

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penyandang disabilitas merupakan individu yang mengalami hambatan dalam menjalankan aktivitas sehari-hari akibat gangguan pada fungsi fisik, mental, maupun sensorik[1]. Salah satu kondisi disabilitas yang memiliki dampak signifikan terhadap kemandirian individu adalah tetraplegia, yaitu kondisi kelumpuhan yang menyebabkan keterbatasan atau hilangnya kemampuan gerak pada sebagian besar anggota tubuh akibat cedera saraf tulang belakang, penyakit neurologis, maupun gangguan sistem saraf motorik. Kondisi tersebut menyebabkan individu mengalami kesulitan dalam melakukan aktivitas dasar seperti mengambil, memindahkan, maupun memanipulasi objek di lingkungan sekitar secara mandiri[2].

Data statistik kependudukan dari Badan Pusat Statistik (BPS) merepresentasikan skala urgensi yang tinggi terkait penyandang disabilitas di Indonesia, dengan total populasi mencapai 22,97 juta jiwa atau sekitar 8,5 persen dari jumlah penduduk. Rincian lebih mendalam melalui hasil Long Form Sensus Penduduk 2020 mencatat bahwa prevalensi penyandang disabilitas kategori sedang hingga berat (Tipe 1) berada pada angka 6,42 persen. Profil disabilitas nasional ini tidak hanya didominasi oleh kelompok usia lanjut, tetapi juga mencatatkan kontribusi demografi yang sangat krusial pada usia produktif (15-64 tahun). Diperkirakan sekitar 2,9 juta individu dengan disabilitas kategori sedang hingga berat berada pada rentang usia kerja tersebut[3]. Selain itu, laporan penelitian dari BKF-Prospera pada tahun 2024 menunjukkan bahwa sekitar 60% penyandang disabilitas sedang hingga berat belum menggunakan perangkat bantu teknologi yang memadai untuk menunjang aktivitas sehari-hari[4]. Kondisi ini menunjukkan adanya kebutuhan besar terhadap pengembangan teknologi asistif yang mampu membantu pengguna melakukan aktivitas secara lebih mandiri.

Pendekatan strategis dalam bidang *assistive robotics* untuk menjawab tantangan tersebut adalah pemanfaatan robot manipulator sebagai perangkat pengganti fungsi lengan manusia[5]. Robot manipulator merupakan sistem robotik yang terdiri dari rangkaian *link*, *joint*, serta *end effector* yang dirancang untuk melakukan tugas manipulasi objek seperti mengambil, memindahkan, dan meletakkan benda secara presisi[6][7]. Kemampuan tersebut menjadikan robot manipulator berpotensi digunakan sebagai perangkat asistif bagi individu dengan keterbatasan mobilitas motorik. Dalam pengoperasiannya, robot manipulator memerlukan metode perhitungan gerak yang presisi agar *end effector* dapat mencapai posisi target secara akurat[8]. Salah satu metode yang umum digunakan adalah *inverse kinematics*, yaitu metode untuk menentukan sudut setiap *joint*

berdasarkan posisi tujuan yang diinginkan. Dengan penerapan *inverse kinematics*, robot manipulator dapat bergerak menuju koordinat objek secara efisien dan stabil[9].

Pengoperasian robot manipulator bagi penderita tetraplegia menuntut antarmuka yang tidak memerlukan intervensi fisik sama sekali, seperti *Brain-Computer Interface (BCI)* berbasis sinyal *Electroencephalography (EEG)*[10]. Selain aktivitas kognitif utama, sinyal EEG juga mengandung artefak fisiologis yang dihasilkan akibat pergerakan mata maupun aktivitas otot wajah seperti gerakan rahang. Artefak EEG memiliki karakteristik amplitudo yang relatif jelas sehingga dapat dimanfaatkan sebagai media kendali yang responsif dan mudah digunakan dalam sistem *real-time*[11].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi kendali robot menggunakan sinyal biopotensial ini, namun masih menyisakan keterbatasan fundamental. Suhaimi dkk. (2023) menggunakan sinyal *Electrooculography (EOG)* yang dikombinasikan dengan kamera, namun redaman sinyal melalui kulit menyebabkan galat estimasi arah pandang yang signifikan sehingga gagal menunjuk objek secara akurat[12]. Karas dkk. (2023) berupaya mendeteksi artefak mata dari sinyal EEG menggunakan pendekatan *rule-based* berbasis *threshold*, namun metode ini terbukti rentan terhadap variabilitas biologis antarpengguna dan belum memiliki mekanisme konfirmasi untuk mencegah eksekusi yang tidak disengaja[13]. Penelitian lain oleh Lu dkk. (2022) mengintegrasikan ekspresi wajah dengan EEG, tetapi sistemnya masih terbatas pada kendali dua dimensi (2D) tanpa otomasi visi komputer[14]. Pada ranah klasifikasi, Megalingam dkk. (2024) mengoptimasi algoritma *Convolutional Neural Network (CNN)* untuk kendali berbasis *motor imagery (MI)*. Kendali berbasis MI atau *evoked potential* menuntut pelatihan mental yang intensif, membutuhkan konsentrasi tinggi, dan memerlukan sesi kalibrasi panjang yang melelahkan bagi pengguna. Sebagian besar sistem ini juga masih menggunakan metode *scanning menu* bertingkat yang sangat memperlambat waktu respons interaksi[15].

Tinjauan literatur menunjukkan bahwa pengembangan teknologi asistif bagi penderita disabilitas motorik berat, seperti tetraplegia, masih menghadapi kendala krusial dalam memberikan kemandirian beraktivitas. Kendala utama tersebut meliputi rentannya metode deteksi sinyal biosinyal terhadap *noise*, minimnya integrasi penuh antara sistem *Brain-Computer Interface (BCI)* dan visi komputer untuk otomasi pengambilan objek di ruang tiga dimensi (3D), serta belum adanya arsitektur kendali yang memetakan instruksi secara langsung (*Direct Command Mapping*) dengan dilengkapi sistem pengaman (*safety mechanism*) berupa artefak konfirmasi dari organ tubuh yang masih fungsional.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan purwarupa sistem kendali robot manipulator *4-Degree of Freedom (4-DoF)* berbasis klasifikasi artefak *Electroencephalography (EEG)* menggunakan

Convolutional Neural Network (1D-CNN), yang diintegrasikan dengan visi komputer melalui pendekatan *Direct Command Mapping* untuk otomasi pengambilan objek. Sistem ini dirancang khusus memanfaatkan artefak lirikan mata dan gerakan rahang, mengingat kedua fungsi fisiologis tersebut umumnya tetap terjaga pada penderita tetraplegia. Mengingat keterbatasan dimensi fisik lengan manipulator saat ini belum memungkinkan penyerahan objek secara langsung kepada pengguna, penelitian ini diposisikan sebagai studi kelayakan teknis yang diharapkan mampu menjadi fondasi arsitektur kendali yang valid bagi pemulihan kemandirian beraktivitas pasien tetraplegia di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah utama dalam penelitian ini adalah bagaimana mengembangkan sistem kendali robot arm manipulator 4-DoF berbasis klasifikasi artefak *Electroencephalography* (EEG) yang terintegrasi dengan visi komputer, sehingga dapat menjadi solusi asistif bagi penyandang tetraplegia dalam melakukan aktivitas pengambilan objek secara mandiri?

Rumusan masalah utama tersebut dijabarkan ke dalam beberapa rumusan masalah khusus sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang arsitektur jaringan 1D-*Convolutional Neural Network* (1D-CNN) untuk mengekstraksi dan mengklasifikasikan artefak *Electroencephalography* (EEG) berupa lirikan mata dan gerakan rahang sebagai input kendali BCI secara *real-time*?
2. Bagaimana menyusun algoritma *Inverse Kinematics* yang diintegrasikan dengan sistem visi komputer berbasis kamera yang dipasang secara ortogonal untuk mengonversi koordinat piksel citra menjadi pergerakan robot manipulator 4-DoF di ruang tiga dimensi?
3. Bagaimana mengintegrasikan metode *Direct Command Mapping* dari hasil klasifikasi artefak EEG dengan sistem perencanaan lintasan (*path planning*) robot untuk mengeksekusi tugas pemilihan dan pengambilan objek secara otomatis?
4. Bagaimana tingkat akurasi dan performa sistem kendali terintegrasi tersebut, yang ditinjau dari parameter akurasi klasifikasi model 1D-CNN, presisi posisi *end-effector* robot, kecepatan waktu respons (*response time*), serta persentase tingkat keberhasilan (*success rate*) sistem secara keseluruhan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah mengembangkan purwarupa sistem kendali robot arm manipulator 4-DoF berbasis klasifikasi artefak EEG yang terintegrasi dengan visi komputer sebagai solusi asistif bagi penyandang tetraplegia. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini dijabarkan ke dalam

tujuan-tujuan khusus sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan arsitektur (1D-CNN) yang mampu mengekstraksi serta mengklasifikasikan artefak (EEG) berupa arah lirikan mata dan gerakan rahang sebagai input kendali antarmuka secara real-time.
2. Membangun algoritma *Inverse Kinematics* yang terintegrasi dengan sistem visi komputer berbasis kamera ortogonal untuk mengonversi koordinat piksel citra target menjadi pergerakan mekanis end-effector robot manipulator 4-DoF secara presisi di ruang tiga dimensi.
3. Mengintegrasikan metode *Direct Command Mapping* hasil klasifikasi artefak EEG dengan algoritma perencanaan lintasan (*path planning*) robot manipulator untuk mengeksekusi tugas pemilihan, pengambilan, dan pemindahan objek secara otomatis.
4. Menguji dan menganalisis tingkat akurasi serta performa sistem kendali terintegrasi secara komprehensif berdasarkan parameter akurasi klasifikasi model 1D-CNN, presisi posisi *end-effector*, kecepatan waktu respons (*response time*), serta persentase keberhasilan (*success rate*) sistem.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memastikan pendekatan yang lebih terfokus dan mencapai tujuan penelitian secara maksimal, penting untuk mengidentifikasi kendala-kendala yang mungkin terjadi. Batasan masalah untuk penelitian tugas akhir ini sebagai berikut.

1. Penelitian ini memanfaatkan lima pola artefak sinyal *Electroencephalography* (EEG) yaitu lirikan dan rahang sebagai input kendali langsung (*direct command*) robot manipulator.
2. Target pengambilan dibatasi pada objek dengan warna merah, biru dan hijau yang berbentuk kotak dengan dimensi maksimal panjang dan lebar 3,5 cm, serta tinggi minimal 1,5 cm.
3. Pengujian dilakukan pada kondisi orang normal.
4. Penelitian ini menggunakan dua kamera yang dipasang secara ortogonal.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan manfaat pada beberapa aspek berikut:

1. Bagi pengguna dengan disabilitas tetraplegia
Menyediakan purwarupa arsitektur kendali non-invasif yang berpotensi dikembangkan menjadi perangkat bantu pengambilan objek tanpa memerlukan intervensi fisik, memanfaatkan fungsi fisiologis (likiran mata, gerakan rahang) yang umumnya masih terjaga pada kondisi tersebut.
2. Bagi pengembangan keilmuan BCI

Memberikan bukti empiris mengenai efektivitas arsitektur 1D-CNN dalam mengklasifikasikan artefak EEG sebagai sinyal kendali langsung (bukan sinyal motor imagery), sekaligus mendokumentasikan integrasi Direct Command Mapping dengan visi komputer berbasis kamera ganda yang belum banyak dieksplorasi pada arsitektur serupa.

3. Bagi pengembangan robot manipulator asistif

Menyajikan skema integrasi antara klasifikasi sinyal biopotensial, inverse kinematics, dan path planning yang dapat menjadi rujukan teknis bagi pengembangan sistem serupa dengan jumlah derajat kebebasan (DoF) atau modalitas sinyal yang berbeda.

4. Bagi penelitian lanjutan

Menyediakan dataset EEG artefak (linikan mata dan gerakan rahang) beserta pipeline pemrosesan 1D-CNN yang dapat digunakan sebagai baseline atau titik awal bagi penelitian tugas akhir maupun riset lanjutan di lingkungan Departemen Teknik Elektro UNAND.

1.6 Sistematika Penulisan

Pembagian laporan tugas akhir ini disusun secara sistematis agar lebih mudah dipahami sesuai dengan panduan penulisan tugas akhir Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Andalas. Sistematika penulisan laporan dipaparkan sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan susunan penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan pembahasan mengenai dasar-dasar teori yang mendukung penelitian ini.

BAB III METODOLOGI

Bab ini memuat penjelasan mengenai jenis dan langkah-langkah yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang dibahas dalam penelitian.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini memuat Hasil dan Analisa, Berisi tentang hasil pengujian dan analisis data, termasuk perbandingan pengukuran yang dihasilkan oleh sistem dengan pengukuran aktual. Pembahasan dilakukan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi dan relevansinya terhadap tujuan penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Penutup, Berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.