



Pengembangan Aplikasi berbasis Virtual Reality untuk Sistem Teaching Robot pada SmartEdu Station

Yuliadi Erdani*, Sarosa Castrena Abadi, Ihsan Kamaludin, Abdur Rohman Harits Martawireja, Adhitya Sumardi Sunarya, Nuryanti

Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Program Studi Teknologi Rekayasa Informatika Industri, Politeknik Manufaktur Bandung, Bandung, Indonesia

Email: ¹*yul_erdani@yahoo.com, ²sarosa@ae.polman-bandung.ac.id, ³ihsankamaludin11@gmail.com, ⁴harits@ae.polman-bandung.ac.id, ⁵adhitya@polman-bandung.ac.id, ⁶nuryanti@polman-bandung.ac.id

Email Penulis Korespondensi: yul_erdani@yahoo.com

Abstrak—Prosedur pemrograman lintasan gerakan (*trajectory programming*) pada robot industri menggunakan *teach pendant* konvensional memberikan beban kognitif yang tinggi, rentan memicu kecelakaan benturan struktural bagi mahasiswa pemula, serta membatasi efisiensi waktu praktikum akibat minimnya ketersediaan alat. Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan masalah tersebut dengan mengembangkan sistem *direct teaching* otonom pada manipulator UR5e memanfaatkan teknologi *Virtual Reality* (VR) dan arsitektur *Digital Twin* pada fasilitas SmartEdu-Station. Sebagai solusi, sistem ini menangkap input koordinat spasial global dari pergerakan alami tangan pengguna melalui pelacakan *VR controller* 6-DoF, lalu menerjemahkannya menjadi visualisasi postur robot virtual secara waktu-nyata memanfaatkan komputasi *Inverse Kinematics*. Himpunan koordinat lintasan divalidasi keamanannya sebagai kumpulan data *waypoint* otonom sebelum ditransmisikan menuju kontroler fisik. Hasil pengujian empiris membuktikan komunikasi data melalui protokol TCP/IP dan RTDE mencatatkan keberhasilan pengiriman paket lintasan sebesar 100% dengan rata-rata jeda respons eksekusi konsisten di bawah 1 detik. Lebih lanjut, pengujian ergonomi antarmuka menggunakan kuesioner *System Usability Scale* (SUS) terhadap 10 responden menghasilkan skor rata-rata 79,0 (Kategori Baik). Penelitian ini berkontribusi secara nyata dalam menghadirkan kerangka kerja simulasi *offline teaching* yang berhasil mengeliminasi risiko kerusakan alat fisik sekaligus memangkas kurva pembelajaran pemetaan ruang spasial secara interaktif dan aman.

Kata Kunci: Digital Twin; Inverse Kinematics; Robot Lengan; System Usability Scale; Virtual Reality

Abstract—Conventionally, the trajectory programming procedure for industrial robots using physical teach pendants imposes a high cognitive load, is prone to triggering structural collision accidents for novice students, and limits training efficiency due to the minimal availability of equipment. This study aims to solve these issues by developing an autonomous direct teaching system for the UR5e manipulator utilizing Virtual Reality (VR) technology and a Digital Twin architecture at the SmartEdu-Station facility. As a solution, the system captures global spatial coordinate inputs from the user's natural hand movements via 6-DoF VR controller tracking, then translates them into real-time virtual robot posture visualization using Inverse Kinematics computation. The trajectory coordinate sets are validated for safety as autonomous waypoint data before being transmitted to the physical controller. Empirical testing results prove that data communication via TCP/IP and RTDE protocols records a trajectory packet transmission success rate of 100%, with an average execution response delay consistently under 1 second. Furthermore, interface ergonomics testing using the System Usability Scale (SUS) questionnaire on 10 respondents yielded an average score of 79.0 (Good Category). This research contributes significantly by providing an offline teaching simulation framework that successfully eliminates the risk of physical equipment damage while interactively and safely reducing the learning curve of spatial mapping.

Keywords: Digital Twin; Inverse Kinematics; Robotic Arm; System Usability Scale; Virtual Reality

1. PENDAHULUAN

Penguasaan operasional robot manipulator industri dengan 6 Derajat Kebebasan (6-DOF), seperti Universal Robots seri UR5e[1], telah menjadi standar kompetensi teknis yang mutlak diwajibkan dalam ekosistem pendidikan vokasi manufaktur masa kini[2]. Untuk menghasilkan pergerakan presisi pada jalur produksi, operator harus melakukan pemrograman lintasan gerak (*trajectory programming*) atau yang lazim disebut sebagai proses *teaching*. Namun, di mayoritas laboratorium vokasi, metodologi pengajaran *teaching* ini masih sangat bergantung pada pendekatan konvensional menggunakan perangkat keras genggam berupa *teach pendant* fisik. Pendekatan mekanis ini sejatinya memiliki kegagalan fundamental ketika diterapkan murni untuk kebutuhan eksplorasi edukasi pemula, yang berimbas pada hambatan proses transfer pengetahuan spasial secara efektif.

Kegagalan fundamental dari metode *teach pendant* konvensional terletak pada tingginya beban kognitif (*cognitive load*) yang dibebankan kepada pengguna. Mahasiswa diwajibkan untuk menerjemahkan pergerakan ruang tiga dimensi (3D) ke dalam manipulasi tombol-tombol dua dimensi (2D) pada antarmuka layar *pendant*. Dalam praktiknya, pengguna harus terus-menerus membagi fokus visual antara layar dan postur fisik robot sesungguhnya, sembari harus membayangkan kalkulasi matriks rotasi ruang spasial Cartesian (sumbu X, Y, Z) serta limitasi sudut dari keenam engsel mekanis. Kurangnya umpan balik prediktif visual pada *teach pendant* menyebabkan mahasiswa tidak memiliki ruang aman (*sandbox*) untuk memvalidasi lintasan sebelum dieksekusi. Setiap instruksi koordinat yang dimasukkan akan langsung menggerakkan aktuator fisik berskala industri. Bagi mahasiswa pemula, kesalahan sekecil apa pun dalam menginput parameter kinematika atau ketidaktahuan terhadap titik singularitas (*singularity*) dapat langsung memicu benturan struktural fatal (*collision*) yang tidak hanya membahayakan keselamatan fisik manusia, tetapi juga berpotensi merusak komponen perangkat keras bernilai tinggi. Lebih jauh lagi, pendekatan ini sangat tidak efisien dari segi manajemen waktu; proses pembelajaran praktikum menjadi sangat lambat akibat antrean panjang mahasiswa yang harus bergantian menggunakan rasio unit robot fisik yang sangat terbatas di laboratorium[3].



Sebagai respons terhadap keterbatasan tersebut, integrasi teknologi *Virtual Reality* (VR) dan *Digital Twin* mulai dieksplorasi secara luas dalam literatur akademik sebagai solusi alternatif. Secara konseptual, teknologi imersif ini memungkinkan penciptaan ruang eksperimen virtual yang mensimulasikan lingkungan fisik secara identik dan responsif tanpa risiko kerusakan nyata. Penelitian terdahulu telah membuktikan kelayakan dasar dari pemodelan 3D dan simulasi kendali lengan robot 4-DOF di dalam lingkungan VR[4], serta keandalan arsitektur *Digital Twin* sebagai jembatan siber-fisik yang memproyeksikan wujud komputasi untuk menyinkronkan pergerakan virtual dengan entitas fisik[5],[6]. Eksplorasi pada ranah manipulasi teleoperasi juga menunjukkan bahwa lingkungan kendali yang imersif secara signifikan mampu meningkatkan efisiensi navigasi spasial robotik dibandingkan antarmuka konvensional terutama pada skenario rekreasi lingkungan berisiko tinggi atau kondisi dinamis[7],[8].

Meskipun fondasi arsitektur jaringan komunikasi siber-fisik seperti penggunaan protokol IoT industri yang mampu menjaga kestabilan latensi telah terbukti matang[9], tinjauan literatur yang ada menyingkap celah penelitian (*Gap Analysis*) yang masih belum terpecahkan dalam konteks ergonomi edukasi. Mayoritas studi terdahulu memfokuskan arsitektur mereka murni pada perancangan teleoperasi sinkron secara seketika (*real-time puppeteering*)[10],[11],[12]. Pendekatan *real-time* semacam ini justru mengabaikan fakta krusial bahwa gerakan alami tangan manusia memiliki ketidakstabilan (*jitter*). Apabila pendekatan ini diterapkan langsung pada mahasiswa pemula, *jitter* tersebut akan diterjemahkan menjadi pergerakan tersentak-sentak pada lengan robot industri berkecepatan tinggi, yang malah mengamplifikasi risiko bahaya mekanis di dunia nyata. Selain itu, perangkat lunak simulasi VR saat ini luput mengeksplorasi perancangan antarmuka pengguna (UI/UX) khusus yang dirancang untuk memudahkan instruksi pembelajaran terstruktur; sistem umumnya hanya berfungsi sebagai penampil pasif atau alat kontrol mentah[13],[14]. Fitur-fitur esensial untuk simulasi *offline teaching* yang aman seperti kemudahan perekaman titik sasaran (*waypoint recording*), visualisasi perencanaan lintasan sebelum robot bergerak, dan mekanisme intervensi otonom saat engsel mencapai batas maksimal (*joint limit*) belum terintegrasi secara holistik menjadi sebuah aplikasi yang mandiri. Beberapa solusi visual spasial coba ditawarkan melalui instrumen *Augmented Reality* (AR)[15], maupun realitas campuran, namun sistem tersebut masih sangat bergantung pada ketersediaan objek nyata di depannya, sehingga pada akhirnya tetap tidak mampu menyelesaikan masalah fundamental terkait rasio keterbatasan alat praktikum fisik.

Berdasarkan *gap analysis* yang komprehensif tersebut, penelitian ini menetapkan metode pembandingan (*baseline*) berupa evaluasi kelemahan pada metode pemrograman konvensional menggunakan *teach pendant* fisik, untuk kemudian dikomparasikan dengan solusi rancang bangun sistem *direct teaching* otonom berbasis *Virtual Reality* yang terintegrasi secara utuh dengan arsitektur *Digital Twin* pada fasilitas SmartEdu-Station. Berbeda dengan metode pembandingan yang memiliki tingkat risiko tinggi, metode yang diusulkan mendigitalisasi seluruh proses manipulasi menggunakan pelacakan pengontrol VR 6-DOF (*Head Mounted Display* Meta Quest 3) untuk menangkap input koordinat tangan secara alami. Input ini kemudian diproses melalui mesin komputasi matematis *Inverse Kinematics* di dalam Unity Engine[16], lalu divalidasi keamanannya di ruang maya sebelum paket instruksi akhirnya dikirimkan via protokol socket *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP) dan *Real-Time Data Exchange* (RTDE) menuju kontroler fisik manipulator industri UR5e[16].

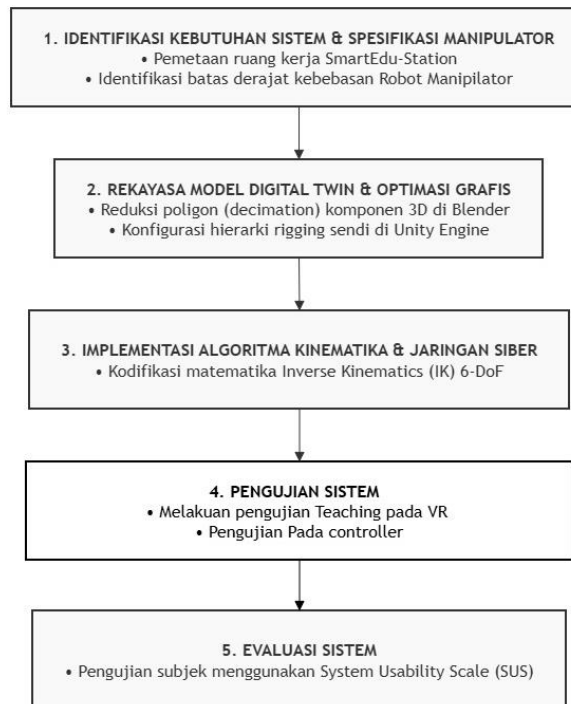
Oleh karena itu, tujuan penelitian yang akan dilakukan dalam studi ini difokuskan pada tiga luaran utama: (1) Merancang dan merekayasa lingkungan *Digital Twin* interaktif dari lengan robot manipulator UR5e yang merepresentasikan wujud siber-fisik secara identik; (2) Mengembangkan dan memvalidasi sistem komputasi *offline teaching* di dalam VR yang mampu mengalkulasi algoritma *Inverse Kinematics* sekaligus memvalidasi lintasan data *waypoint* secara virtual guna memblokir probabilitas benturan fisik; dan (3) Mengevaluasi efektivitas arsitektur transmisi data jaringan serta menarik tingkat penerimaan ergonomi (*usability*) perangkat lunak tersebut bagi pemahaman mahasiswa vokasi.

Sebagai nilai tambah akademis, pernyataan kontribusi dari hasil penelitian ini adalah penciptaan sebuah kerangka kerja antarmuka aplikasi simulasi *tele-teaching* imersif yang berhasil mengeliminasi secara penuh beban kognitif pemetaan ruang 2D ke 3D pada mahasiswa vokasi. Penelitian ini menyajikan kebaruan (*novelty*) melalui penerapan sistem validasi jalur terbang (*waypoint validation*) yang bertindak sebagai lapis perisai otonom di dimensi siber sebelum instruksi pergerakan diterjemahkan oleh perangkat lunak mesin fisik. Implementasi integratif dari penelitian ini diproyeksikan dapat memberikan landasan teori dan praktik baru yang mampu mengatasi rasio antrean praktikum laboratorium, meminimalisasi waktu henti (*downtime*) mesin akibat kecelakaan prosedural, serta menghadirkan lompatan standarisasi baru dalam pelatihan kompetensi otomasi cerdas yang mandiri dan tanpa risiko di era revolusi industri modern.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Pelaksanaan penelitian dan rekayasa siber-fisik ini disusun secara sistematis dengan mengadopsi kerangka kerja *Research and Development* (R&D) yang diselaraskan dengan siklus hidup *Rapid Application Development* (RAD) untuk mempercepat pembuatan purwarupa aplikasi secara iteratif[5][9]. Untuk memenuhi standarisasi penulisan ilmiah yang ketat, tahapan penelitian dan penerapan solusi teknologi digambarkan secara terintegrasi dalam struktur blok operasional pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

Pembahasan mendalam mengenai implementasi solusi pada setiap tahapan di dalam bagan dijabarkan sebagai berikut:

a. Identifikasi Kebutuhan Sistem & Spesifikasi Manipulator

Fase inisiasi difokuskan pada analisis parameter fisik dari fasilitas yang dituju. Langkah ini mencakup pemetaan geometris ruang kerja (*workspace*) pada fasilitas SmartEdu-Station, serta identifikasi secara detail mengenai batas operasional dan derajat kebebasan (*Degree of Freedom/DoF*) pada unit robot manipulator yang digunakan[1][3]. Data spesifikasi ini menjadi acuan absolut agar sistem komputasi virtual nantinya tidak melewati batas kemampuan mekanis alat aslinya.

b. Rekayasa Model Digital Twin

Pada tahapan ini, wujud fisik manipulator ditransformasikan menjadi representasi digital (*Digital Twin*). Dilakukan reduksi poligon (*decimation*) pada komponen 3D memanfaatkan perangkat lunak Blender agar pemrosesan grafis pada *Virtual Reality* berjalan ringan. Setelah aset 3D dioptimasi, proses dilanjutkan dengan menyusun konfigurasi hierarki kerangka engsel (*rigging*) di dalam Unity Engine agar simulasi pergerakan sendi identik dengan mekanika robot aslinya[13][16].

c. Implementasi Algoritma Kinematika

Tahap ini merupakan inti komputasi dari sistem yang dirancang. Logika pergerakan direkayasa melalui kodifikasi matematika *Inverse Kinematics* (IK) 6-DoF untuk mengubah input koordinat spasial menjadi derajat putaran sendi lengan robot[4]. Bersamaan dengan itu, dibangun infrastruktur jaringan siber untuk menjembatani komunikasi data dua arah antara lingkungan virtual dan kontroler robot fisik memanfaatkan protokol TCP/IP dan antarmuka *Real-Time Data Exchange* (RTDE)[17].

d. Pengujian Sistem

Fase pengujian dilakukan secara terpadu melalui dua pendekatan. Pertama, melakukan pengujian *Teaching* pada lingkungan VR untuk memvalidasi algoritma pelacakan dan memastikan rancangan lintasan terekam dengan aman di dunia maya[18]. Kedua, pengujian pada *controller* virtual Reality untuk memastikan setiap tombolnya berfungsi dengan baik[10].

e. Evaluasi Sistem

Tahap akhir difokuskan pada penilaian dari sisi interaksi pengguna terhadap sistem yang telah dibangun. Evaluasi dilakukan dengan melibatkan subjek penelitian menggunakan instrumen kuesioner global *System Usability Scale* (SUS) guna mengukur tingkat penerimaan operator dan kebergunaan antarmuka aplikasi VR[13][14].

2.2 Implementasi Algoritma *Inverse Kinematics*

Komputasi kontrol pergerakan lengan robot virtual pada sistem *direct teaching* ini bergantung penuh pada penyelesaian matematis *Inverse Kinematics* (IK). Secara fungsional, algoritma IK bertugas mentransformasikan masukan posisi (x, y, z) dan orientasi ruang tiga dimensi dari *VR controller* di dalam ruang Cartesian menjadi parameter sudut putar enam engsel mekanis ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$) yang dapat dipahami oleh kontroler robot[4][14].

Manipulator industri UR5e merupakan jenis robot antropomorfik dengan pergelangan tangan sferis (*spherical wrist*) yang memiliki struktur non-linier kompleks[1]. Penentuan solusi geometri secara analitis diturunkan dari matriks

transformasi homogen konvensi *Denavit-Hartenberg* (D-H), di mana posisi akhir *end-effector* dinyatakan sebagai perkalian matriks transformasi masing-masing sendi dari *base* (0) hingga komponen ujung 6, seperti tersaji pada Persamaan (1)[1]:

$$T_6^0 = A_1(\theta_1)A_2(\theta_2)A_3(\theta_3)A_4(\theta_4)A_5(\theta_5)A_6(\theta_6) \quad (1)$$

Tantangan fundamental dalam penyelesaian inversi matriks 6-DoF adalah timbulnya masalah solusi ganda (manipulator memiliki hingga 8 kemungkinan konfigurasi postur untuk satu koordinat Cartesian yang sama) serta ancaman kondisi singularitas (*singularity*)[5][1]. Singularitas terjadi ketika determinan dari matriks Jacobian J bernilai nol, yang merepresentasikan situasi di mana dua atau lebih sumbu sendi robot berada pada satu garis lurus, seperti konfigurasi *wrist singularity* pada sendi 4 dan 6. Dalam teleoperasi waktu-nyata, melewati titik singularitas ini akan memicu lonjakan pergerakan fisik mekanis yang tidak terkendali dan membahayakan struktur aktuator[8][9].

$$\Delta\theta = J^T(JJ^T + \lambda^2 I)^{-1}\Delta x \quad (2)$$

Di mana J^T merupakan transpose matriks Jacobian, I melambangkan matriks identitas, dan λ bertindak sebagai konstanta pembatas kecepatan rotasi[14]. Selain itu, fenomena kerusakan lintasan akibat pembalikan pergelangan (*wrist flip*) diselesaikan secara heuristik di dalam skrip C# Unity dengan menerapkan filter kedekatan Solusi. Sistem dipaksa untuk menyeleksi kombinasi sudut θ_i yang menghasilkan deviasi perpindahan terkecil ($\min \Delta\theta$) dibandingkan dengan riwayat posisi sendi sebelumnya. Pendekatan ini memastikan pergerakan *Digital Twin* robot tetap konsisten dan terbebas dari sabetan rotasi mendadak selama proses perekaman lintasan berlangsung[6].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap ini menguraikan hasil dari implementasi arsitektur siber-fisik yang telah dirancang, penjabaran operasional algoritma secara komprehensif dalam menyelesaikan masalah *direct teaching*, serta analisis kritis terhadap data hasil pengujian sistem. Evaluasi dibagi menjadi pengujian fungsionalitas komputasi ruang maya, pengujian keandalan transmisi data aktual (termasuk skenario jaringan ekstrem), dan pengujian ergonomi kognitif antarmuka.

3.1 Implementasi Lingkungan Digital Twin dan Antarmuka Pengguna

Realisasi dari tahap perancangan diawali dengan konstruksi ekosistem *Digital Twin* di dalam *Unity Engine*. Lingkungan laboratorium fisik SmartEdu-Station direplikasi secara presisi ke dalam ruang tiga dimensi. Model 3D lengan robot yang telah melewati proses *decimation* poligon disusun ulang hierarki kerangka engselnya (*rigging*) agar selaras dengan rentang pergerakan fisik aslinya, yakni rotasi 360° untuk sendi *Base* dan *Wrist*, serta limitasi spesifik pada sendi *Shoulder* dan *Elbow*[1].



Gambar 2 Tampilan Lingkungan Digital Twin

Guna memecahkan masalah tingginya beban kognitif pada penggunaan *teach pendant* fisik, sistem ini menghadirkan antarmuka pengguna (UI/UX) berbasis *World Space Canvas*. Antarmuka ini dirancang melayang secara imersif di sekeliling pengguna dan dapat diintervensi menggunakan pancaran sinar proyektil (*raycaster*) dari *VR controller*. Elemen visual terpenting yang diimplementasikan adalah *Line Renderer*, sebuah komponen grafis yang secara waktu-nyata menggambarkan garis jejak lintasan ruang (lintasan proyektil *waypoint*) dari titik A ke titik B. Visualisasi prediktif ini secara fundamental mengubah cara mahasiswa belajar; mereka tidak lagi meraba-raba posisi koordinat Cartesian secara abstrak, melainkan dapat melihat secara langsung bentuk geometri dari jalur pergerakan robot sebelum instruksi tersebut dikirimkan ke mesin aslinya[19].

3.2 Uraian Tahapan Algoritma dan Pengujian Fungsionalitas Modul Teaching

Inti penyelesaian masalah pada penelitian ini bertumpu pada keberhasilan algoritma *Inverse Kinematics* (IK) 6-DoF dalam menerjemahkan niat operator menjadi parameter mekanis yang aman. Proses tahapan algoritma ini bekerja secara berurutan dalam hitungan milidetik (*frame per second*) untuk menyelesaikan masalah *trajectory programming*:

- Penangkapan Masukan (*Input Capture*): Algoritma secara kontinu membaca nilai posisi matriks translasi (x, y, z) dan orientasi (Euler angles Roll, Pitch, Yaw) dari kepala tangan operator melalui pelacakan *controller* Meta Quest 3.



- b. Kalkulasi Inversi Matriks: Input tersebut dimasukkan ke dalam fungsi IK berbasis *Denavit-Hartenberg*. Matriks Jacobian dihitung untuk memetakan kecepatan gerak *end-effector* terhadap kecepatan putaran keenam sendi[4].
- c. Filtrasi Singularitas dan *Wrist Flip*: Algoritma mengevaluasi apakah pergerakan tangan operator mengarahkan robot ke titik *singularity* (misalnya sumbu sendi 4 dan 6 sejajar). Jika terdeteksi, algoritma numerik *Damped Least Squares* (DLS) secara otonom menyuntikkan faktor redaman (λ) untuk membatasi percepatan sudut engsel. Algoritma kemudian memilih konfigurasi postur dengan deviasi sudut terkecil untuk mencegah sabitan *wrist flip* mendadak[14].
- d. Validasi Batas Keamanan (*Limit Checker*): Sebelum memproyeksikan visual ke lengan robot maya, sistem memvalidasi nilai derajat (θ_i) hasil kalkulasi. Jika ada engsel yang dipaksa berputar melebihi limit fisik aslinya (misalnya tangan operator menjangkau terlalu jauh), algoritma akan menghentikan render postur, membekukan *Digital Twin* di batas maksimumnya, dan memicu status *out-of-reach*.
- e. Perekaman Memori Sesional: Jika pengguna menekan tombol rekam, susunan derajat sendi yang lolos validasi ini didorong (*push*) ke dalam tabel antrean *array* sementara sebagai *waypoint* yang siap dieksekusi[6].

Untuk memastikan seluruh tahapan logis algoritma di atas berjalan selaras, dilakukan pengujian perangkat lunak berbasis *Black Box*. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Fungsionalitas Modul *Teaching*

Skenario Pengujian	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Status
Menekan tombol <i>grab</i> pada <i>controller</i> kanan	<i>End-effector</i> menyala kuning, dan lengan menggenggam (<i>grab</i>) proyektil <i>end-effector</i> .	Sesuai, lengan maya bergerak secara <i>real-time</i> dan presisi merespons instruksi.	Berhasil
Menggerakkan lengan robot ke posisi yang berbeda	Posisi koordinat (x,y,z) tersimpan ke memori sementara.	Sesuai, log sistem mencatat penambahan <i>array</i> koordinat.	Berhasil
Menekan tombol X pada <i>controller</i> kanan	Robot bergerak menuju titik koordinat yang sudah tersimpan pada memori sementara.	Sesuai, robot bergerak ketika tombol X ditekan menyusuri titik yang sudah ditentukan.	Berhasil
Menggerakkan <i>controller</i> melampaui radius maksimal robot	Sendi (<i>joint</i>) pada robot tidak terpisah dan tidak melebihi batas radius jangkauan mekanis robot.	Sesuai, struktur sendi tidak terpisah dan postur lengan maya tidak keluar dari batas radius.	Berhasil
Menekan tombol Y pada <i>controller</i> tangan kiri	Menghapus seluruh data <i>waypoint</i> yang ada di memori sementara.	Sesuai, pada saat dieksekusi menggunakan <i>controller</i> kanan, robot tidak bergerak karena data memori sementara telah terhapus.	Berhasil

Berdasarkan Tabel 1, seluruh fondasi algoritma *teaching* dan perlindungan operasional telah beroperasi dengan tingkat keberhasilan 100%. Kemampuan sistem merespons interaksi tombol (*grab*, rekam, eksekusi, dan hapus) secara presisi ini memastikan bahwa mahasiswa memiliki kontrol penuh di dunia maya sebelum instruksi dikirim ke mesin aslinya.

3.3 Pengujian Transmisi Data ke Robot Fisik dan Analisis Worst-Case Scenario

Uji ketahanan selanjutnya diarahkan pada sektor infrastruktur komunikasi. Data sasaran lintasan (*waypoint*) yang telah lolos uji di dunia maya akan dikompilasi menjadi sebuah *payload* berbasis bahasa URScript. Paket data ini ditransfer melintasi jaringan socket TCP/IP dari purwarupa aplikasi klien VR menuju perangkat keras lengan robot[4]. Sebaliknya, status putaran nyata dari enkoder robot dibaca kembali oleh mesin VR melalui layanan *Real-Time Data Exchange* (RTDE).

Tabel 2. Hasil Pengujian Fungsionalitas Modul *Teaching*

Percobaan Ke-	Jumlah Waypoint	Status Pengiriman (TCP/IP)	Waktu Jeda Eksekusi (detik)	Status Eksekusi Robot Fisik
1	2 Titik	100% Terkirim	0.45	Sukses, bergerak mulus
2	5 Titik	100% Terkirim	0.52	Sukses, bergerak mulus
3	5 Titik	100% Terkirim	0.48	Sukses, bergerak mulus
4	10 Titik	100% Terkirim	0.61	Sukses, interpolasi tepat
5	10 Titik	100% Terkirim	0.58	Sukses, interpolasi tepat
6	15 Titik	100% Terkirim	0.73	Sukses, pergerakan kompleks stabil
7	15 Titik	100% Terkirim	0.70	Sukses, pergerakan kompleks stabil
8	20 Titik	100% Terkirim	0.85	Sukses, lintasan panjang presisi
9	20 Titik	100% Terkirim	0.88	Sukses, lintasan panjang presisi
10	25 Titik	100% Terkirim	0.96	Sukses, operasi penuh tanpa <i>error</i>

Data pada Tabel 2 mendemonstrasikan bahwa sistem komunikasi data yang dibangun memiliki tingkat reliabilitas yang absolut pada kondisi operasional normal. Waktu jeda (*delay*) sejak mahasiswa menekan tombol "Execute" di VR



hingga lengan fisik mekanis mulai mengayun di laboratorium tercatat sangat responsif, rata-rata konsisten di bawah ambang batas 1 detik.

3.3.1 Analisis Skenario Terburuk (Worst-Case Scenario) pada Jaringan

Keandalan sebuah arsitektur kontrol robotika modern tidak hanya dinilai dari performanya di kondisi ideal, tetapi juga pada resiliensinya saat dihadapkan pada gangguan infrastruktur yang parah. Pada skenario terburuk (*worst-case scenario*), lalu lintas jaringan lokal (WLAN) di dalam institusi pendidikan sering kali mengalami lonjakan kepadatan pengguna (*traffic congestion*), yang dapat memicu ketidakstabilan rute, pelonjakan latensi (*ping* > 500 ms), hingga hilangnya sebagian paket data yang dikirim (*packet loss*).

Jika penelitian ini menggunakan metode *teleoperation real-time* yang terus-menerus mengirimkan aliran (*streaming*) koordinat Cartesian secara seketika[9], lonjakan latensi akan langsung berakibat pada diskontinuitas pergerakan manipulator UR5e. Robot akan bergerak tersendat-sendat (*stuttering*), menghentak tak beraturan akibat paket data yang datang terlambat atau tidak berurutan, dan pada akhirnya akan memicu pengaktifan fitur *Protective Stop* dari perangkat keras UR akibat anomali percepatan gaya yang melanggar protokol keamanan mekanis.

Namun, sistem *Offline Direct Teaching* yang dirancang pada riset ini menawarkan mekanisme mitigasi tingkat tinggi untuk menangkis *worst-case scenario* tersebut. Algoritma perancangan pada Bab 2 merekayasa agar instruksi koordinat tidak dikirim secara *streaming*, melainkan dikelompokkan (*batching*) ke dalam satu antrean larik (*array*) URScript utuh. Saat terjadi gangguan jaringan (seperti latensi ekstrem atau putusnya koneksi sementara), pengiriman paket akan menggunakan sistem *buffer* protokol Transmission Control Protocol (TCP) yang menjamin keutuhan berkas. Robot fisik tidak akan memulai pergerakannya sampai seluruh *array waypoint* terkirim, tervalidasi utuh, dan diterima oleh register internal kontroler UR. Seandainya koneksi internet terputus total saat lengan robot sedang berada di tengah manuver perjalanan dari satu *waypoint* ke *waypoint* lainnya, mesin fisik tidak akan lepas kendali. Robot tetap akan menyelesaikan rute perjalanan lintasan yang sebelumnya telah diinjeksikan secara mandiri, lalu melakukan deselerasi dan berhenti secara otonom di titik koordinat terakhir yang sah[10], memastikan keselamatan lingkungan lab tetap terjamin 100%.

3.4 Evaluasi Kebergunaan Antarmuka (System Usability Scale)

Implementasi teknologi secanggih apa pun tidak akan berdampak secara akademis jika desain perangkat lunaknya membebani penggunanya. Untuk mengukur efektivitas ergonomi kognitif dari arsitektur perangkat lunak yang dikembangkan, dilakukan pengujian kuantitatif persepsi pengguna akhir memanfaatkan kerangka pengukuran empiris *System Usability Scale* (SUS)[13]. Kuesioner terdiri dari 10 pernyataan (5 pernyataan positif dan 5 negatif berselang-seling) dengan rentang penskalaan Likert. Pengujian ini melibatkan 10 orang responden dari kelompok pengguna representatif (mahasiswa). Distribusi konversi skor akhir responden dijabarkan secara rinci pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Fungsionalitas Modul *Teaching*

Kode Responden	Total Skor Mentah (Positif + Negatif)	Hasil Konversi Skor Akhir SUS (Total x 2.5)	Kategori Penerimaan (<i>Acceptability</i>)
R1	30	75.0	Acceptable (Good)
R2	32	80.0	Acceptable (Excellent)
R3	37	92.5	Acceptable (Excellent)
R4	31	77.5	Acceptable (Good)
R5	34	85.0	Acceptable (Excellent)
R6	25	62.5	Marginal (OK)
R7	38	95.0	Acceptable (Excellent)
R8	29	72.5	Acceptable (Good)
R9	27	67.5	Marginal (OK)
R10	33	82.5	Acceptable (Excellent)
Rata-Rata	31.6	79.0	Tingkat Penerimaan: BAIK (Good)

Berdasarkan komputasi pada Tabel 3, diperoleh nilai akumulasi rata-rata skor SUS sebesar 79,0. Merujuk pada standarisasi kelayakan perangkat lunak global, skor yang bertengger di atas ambang batas kritis (68,0) menandakan bahwa prototipe sistem telah memenuhi standar "layak guna" (*usable*). Skor agregat 79,0 mengklasifikasikan perangkat lunak aplikasi simulasi ini ke dalam kategori tingkat penerimaan Baik (*Good / Acceptable*).

Meskipun terdapat dua responden (R6 dan R9) yang memberikan skor pada rentang *Marginal (OK)*, hal tersebut wajar terjadi pada pengujian formatif purwarupa tingkat menengah karena adanya perbedaan tingkat adaptasi awal setiap individu terhadap lingkungan *Virtual Reality*. Namun, secara keseluruhan, mayoritas responden (8 dari 10) memberikan penilaian sangat positif pada rentang *Good* hingga *Excellent*.

Secara kualitatif, indikator dominan ini membuktikan bahwa peletakan komponen antarmuka, tata letak *World Space Canvas*, dan logika perekaman koordinat (*waypoint*) dirasa sangat logis, bebas hambatan, serta tidak menuntut kurva pembelajaran teknis (*learning curve*) yang terlampau curam. Keterlibatan 10 responden dalam fase pengujian ini



memberikan pijakan data yang solid untuk memvalidasi bahwa transisi metode pemrograman spasial dari *teach pendant* fisik menuju pengontrol VR terbukti efektif memangkas kompleksitas tugas instruksional di lingkungan laboratorium otomasi[14].

3.5 Pembahasan

BerdRangkaian panjang evaluasi unjuk kerja, mulai dari ketahanan komputasi algoritma *Inverse Kinematics* (IK) 6-DoF, resiliensi transmisi jaringan hibrida (TCP/IP dan RTDE), hingga pencapaian skor ergonomi SUS di angka 79,0 (Kategori Baik), secara kolektif membuktikan bahwa sistem aplikasi *teaching* manipulator berbasis *Digital Twin* ini memegang peranan vital dalam mendisrupsi model pembelajaran otomasi tradisional. Sistem ini secara sukses menyelesaikan kelemahan fundamental dari penggunaan perangkat *teach pendant* fisik yang kaku.

Saat temuan penelitian ini dikomparasikan secara bersilangan dengan literatur mutakhir, terlihat jelas kebaruan teknis (*novelty*) yang dikontribusikan. Riset terdahulu yang dilakukan oleh Wirayudha dkk.[4] telah membangun fondasi simulasi kendali robot lengan di VR, namun lingkungan tersebut masih bersifat *open-loop* (tidak dapat menggerakkan motor fisik eksternal) dan disederhanakan murni pada mekanika robot lengan 4-DoF. Penelitian ini melampaui batasan matematis tersebut secara signifikan dengan mengalkulasi secara simultan 6 sumbu pergerakan non-linier secara tertutup (*closed-loop*). Modifikasi algoritma IK yang menggunakan *Damped Least Squares* (DLS) terbukti esensial dan berhasil menangkal kelemahan ruang sferis seperti *wrist singularity* pada robot berskala industri sekelas UR5e[1], sebuah isu yang sering kali diabaikan pada simulasi robotika tingkat dasar.

Selanjutnya, tinjauan komparatif terhadap penelitian integrasi komunikasi yang dikerjakan oleh Luu dkk.[9] dan Audonnet dkk. [20] memperlihatkan bahwa mayoritas riset sebelumnya terobsesi mengejar performa arsitektur kendali proksi dengan latensi ultra-rendah untuk kebutuhan teleoperasi sinkron spontan (*real-time puppeteering*). Meskipun sistem mereka unggul secara metrik kecepatan jaringan, pendekatan seketika tersebut justru berimplikasi sangat fatal jika diterapkan secara mentah di dalam kurikulum edukasi vokasi. Sebagaimana dijabarkan pada analisis skenario jaringan terburuk, pendekatan sinkron murni gagal meredam *human jitter* (getaran keraguan tangan alami dari mahasiswa pemula). Getaran ini akan langsung direplikasi oleh robot industri nyata, mengamplifikasi risiko tabrakan ekstrem akibat eksekusi pergerakan fisik yang tidak disengaja.

Merespons *gap* keamanan struktural tersebut, penelitian ini dengan sengaja memutar arah paradigma dan mengajukan arsitektur *Offline Direct Teaching* yang terkalibrasi ke dalam siklus *Pre-Flight Check*. Fitur pembeda absolut berupa garis prediktif visual 3D (*Line Renderer*) dan pengunci batasan rentang keselamatan (*out-of-reach barrier lock*) terbukti efektif menjadi filter pengaman berlapis. Sistem secara cerdas mendelegasikan beban validasi spasial sepenuhnya kepada ruang proksi siber (komputasi Unity Engine) sebelum hierarki instruksi diserahkan ke perangkat keras aktuator.

Pada akhirnya, implikasi terapan dari implementasi solusi siber-fisik pada platform SmartEdu-Station ini sanggup memecahkan hambatan logistik terkait rasio pembelajaran (ketimpangan jumlah alat fisik dan jumlah mahasiswa) di lingkungan institusi pendidikan[3]. Proses manipulasi ruang tiga dimensi yang tadinya sangat abstrak dan membebani kognitif kini dapat dieksekusi secara iteratif melalui kontroler VR. Inovasi ini tidak hanya mencegah kerusakan perangkat keras akibat malapraktik, tetapi juga meruntuhkan tembok ketakutan teknis mahasiswa pemula, serta memberikan landasan metodologi instruksional otomasi yang jauh lebih interaktif, aman, dan berwawasan masa depan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merealisasikan sistem *Offline Direct Teaching* otonom pada manipulator industri UR5e dengan mengintegrasikan komputasi *Inverse Kinematics* (IK) termodifikasi *Damped Least Squares* (DLS) di dalam ekosistem *Virtual Reality* dan *Digital Twin*, yang secara empiris terbukti mengeliminasi risiko sabetan singularitas dan tabrakan struktural selama proses pemrograman lintasan. Selama proses pengujian berlangsung, arsitektur komunikasi hibrida soket TCP/IP dan antarmuka RTDE mencatatkan tingkat keberhasilan transmisi paket instruksi *waypoint* sebesar 100% dengan rata-rata jeda waktu respons eksekusi mekanis yang konsisten berada di bawah 1 detik pada kondisi jaringan ideal. Selanjutnya, evaluasi ergonomi kognitif berbasis *System Usability Scale* (SUS) terhadap 10 responden menghasilkan skor 79,0 (Kategori Baik), yang secara konkret mengonfirmasi bahwa visualisasi prediktif antarmuka ruang maya efektif memangkas kompleksitas navigasi tiga dimensi bagi mahasiswa. Meskipun sistem ini telah terbukti sukses meruntuhkan hambatan rasio ketersediaan alat laboratorium secara interaktif dan aman, implementasi rekayasa ini secara objektif masih memiliki batasan (limitasi) inheren, di mana arsitektur kendali sangat bergantung pada kestabilan jaringan area lokal (WLAN/TCP/IP) yang rentan terhadap lonjakan latensi saat terjadi kepadatan lalu lintas data, serta adanya potensi degradasi akurasi pelacakan sensor spasial pada perangkat *Head Mounted Display* (HMD) apabila sistem dioperasikan pada kondisi lingkungan fisik dengan intensitas pencahayaan atau tata letak ruang yang berubah-ubah secara dinamis.

REFERENCES

- [1] M. C. Castells, M. Puig i Vidal, and L. S. Serapio, "Control of a UR5e robotic arm through a simulate 2D camera," pp. 3–8, 2020.
- [2] D.-A. Ciungan *et al.*, "Enhancing IoT Education Through Hybrid Robotic Arm Integration: A Quantitative and Qualitative Student Experience Study," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 19, p. 10537, 2025, doi: 10.3390/app151910537.
- [3] B. S. H. Alsoliman, "Virtual robotics in education: The experience of eighth grade students in STEM," *Front. Educ.*, vol. 7, no.



- July, pp. 1–12, 2022, doi: 10.3389/feduc.2022.950766.
- [4] M. F. Wirayudha, G. W. Wiriasto, and Paniran, “Prototype Model 3D Robot Lengan dan Simulasi Kendali Pergerakan pada 4-DOF Berbasis Virtual Reality,” *J. Ilm. Kaji. Teor. dan Apl. Tek. Elektro*, vol. 11, no. 2, pp. 159–166, 2024, [Online]. Available: www.petercork.com
 - [5] W. Chang, W. Sun, P. Chen, and H. Xu, “Construction and Validation of a Digital Twin-Driven Virtual-Reality Fusion Control Platform for Industrial Robots,” *Sensors*, vol. 25, no. 13, 2025, doi: 10.3390/s25134153.
 - [6] Y. Wu, B. Zhao, and Q. Li, “The Teleoperation of Robot Arms by Interacting with an Object’s Digital Twin in a Mixed Reality Environment,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 7, pp. 1–18, 2025, doi: 10.3390/app15073549.
 - [7] B. R. Galarza, P. Ayala, S. Manzano, and M. V. Garcia, “Virtual Reality Teleoperation System for Mobile Robot Manipulation,” *Robotics*, vol. 12, no. 6, 2023, doi: 10.3390/robotics12060163.
 - [8] K. Wan, C. Li, F. S. Lo, and P. Zheng, “A virtual reality-based immersive teleoperation system for remote human-robot collaborative manufacturing,” *Manuf. Lett.*, vol. 41, pp. 43–50, 2024, doi: 10.1016/j.mfglet.2024.09.008.
 - [9] T. Luu *et al.*, “Enhancing real-time robot teleoperation with immersive virtual reality in industrial IoT networks,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 139, no. 11–12, pp. 6233–6257, 2025, doi: 10.1007/s00170-025-16236-w.
 - [10] F. P. Audonnet, J. Grizou, A. Hamilton, and G. Aragon-Camarasa, “TELESIM: A Modular and Plug-and-Play Framework for Robotic Arm Teleoperation using a Digital Twin,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 17770–17777, 2024, doi: 10.1109/ICRA57147.2024.10610935.
 - [11] “Version of Record: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920311479>,” pp. 1–35, 2020.
 - [12] J. D. Setiawan, Y. F. Dwiyanto, and M. Munadi, “Pengembangan User Interface Aplikasi Simulasi Robot Arm Manipulator Berbasis Augmented Reality,” *Rotasi*, vol. 26, no. 1, pp. 44–51, 2024, doi: 10.14710/rotasi.26.1.44-51.
 - [13] F. Zanatta, A. Giardini, A. Pierobon, M. D’Addario, and P. Steca, “A systematic review on the usability of robotic and virtual reality devices in neuromotor rehabilitation: patients’ and healthcare professionals’ perspective,” *BMC Health Serv. Res.*, vol. 22, no. 1, pp. 1–16, 2022, doi: 10.1186/s12913-022-07821-w.
 - [14] Z. Chen, Y. J. Yoon, R. Bautista-Montesano, Z. Zhao, A. Mandlekar, and J. Liu, “TeleopLab: Accessible and Intuitive Teleoperation of a Robotic Manipulator for Remote Labs,” 2025, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2509.05547>
 - [15] X. Wang, S. Guo, Z. Xu, Z. Zhang, Z. Sun, and Y. Xu, “A robotic teleoperation system enhanced by augmented reality for natural human robot interaction,” *Cyborg Bionic Syst.*, vol. 5, pp. 1–12, 2024, doi: 10.34133/cbsystems.0098.
 - [16] Ridwan, Y. Erdani, Sarosa Castrena Abadi, M. D. Anugrah, Abdur Rohman Harits Martawireja, and Rizqi Aji Pratama, “Developing Sorting Algorithm for SmartEdu Conveyor using Computer Vision Technology,” *Inform. J. Ilmu Komput.*, vol. 21, no. 3, pp. 207–213, 2025, doi: 10.52958/iftk.v21i3.12434.
 - [17] N. Terras *et al.*, “Integration of Deep Learning Vision Systems in Collaborative Robotics for Real-Time Applications,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 3, 2025, doi: 10.3390/app15031336.
 - [18] S. P. Arunachalam, I. Guzey, S. Chintala, and L. Pinto, “Holo-Dex: Teaching Dexterity with Immersive Mixed Reality,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2023-May, pp. 5962–5969, 2023, doi: 10.1109/ICRA48891.2023.10160547.
 - [19] S. Andy, I. S. Surya, and S. Fidelis, “Pengenalan Teknologi Virtual Reality (Vr) Pada Pembelajaran Simulasi Pembuatan Komputer Di Jurusan Teknik Informasi Dan Jaringan (Tkj),” *J. Ilm. Tek.*, vol. 2, no. 3, pp. 33–42, 2023.
 - [20] A. C. Bavelos, E. Anastasiou, N. Dimitropoulos, G. Michalos, and S. Makris, “Virtual reality-based dynamic scene recreation and robot teleoperation for hazardous environments,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 392–408, 2025, doi: 10.1111/mice.13337.