

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penyandang disabilitas fisik, khususnya yang mengalami keterbatasan motorik ganda pada ekstremitas bawah dan atas (seperti pasien pasca-stroke, kelumpuhan saraf, atau distrofi otot), membutuhkan alat bantu mobilitas yang mampu merestorasi kemandirian mereka secara optimal[1], [2]. Sayangnya, mayoritas kursi roda yang ada saat ini baik kursi roda manual maupun kursi roda elektrik berantarmuka *joystick* masih mensyaratkan intervensi tangan dan presisi motorik halus yang stabil. Hal ini tidak hanya membebani pengguna secara fisik, tetapi juga memonopoli fungsi tangan, sehingga membatasi ruang gerak mereka dalam melakukan aktivitas sehari-hari secara mandiri (*Activities of Daily Living*). Oleh karena itu, pengembangan teknologi kursi roda elektrik yang sepenuhnya *hands-free* menjadi sebuah urgensi untuk mewujudkan mobilitas yang inklusif.

Kursi roda elektrik pada dasarnya merupakan sebuah *personal electric vehicle* (kendaraan listrik personal) yang dirancang untuk mendukung mobilitas otonom penggunanya[3]. Dalam pengembangan sistem navigasi otonom personal seperti ini, tantangan utama yang harus diselesaikan bukan sekadar mengenali perintah gerak, melainkan meminimalkan latensi dan memastikan ketepatan respons sistem terhadap input pengguna yang bersifat fluktuatif. Keterlambatan komputasi dalam menerjemahkan gestur menjadi aktuasi roda dapat membahayakan keselamatan pengguna, terutama saat bermanuver di lingkungan dinamis[4].

Untuk menjembatani kebutuhan *hands-free* tersebut, berbagai inovasi *Human-Machine Interface* (HMI) telah diusulkan. Penelitian-penelitian terdahulu mencoba mengimplementasikan sistem *head-tracking* (pergerakan kepala) dan *sip-and-puff* (isapan/tiupan udara)[5]. Namun, kedua teknologi ini terbukti memiliki kelemahan operasional; sistem *head-tracking* sangat rentan memicu kelelahan otot leher dan merespons navigasi yang keliru (*false-triggering*) saat pengguna sekadar menoleh, sementara *sip-and-puff* memiliki latensi yang tinggi dan bergantung pada stabilitas pernapasan[6]. Sebagai alternatif yang jauh lebih andal, kendali berbasis gestur postur tubuh bagian atas (torso) menggunakan sensor inersia (*Inertial Measurement Unit* / IMU) hadir sebagai solusi yang paling menjanjikan. Torso manusia bertindak sebagai pusat massa yang stabil untuk mengekstraksi gerakan fleksi (condong depan), ekstensi (condong belakang), dan *lateral bending* (miring samping) menjadi perintah navigasi direksional secara natural.

Meskipun sistem kendali berbasis gestur torso telah dikembangkan pada beberapa penelitian sebelumnya seperti penerapan sensor inersia dengan metode klasifikasi *Decision Tree* pendekatan tersebut masih menyimpan kelemahan fundamental: pengenalan gestur sangat bergantung pada parameter ambang batas

(*threshold*) yang bersifat statis[7]. Pada kondisi operasional aktual, penggunaan kursi roda dalam durasi yang panjang pasti akan memicu fenomena kelelahan otot (*muscle fatigue*). Kelelahan fisik ini secara langsung bermanifestasi pada penurunan amplitudo gerakan pengguna[8]. Ketika sudut kemiringan gestur melemah dan gagal melampaui batas *threshold* statis yang kaku tersebut, sistem akan mengalami kegagalan deteksi (*false negative*). Kondisi ini berakibat pada berhentinya kursi roda secara tiba-tiba di tengah manuver, yang sangat membahayakan keselamatan pengguna di lingkungan dinamis.

Untuk mengatasi kelemahan sistem konvensional tersebut, diperlukan sebuah arsitektur kendali yang bersifat adaptif[40]. Penelitian ini mengusulkan penerapan metode penyesuaian *threshold* dinamis (*dynamic thresholding*)[10]. Mekanisme ini bekerja secara otonom dengan mengevaluasi riwayat rentang gerak pengguna dan mengkalibrasi ulang batas pemicu aksi secara *real-time* menggunakan pendekatan statistik berbobot, seperti *Exponential Moving Average* (EMA)[11]. Melalui kompensasi adaptif ini, apabila sistem mendeteksi adanya tren pelemahan amplitudo akibat kelelahan otot, mikrokontroler akan menurunkan nilai *threshold* secara proporsional. Mekanisme cerdas ini memastikan bahwa niat pergerakan pengguna tetap dapat dikenali dan dieksekusi oleh motor kursi roda, meskipun daya dorong postur mereka tidak lagi sekuat saat kondisi prima.

Lebih lanjut, untuk mengekstraksi data spasial dari tiga sensor inersia (Multi-IMU) secara bersamaan, dibutuhkan algoritma klasifikasi *Machine Learning* yang tangguh (*robust*)[12]. Berbagai algoritma lain yang relatif ringan sering kali mengalami kesulitan dan *overfitting* saat menghadapi sinyal deret waktu (*time-series*) yang sarat akan *noise*. Sinyal dari ketiga sensor MPU-6050 secara inheren memiliki variansi fluktuasi yang tinggi, terlebih ketika otot pengguna mulai bergetar akibat kelelahan fisik. Oleh karena itu, penelitian ini memilih algoritma *Random Forest* (RF)[10]. Kemampuan RF dalam mengelola banyak pohon keputusan secara acak sangat efektif untuk menangani *noise* dari tiga sensor secara bersamaan tanpa mengalami *overfitting* saat amplitudo otot pengguna mulai tidak stabil karena lelah[11].

Sinergi antara kompensasi *threshold* dinamis dan ketangguhan klasifikasi *Random Forest* diyakini mampu menciptakan arsitektur kendali kursi roda yang tidak hanya membebaskan fungsi tangan, tetapi juga benar-benar adaptif terhadap fluktuasi stamina masing-masing penggunanya. Berdasarkan analisis kelemahan pada penelitian terdahulu dan besarnya potensi optimasi tersebut, penulis bermaksud merancang bangun inovasi teknologi ini ke dalam sebuah Tugas Akhir dengan judul **"Perancangan Kendali Adaptif Kursi Roda Elektrik Menggunakan Multi-Sensor Inersia dan Dynamic Thresholding Berbasis Random Forest "**.

1.2 Rumusan Masalah

Penggunaan kursi roda secara manual maupun menggunakan *joystick* menjadi tantangan bagi penyandang disabilitas dengan keterbatasan ganda pada ekstremitas atas dan bawah. Sistem pengendalian *hands-free* konvensional yang telah dikembangkan untuk mengatasi masalah ini belum cukup adaptif dan aman, terutama saat pengguna mulai mengalami fenomena kelelahan otot (*muscle fatigue*) yang menyebabkan penurunan amplitudo gerakan. Oleh karena itu, dikembangkan sistem pengendalian kursi roda adaptif berdasarkan gerakan tubuh menggunakan sensor inersia dengan penerapan penyesuaian *threshold* dinamis dan metode *Random Forest* sebagai metode klasifikasinya. Berdasarkan hal tersebut, dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang arsitektur Multi-IMU pada sistem kendali kursi roda elektrik agar mampu mengekstraksi pergerakan (*motion intention*) pengguna secara responsif untuk menggerakkan kursi roda?
2. Bagaimana efektivitas penerapan filter *Exponential Moving Average* (EMA) sebagai penyesuaian ambang batas dinamis (*dynamic thresholding*) dalam mereduksi tingkat kegagalan deteksi (*False Negative Rate*) saat sistem menghadapi simulasi kelelahan otot (*muscle fatigue*) pengguna?
3. Bagaimana keandalan dan performa algoritma *Random Forest* dalam mengklasifikasikan lima kelas manuver navigasi kursi roda berdasarkan metrik matriks konfusi (akurasi, presisi, *recall*) serta latensi komputasi dalam menggerakkan kursi roda elektrik yang adaptif?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijabarkan, tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan arsitektur Multi-IMU sebagai sistem akuisisi data spasial untuk kendali kursi roda elektrik yang adaptif terhadap dinamika postur pengguna.
2. Mengevaluasi secara kuantitatif tingkat keberhasilan filter EMA (*dynamic thresholding*) dalam meminimalkan *False Negative Rate* untuk mempertahankan eksekusi navigasi motor penggerak saat terjadi degradasi amplitudo gerak akibat kelelahan otot.
3. Menganalisis kinerja dan ketangguhan algoritma *Random Forest* dalam mengklasifikasikan pola manuver navigasi melalui pengujian *Cross-Validation* dan metrik evaluasi menyeluruh (akurasi, presisi, *recall*, serta waktu respons/latensi sistem).

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dirancang untuk memastikan bahwa pembahasan dalam penelitian ini memiliki fokus yang jelas dan relevan dengan permasalahan yang sedang diatasi. Batasan masalah juga berperan penting dalam membantu penulis

untuk tetap fokus pada aspek-aspek penting dalam penelitian, sehingga penelitian berjalan secara efisien. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Objek penelitian berfokus pada perancangan purwarupa sistem kendali kursi roda elektrik yang pengoperasiannya dikhususkan secara *hands-free* tanpa melibatkan pergerakan ekstremitas atas (tangan).
2. Perangkat keras untuk akuisisi data spasial dibatasi pada penggunaan arsitektur Multi-IMU yang terdiri dari tiga buah sensor inersia seri MPU-6050 (menggunakan *accelerometer* dan *gyroscope*).
3. Pengenalan pola pergerakan navigasi dibatasi pada lima kelas gestur tubuh bagian atas (torso), meliputi gerakan fleksi (maju), ekstensi (mundur), *lateral bending* kanan (belok kanan), *lateral bending* kiri (belok kiri), dan duduk tegap (berhenti/diam).
4. Pemrosesan algoritma perangkat lunak dibatasi pada penggabungan filter *Exponential Moving Average* (EMA) untuk kompensasi *dynamic thresholding* dan metode *Random Forest* untuk klasifikasi kelas gerakan.
5. Proses validasi algoritma klasifikasi dilakukan menggunakan metode *k-Fold Cross-Validation* dengan nilai parameter $k = 5$.
6. Pengambilan data dan pengujian sistem dilakukan secara eksklusif oleh minimal 5 (lima) orang responden dengan kondisi fisik normal yang mensimulasikan gerakan dan kelelahan otot penyandang disabilitas, di mana masing-masing gerakan diulang sebanyak 10 repetisi.
7. Parameter evaluasi keberhasilan sistem dibatasi pada pengujian matriks konfusi (Akurasi, Presisi, *Recall*, dan F1-Score), persentase reduksi tingkat kegagalan deteksi (*False Negative Rate*), serta pengukuran latensi waktu komputasi secara *real-time*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah mengembangkan inovasi sistem kendali yang lebih adaptif pada kursi roda berdasarkan gerakan tubuh dengan menggunakan sensor inersia. Dengan merancang sistem pengendalian cerdas yang mengkombinasikan penyesuaian *threshold* dinamis dan algoritma *Random Forest*, kursi roda diharapkan dapat beroperasi dengan jauh lebih responsif, stabil terhadap *noise*, dan tangguh dalam mengkompensasi kelelahan otot. Hal ini akan memungkinkan penyandang disabilitas dengan keterbatasan ganda pada ekstremitas atas dan bawah untuk melakukan mobilitas harian dengan lebih aman, mandiri, dan fleksibel[50].

Penulisan tugas akhir dilakukan secara sistematis yang setiap babnya memiliki tujuan dalam menyampaikan hal tertentu. Hal ini dilakukan agar pembaca dapat memahaminya dengan mudah. Sistematika penulisan tugas akhir dijelaskan sebagai berikut:

BAB I	PENDAHULUAN
	Bagian ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.
BAB II	TINJAUAN PUSTAKA
	Bagian ini berisi teori dasar dan ilmu penunjang yang diperlukan dalam menyelesaikan tugas akhir.
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN
	Bagian ini berisi penjelasan tentang rancangan dan prosedur yang akan digunakan untuk memecahkan permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir. Umumnya berisi rentang waktu penelitian dan digram alir rencana penelitian.
BAB IV	
	Bagian ini berisi uraian mengenai hasil pengujian sistem, mulai dari pengujian kinerja perangkat keras (sensor MPU-6050, <i>multiplexer</i> TCA9548A, dan ESP32), pengujian akurasi klasifikasi gestur tubuh menggunakan algoritma <i>Random Forest</i> dan <i>Dynamic Thresholding</i> berbasis <i>Exponential Moving Average</i> (EMA), hingga pengujian sistem <i>safety override</i> berbasis sensor ultrasonik pada kursi roda elektrik. Hasil pengujian kemudian dianalisis dan dibahas secara mendalam untuk mengevaluasi apakah sistem telah bekerja secara optimal sesuai dengan tujuan penelitian.
BAB V	
	Bagian ini berisi kesimpulan yang ditarik dari seluruh rangkaian penelitian dan pengujian sistem kendali kursi roda elektrik adaptif yang telah dilakukan. Selain itu, bagian ini juga memuat saran-saran yang konstruktif untuk pengembangan dan penyempurnaan penelitian selanjutnya di masa mendatang.