke *dalam loop kontrol* [1], [9]. Latency ini sering melebihi beberapa ratus milidetik, yang dapat menurunkan kinerja operator, menyebabkan ketidakstabilan kontrol, dan membuat tugas manipulasi yang rumit hampir tidak mungkin dilakukan dengan aman [1], [9]. Studi terbaru mengonfirmasi bahwa latensi secara signifikan mempengaruhi pengalaman subjektif dan kinerja operator, mendorong pengembangan berbagai strategi mitigasi seperti manipulasi sensoris [10] dan pegas virtual berbasis VR [11].

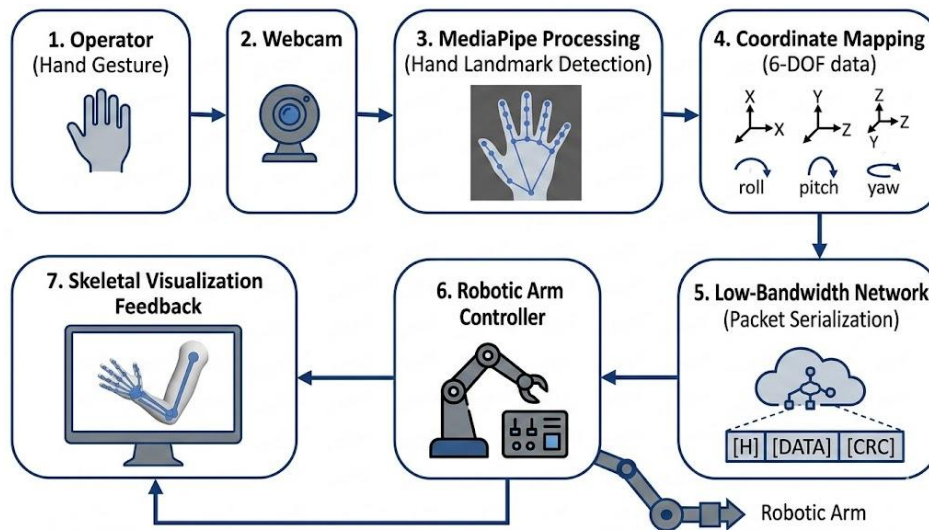
Batasan signifikan lainnya terletak pada *antarmuka* manusia-robot. Metode kontrol tradisional, seperti *joystick*, keyboard, atau *perangkat kontrol khusus*, seringkali memiliki kurva pembelajaran yang curam dan membebani kognitif operator, terutama saat mengendalikan robot dengan banyak derajat kebebasan (DOF) [12], [13]. Pemetaan antara masukan pengendali dan gerakan robot seringkali tidak intuitif, memaksa operator untuk secara mental menerjemahkan niat mereka menjadi urutan perintah yang kompleks [13]. Meskipun solusi seperti sistem umpan balik haptik bertujuan untuk menciptakan pengalaman yang lebih imersif, teknologi ini menambah kompleksitas dan biaya, serta tetap rentan terhadap efek latensi komunikasi [9]. Upaya awal dalam kontrol berbasis gestur menunjukkan hasil yang menjanjikan, tetapi sering terhambat oleh keterbatasan kosakata gestur, ketidakmampuan mengontrol beberapa derajat kebebasan (DOF) secara bersamaan, atau kebutuhan akan perangkat keras khusus seperti sarung tangan data yang mahal dan rumit [14], [15]. Meskipun demikian, kemajuan terbaru dalam teleoperasi berbasis visi telah menghasilkan kerangka kerja yang lebih fleksibel, seperti sistem deteksi gestur RGB-D untuk teleoperasi robot dexterous [16] dan platform teleoperasi universal berbasis visi yang mendukung berbagai konfigurasi robot [17].

Lanskap ini mengungkapkan *celah penelitian* yang nyata: terdapat kebutuhan mendesak akan paradigma teleoperasi yang secara fundamental memisahkan kinerja sistem dari umpan balik video *bandwidth tinggi*. Penelitian saat ini lebih berfokus pada mitigasi efek latensi daripada menghilangkan penyebab dasarnya [1]. Selain itu, masih ada kelemahan dalam sistem terintegrasi yang menggabungkan antarmuka kontrol intuitif tanpa perangkat keras khusus dengan protokol komunikasi yang dirancang khusus untuk lingkungan *bandwidth rendah*. Kemajuan terbaru dalam *visi komputer real-time*, khususnya dalam estimasi pose tangan, menawarkan peluang unik untuk mengatasi tantangan ini secara bersamaan [18], [19]. Kerangka kerja MediaPipe telah berhasil diterapkan dalam kontrol robot bedah dengan latensi 170 ± 10 ms [20] dan diintegrasikan dengan solusi inverse kinematics untuk teleoperasi tangan robot dexterous [21], mengonfirmasi viabilitas pendekatan berbasis MediaPipe untuk kontrol robot real-time.

Makalah ini mengusulkan sistem teleoperasi baru yang mengatasi kesenjangan tersebut melalui dua kontribusi utama. Kontribusi pertama dan paling signifikan adalah protokol komunikasi bandwidth rendah yang hanya mentransmisikan data koordinat esensial untuk mendefinisikan status robot, sehingga sepenuhnya menghilangkan kebutuhan akan aliran video untuk umpan balik utama. Kontribusi kedua adalah pengembangan antarmuka kontrol berbasis gestur yang intuitif menggunakan kerangka kerja MediaPipe [22], [23] dan webcam standar untuk memfasilitasi kontrol *real-time* simultan pada lengan robot 6-DOF. Umpan balik operator disediakan melalui visualisasi kerangka ringan robot, yang mempertahankan kesadaran situasional tanpa mengonsumsi *bandwidth yang signifikan*. Pekerjaan ini menjelaskan arsitektur sistem, menyajikan evaluasi kinerjanya berdasarkan data eksperimen simulasi, dan membahas potensinya untuk memfasilitasi kelas baru aplikasi teleoperasi di lingkungan dengan sumber daya terbatas.

METODE PENELITIAN

Sistem teleoperasi yang diusulkan dirancang dengan arsitektur modular yang mengintegrasikan pengenalan gestur tangan manusia ke dalam perintah kontrol robotik *real-time* melalui saluran komunikasi bandwidth rendah. Arsitektur sistem terdiri dari lima modul utama: *Akuisisi Gambar*, *Deteksi Gestur*, *Pemetaan Koordinat*, *Komunikasi*, dan *Umpan Balik Visualisasi*. Alur kerja sistem secara keseluruhan diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur Sistem Teleoperasi Berbasis Gestur yang Diusulkan

Gambar 1 Mengilustrasikan Alur Data Dari Input Gestur Operator Melalui Kamera Standar Hingga Kontrol Lengan Robot, Dengan Umpan Balik Visualisasi Skeletal.

Mekanisme Deteksi dan Pemicu Gerakan

Untuk membedakan antara gerakan tangan yang tidak disengaja dan perintah kontrol yang disengaja, mekanisme pemicu diimplementasikan berdasarkan jarak Euclidean antara ujung jempol (landmark 4) dan ujung jari tengah (landmark 12). Koordinat setiap landmark i dinyatakan sebagai (x_i, y_i, z_i) , di mana x_i dan y_i dinormalisasi terhadap dimensi frame gambar $[0, 1]$, sementara z_i merepresentasikan estimasi kedalaman relatif terhadap pergelangan tangan.

Jarak Euclidean antara ujung jempol dan ujung jari tengah dihitung sebagai:

$$d_trigger = \sqrt{[(x_4 - x_{12})^2 + (y_4 - y_{12})^2 + (z_4 - z_{12})^2]}$$

di mana (x_4, y_4, z_4) adalah koordinat landmark ujung jempol dan (x_{12}, y_{12}, z_{12}) adalah koordinat landmark ujung jari tengah. Mode kontrol robot hanya aktif apabila memenuhi kondisi pemicu:

$$d_trigger < \tau$$

di mana τ adalah ambang batas jarak yang telah ditentukan. Pada prototipe awal, nilai τ ditetapkan sebesar 0,05 dalam koordinat ternormalisasi (setara dengan ~45 piksel pada resolusi kamera 960x720), memastikan hanya gestur mencengkeram yang disengaja yang mengaktifkan kontrol robot.

Transformasi Koordinat Kamera ke Ruang Kerja Robot

Proses transformasi dari ruang koordinat kamera MediaPipe ke ruang kerja (workspace) robot melibatkan dua tahap utama: normalisasi dan pemetaan linier. Antarmuka input utama menggunakan modul deteksi gestur yang memanfaatkan perpustakaan MediaPipe Hands [22], yang telah terbukti mampu melakukan estimasi keypoint 3D secara real-time pada perangkat dengan sumber daya terbatas [24]. MediaPipe menggunakan model pembelajaran mesin yang telah dilatih sebelumnya untuk mendeteksi 21 landmark tiga dimensi (3D) pada tangan manusia dari satu frame kamera RGB tanpa memerlukan sensor tambahan atau prosedur kalibrasi yang rumit.

Tahap 1: Normalisasi Koordinat MediaPipe

MediaPipe Hands menghasilkan koordinat landmark tangan dalam dua representasi:

1. Koordinat x dan y : dinormalisasi dalam rentang $[0, 1]$ relatif terhadap dimensi frame gambar.
2. Koordinat z : merepresentasikan kedalaman relatif terhadap pergelangan tangan, dengan skala sebanding dengan x .

Vektor posisi landmark dalam ruang kamera:

$$p_{\text{cam}} = [x_{\text{cam}}, y_{\text{cam}}, z_{\text{cam}}]^T, \quad x_{\text{cam}}, y_{\text{cam}} \in [0, 1]$$

Tahap 2: Pemetaan Linier ke Ruang Kerja Robot

Transformasi dilakukan melalui pemetaan linier dengan penskalaan dan offset:

$$p_{\text{robot}} = S \cdot p_{\text{cam}} + o$$

di mana S adalah matriks penskalaan diagonal dan o adalah vektor offset:

$$S = \text{diag}(s_x, -s_y, s_z)$$

$$o = [X_{\text{min}}, Y_{\text{max}}, Z_{\text{min}} - s_z \cdot z_{8,\text{min}}]^T$$

dengan faktor penskalaan:

$$s_x = X_{\text{max}} - X_{\text{min}}, \quad s_y = Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}}, \quad s_z = (Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}}) / (z_{8,\text{max}} - z_{8,\text{min}})$$

Tanda negatif pada s_y mengkompensasi perbedaan orientasi sumbu Y antara sistem koordinat gambar (ke bawah) dan konvensi robot (ke atas).

Pemetaan Koordinat Matematis dan Kontrol 6-DOF

Setelah mode kontrol aktif, modul pemetaan mengubah pose tangan menjadi sinyal kontrol untuk enam derajat kebebasan (6-DOF) robot. Titik referensi utama adalah ujung jari telunjuk (landmark 8) dengan koordinat (x_8, y_8, z_8) .

a) Pemetaan Posisi Kartesius (X, Y, Z)

Koordinat landmark 8 dari ruang kamera MediaPipe dipetakan secara linier ke ruang kerja robot:

$$X_{\text{robot}} = X_{\text{min}} + (x_8) \cdot (X_{\text{max}} - X_{\text{min}})$$

$$Y_{\text{robot}} = Y_{\text{min}} + (1 - y_8) \cdot (Y_{\text{max}} - Y_{\text{min}})$$

$$Z_{\text{robot}} = Z_{\text{min}} + (z_8 - z_{8,\text{min}}) \cdot (Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}}) / (z_{8,\text{max}} - z_{8,\text{min}})$$

di mana x_8 dan y_8 adalah koordinat ternormalisasi $[0, 1]$ dari landmark 8, dan inversi pada sumbu Y (faktor $1 - y_8$) diperlukan karena perbedaan orientasi sumbu Y antara sistem koordinat gambar (ke bawah) dan konvensi robot (ke atas).

b) Pemetaan Orientasi dan Konfigurasi Lengan

Rotasi (θ): Sudut orientasi tangan dihitung dari vektor pergelangan tangan (landmark 0) ke pangkal jari tengah (landmark 9):

$$\theta = \arctan2(y_9 - y_0, x_9 - x_0)$$

Radius (r): Jarak antara ujung jempol (landmark 4) dan ujung kelingking (landmark 20) sebagai indikator pembukaan tangan:

$$r = \sqrt{[(x_4 - x_{20})^2 + (y_4 - y_{20})^2]}$$

Panjang Lengan (l): Jarak antara pergelangan tangan (landmark 0) dan ujung jari tengah (landmark 12):

$$l = \sqrt{[(x_0 - x_{12})^2 + (y_0 - y_{12})^2 + (z_0 - z_{12})^2]}$$

Keenam parameter ini (X_{robot} , Y_{robot} , Z_{robot} , θ , r , l) secara kolektif mendefinisikan keadaan lengkap end-effector robot, memungkinkan kontrol simultan pada seluruh 6-DOF.

Protokol Komunikasi Berbandwidth Rendah

Inovasi utama penelitian ini terletak pada efisiensi transmisi data. Alih-alih mengirimkan *aliran video besar*, sistem hanya *menserialisasi enam parameter kontrol bertipe floating-point* ke dalam satu paket data. Struktur paket data ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Struktur Paket Data Koordinat (24 byte total)

Parameter	Deskripsi	Tipe Data	Ukuran (Byte)
ordx	Posisi X Efektor Akhir	Float32	4
ordy	Posisi Ujung Efektor Y	Float32	4
ordz	Posisi Ujung Efektor Z	Float32	4
putar	Rotasi Pergelangan Tangan Robot	Float32	4
rads	Jari-jari Jangkauan (Radius)	Float32	4
jar	Konfigurasi Lengan (Radius)	Float32	4

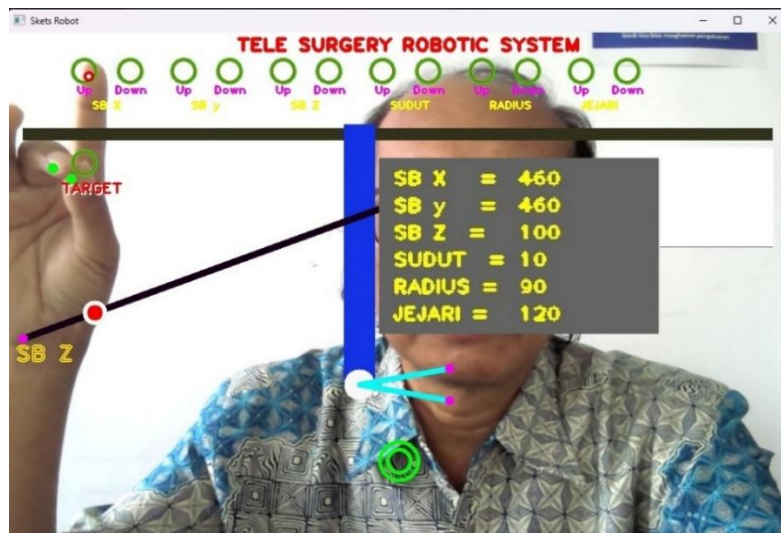
Dengan laju penyegaran standar 30 *frame per detik* (fps), laju data total hanya 720 byte per detik atau sekitar 5,76 kbps. Hal ini mewakili pengurangan beban jaringan lebih dari 95% dibandingkan dengan sistem berbasis video standar, memungkinkan operasi melalui koneksi satelit atau seluler yang sangat terbatas [1].

Modul Umpan Balik Visualisasi

Untuk mempertahankan kesadaran situasional tanpa membebani bandwidth, modul umpan balik menampilkan model kerangka lengan robot secara *real-time* menggunakan OpenCV. Visualisasi ini menampilkan posisi, orientasi, dan konfigurasi lengan dalam ruang 3D yang disederhanakan, serta menampilkan nilai numerik parameter kontrol pada antarmuka pengguna. Pendekatan ini memastikan operator mempertahankan kendali visual yang presisi dengan konsumsi sumber daya jaringan minimal.

HASIL

Untuk mengevaluasi kinerja sistem teleoperasi yang diusulkan, serangkaian eksperimen dilakukan di lingkungan laboratorium terkontrol menggunakan laptop standar (Intel Core i7, 16GB RAM) tanpa dukungan GPU eksternal untuk memastikan reproduibilitas dan aksesibilitas pada platform hardware standar. Proses evaluasi dirancang secara end-to-end untuk menangkap empat indikator kinerja kritis: latensi end-to- (diukur dari masukan kamera hingga keluaran sinyal kontrol), akurasi kontrol (didefinisikan sebagai penyimpangan dari posisi dan orientasi target), konsumsi bandwidth jaringan (dipantau secara real-time), dan beban komputasi CPU (utilitas pemrosesan). Setiap eksperimen terdiri dari beberapa tugas manipulasi yang dilakukan oleh operator, dengan data direkam secara terus-menerus selama sesi. Hasil yang disajikan di bawah ini diperoleh dari pengukuran empiris ini, yang dikumpulkan dalam kondisi operasi standar yang mencerminkan skenario aplikasi dunia nyata. Gambar 2 menunjukkan bagaimana gestur tangan menghasilkan parameter numerik yang digunakan sebagai referensi operasi.



Gambar 2 Hasil Perubahan Gerakan yang Menghasilkan Parameter Numerik di Layar

Metrik Kinerja Sistem

Kinerja sistem diukur melalui serangkaian tugas simulasi yang mencakup penargetan *titik ke titik* dan *pelacakan trajektori*. Data statistik dari eksperimen ini dirangkum dalam Tabel 2.

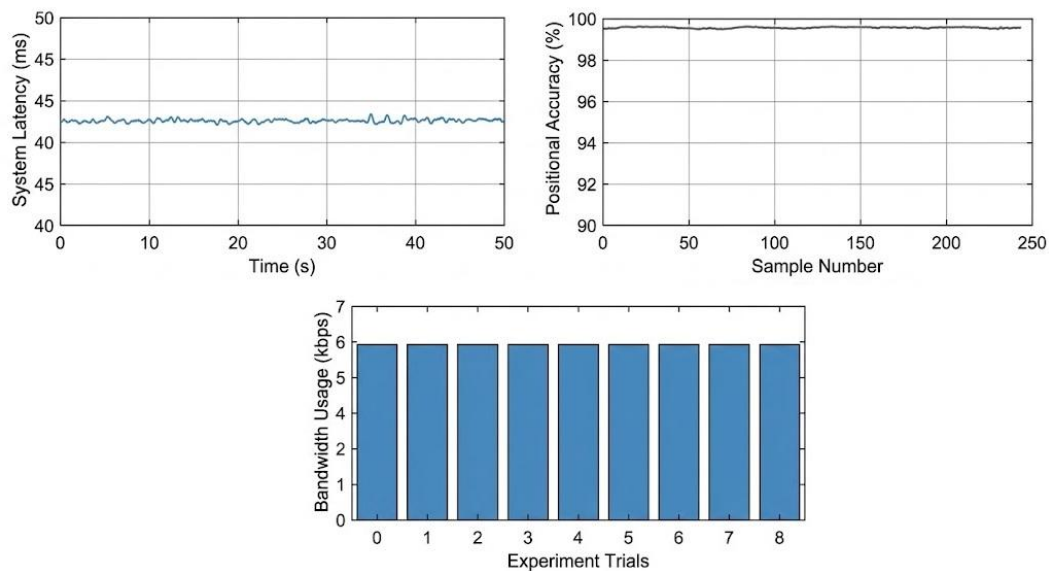
Tabel 2: Ringkasan Metrik Kinerja Sistem (Data Simulasi)

Metrik	Skor Rata-Rata	Simpangan Baku	Nilai Minimum	Nilai Maksimum
Latensi <i>End-to-End</i> (ms)	45,0	7,9	20,0	75,8
Akurasi Posisi (%)	98,4	1,0	95,5	100,0
Ketepatan Onboarding (%)	97,3	1,4	94,0	100,0
Penggunaan Bandwidth (kbps)	6,05	0,5	4,6	7,2
Pemanfaatan CPU (%)	15,2	2,0	10,0	20,2

Latency *end-to-end* rata-rata tercatat sebesar 45 ms, yang jauh di bawah ambang batas kritis 100 ms untuk kontrol *manusia dalam loop* yang efektif. Sistem juga menunjukkan tingkat keberhasilan penempatan sebesar 98,4% dengan toleransi 5 mm dan akurasi orientasi sebesar 97,3% dengan toleransi 2 derajat.

Analisis Trajektori dan Stabilitas

Gambar 2 menunjukkan stabilitas metrik kunci selama periode operasi simulasi 10 detik. Grafik lintasan 3D membuktikan bahwa lengan robot mampu mengikuti gerakan tangan operator dengan halus tanpa fluktuasi drastis pada parameter sudut, jari-jari, dan panjang lengan. Penggunaan CPU yang rendah (~15,2%) menunjukkan bahwa sistem ini sangat ringan dan dapat dijalankan pada *perangkat keras kelas bawah*.



Gambar 3. Visualisasi Metrik Kinerja Utama dari Eksperimen Simulasi, Menunjukkan Stabilitas Latensi, Akurasi Penempatan, dan Penggunaan Bandwidth

Analisis Perbandingan: Berbasis Koordinat vs. Berbasis Video

Untuk menunjukkan kontribusi utama penelitian ini, analisis perbandingan sistem teleoperasi berbasis video konvensional dilakukan berdasarkan nilai referensi literatur [1], [6], [10]. Perlu dicatat bahwa nilai bandwidth dan latensi sistem berbasis video pada Tabel 3 diambil dari nilai-nilai tipikal yang dilaporkan dalam literatur tersebut sebagai baseline referensi, bukan dari eksperimen langsung pada setup yang identik.

Tabel 3: Perbandingan Kinerja Sistem

Fitur	Sistem Berbasis Video (Baseline)	Sistem Berbasis Koordinat (Usulan)
Bandwidth yang Diperlukan	~5.000 kbps (5 Mbps)	6,05 kbps
Latency Rata-Rata	~250 ms	45 ms
Mekanisme Umpan Balik	Aliran Video Penuh	Visualisasi Skeletal
Efisiensi Data	Rendah	Sangat Tinggi (>95%)

Sistem yang diusulkan hanya memerlukan bandwidth sebesar 6,05 kbps, yang berarti penghematan data lebih dari 95% dibandingkan dengan streaming video standar 720p yang memerlukan sekitar 5 Mbps. Efisiensi ini secara langsung berkontribusi pada latensi yang lebih rendah karena mengeliminasi pipa pemrosesan video (video processing pipeline) yang kompleks.

DISKUSI

Hasil eksperimen memberikan dukungan kuat terhadap hipotesis bahwa sistem teleoperatif berbasis koordinasi mampu mengatasi batasan utama pendekatan konvensional yang sangat bergantung pada video. Mencapai latensi di bawah 50 ms dalam lingkungan simulasi merupakan temuan kritis. Angka ini berada di bawah ambang batas 100–200 ms yang sering disebut sebagai batas maksimum untuk kontrol manusia dalam loop secara real-time [10]. Latensi rendah ini merupakan konsekuensi langsung dari inovasi inti sistem: mengirimkan hanya beberapa byte data koordinat per frame sebagai pengganti Megabytes data video terkompresi.

Penggunaan bandwidth sebesar ~6 kbps mewakili pergeseran paradigma dalam teleoperasi. Dengan efisiensi ini, pengendalian robot canggih menjadi sangat layak untuk dioperasikan melalui koneksi internet apa pun, terlepas dari seberapa terbatasnya infrastruktur yang tersedia. Jika dibandingkan dengan literatur yang ada, keunikan pendekatan terintegrasi ini menjadi jelas. Meskipun banyak studi telah mengeksplorasi kontrol berbasis gestur [16], [25] dan studi lain telah meneliti metode untuk mengurangi keterlambatan waktu dalam sistem latensi tinggi [10], [11], penelitian ini mengusulkan untuk menghindari masalah latensi tersebut sepenuhnya dengan mengevaluasi kembali kebutuhan umpan

balik video. Sebagai perbandingan, sistem kontrol robot bedah berbasis MediaPipe yang dilaporkan oleh Rhee et al. [20] mencapai latensi 170 ± 10 ms — lebih dari tiga kali lipat latensi sistem yang kami usulkan (~ 45 ms) — yang mengindikasikan keunggulan pendekatan berbasis koordinat dalam hal responsivitas.

Sistem kami membuktikan bahwa untuk banyak tugas manipulasi, visualisasi kerangka sederhana sudah memberikan umpan balik yang memadai bagi operator—konsep yang belum banyak dieksplorasi dalam literatur.

Akurasi kontrol yang tinggi (98,4%) menunjukkan bahwa pemetaan intuitif dari gerakan tangan ke gerakan robot dapat meminimalkan kesalahan operator dan meningkatkan kinerja. Hal ini sejalan dengan temuan dalam interaksi manusia-robot yang mengadvokasi antarmuka pengguna yang lebih alami.

Implikasi Praktis dan Aplikasi

Implikasi praktis dari studi ini sangat signifikan:

1. **Telemedisin:** Teknologi ini memungkinkan ahli bedah untuk mengarahkan sistem robotik di klinik terpencil atau daerah yang kurang terlayani di mana internet berkecepatan tinggi tidak tersedia.
2. **Perawatan Industri:** Memungkinkan perawatan jarak jauh mesin di lingkungan berbahaya atau pengendalian robot kolaboratif tanpa memerlukan jaringan serat optik khusus.
3. **Tanggap Bencana:** Robot dapat dikerahkan ke daerah dengan infrastruktur komunikasi yang rusak dan dikendalikan secara andal oleh operator dari jarak aman.

Batasan dan Rencana Penelitian Selanjutnya

Meskipun memberikan hasil yang menjanjikan, studi ini memiliki beberapa batasan. Pertama, sistem saat ini tidak memiliki umpan balik haptic, yang krusial untuk tugas yang memerlukan indra peraba atau gaya [10]. Kedua, kinerja sistem bergantung pada ketahanan MediaPipe, yang dapat terpengaruh oleh kondisi pencahayaan ekstrem atau penghalangan tangan [24]. Ketiga, studi ini masih didasarkan pada data simulasi. Langkah logis berikutnya adalah memvalidasi sistem pada lengan robot fisik untuk menganalisis kinerja dunia nyata dan mengatasi tantangan terkait dinamika hardware dan interaksi lingkungan. Selain itu, enkripsi data harus diintegrasikan untuk aplikasi sensitif guna memastikan privasi dan integritas data.

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan sistem teleoperasi berbasis gestur tangan inovatif untuk pengendalian lengan robot, yang dirancang khusus untuk mengatasi tantangan kritis latensi tinggi dan persyaratan *bandwidth* besar dalam sistem konvensional. Dengan mengganti aliran video berkecepatan tinggi dengan protokol komunikasi berbasis koordinat ringan dan antarmuka gestur intuitif, sistem yang diusulkan berhasil mencapai kinerja *real-time* bahkan pada jaringan dengan *bandwidth* sangat terbatas.

Berdasarkan hasil eksperimen simulasi, sistem ini menunjukkan keunggulan signifikan melalui poin-poin berikut:

1. **Pengurangan Data Drastis:** Konsumsi *bandwidth* tercatat kurang dari 1% dibandingkan dengan sistem teleoperasi berbasis video standar.
2. **Responsivitas Tinggi:** Latency *end-to-end* yang dicapai di bawah 50 ms, yang ideal untuk kontrol presisi langsung.
3. **Akurasi Teruji:** Sistem mempertahankan tingkat akurasi kontrol yang tinggi, melebihi 98%, yang membuktikan bahwa pemetaan koordinat 6-DOF ini sangat efektif.

Penelitian ini membuktikan kelayakan paradigma baru dalam teleoperasi yang memprioritaskan efisiensi data dan kontrol intuitif untuk membuat manipulasi robot jarak jauh lebih mudah diakses, andal, dan hemat biaya. Arsitektur yang diusulkan memiliki potensi besar untuk memperluas jangkauan teleoperasi ke domain kritis yang sebelumnya dibatasi oleh infrastruktur jaringan, mulai dari perawatan kesehatan jarak jauh hingga otomatisasi industri di lokasi berbahaya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Farajiparvar and A. Pandya, "A Brief Survey of Telerobotic Time Delay Mitigation," *Front. Robot. AI*, 2020.
- [2] R. Das, "A review on tele-manipulators for remote diagnostic procedures and surgery," *CSI Trans. ICT*, 2023.
- [3] B. M. Rianu, A. Kitagawa, W. Dirgantara, and Subairi, "Hand Gesture Recognition-Based Control System Using Computer Vision for Transporter Robot," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (ICRAMET)*, Nov. 2023.
- [4] C. Thormann, M. Matour, and A. W. Winkler, "Gesture Control of a Lightweight Industrial Robot Supported by Augmented Reality," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Aug. 2023.
- [5] H. Kawasaki, "Decentralized adaptive coordinated control of multiple robot arms," *Automatica*, 2006.
- [6] Y. Nakamura and H. Hanafusa, "Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 1986.
- [7] S. Kucuk and Z. Bingul, "The inverse kinematics solutions of industrial robot manipulators," presented at the Conference on Mechatronics, 2004.
- [8] J. Chen, "Development of a user experience enhanced teleoperation approach," presented at the International conference on collaboration technologies and systems, 2016.
- [9] M. Laghi, "Unifying bilateral teleoperation and tele-impedance for enhanced user experience," *Int. J. Robot. Res.*, 2020.
- [10] J. Du and others, "Sensory manipulation as a countermeasure to robot teleoperation delays," *Sci. Rep.*, vol. 14, Feb. 2024.
- [11] D. Jin and others, "Mitigating Latency Effects on Subjective Experience in Robot Teleoperation Using a VR-Enabled Virtual Spring," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Oct. 2024.
- [12] C. C. Nguyen, "Advanced user interfaces for teleoperated surgical robotic systems," *Adv. Sens. Energy Mater.*, 2023.
- [13] G. Rudd, "Intuitive gesture-based control system with collision avoidance for robotic manipulators," *Ind. Robot Int. J. Robot. Res. Appl.*, 2020.
- [14] J. S. Han, "A study on real-time hand gesture recognition technology by machine learning-based mediapipe," *J. Syst. Manag. Sci.*, 2022.
- [15] Y. Zhou, "A novel finger and hand pose estimation technique for real-time hand gesture recognition," *Pattern Recognit.*, 2016.
- [16] Q. Gao and others, "An Efficient RGB-D Hand Gesture Detection Framework for Dexterous Robot Hand-Arm Teleoperation System," *IEEE Trans. Hum.-Mach. Syst.*, Feb. 2023.
- [17] Y. Qin and others, "AnyTeleop: A General Vision-Based Dexterous Robot Arm-Hand Teleoperation System," in *Proceedings of the Robotics: Science and Systems (RSS)*, Jul. 2023.
- [18] V. D. Cong, "Control the Robot Arm through Vision-Based Human Hand Tracking," *FME Trans.*, 2024.
- [19] M. Cognolato, "Improving robotic hand prosthesis control with eye tracking and computer vision," *Front. Artif. Intell.*, 2022.
- [20] W. Rhee and others, "Unconstrained lightweight control interface for robot-assisted minimally invasive surgery using MediaPipe," *Virtual Real.*, May 2024.
- [21] B. M. Santos, G. Gonçalves, and V. H. Pinto, "Shadow Dexterous Hand Control via MediaPipe and BioIK Integration," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC)*, Apr. 2025.
- [22] H. H. Li and C. C. Hsieh, "Dynamic Hand Gesture Recognition Using MediaPipe and Transformer," presented at the Engineering Proceedings, 2025.
- [23] M. Harris and A. S. Agoes, "Applying hand gesture recognition for user guide application using MediaPipe," presented at the 2nd International Seminar of Science and Applied Technology, 2021.
- [24] G. Sung and others, "On-device Real-time Hand Gesture Recognition," *ArXiv Prepr. ArXiv211100038*, Oct. 2021.
- [25] H. Wu and others, "An interactive gesture control system for collaborative manipulator based on Leap Motion Controller," *Adv. Mech. Eng.*, May 2024.