

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa implementasi metode *Linear Discriminant Analysis* (LDA) terbukti sangat andal dalam mengklasifikasikan enam jenis sinyal artefak *Electroencephalography* (EEG) sebagai pemicu kendali sistem. Pengujian terhadap aktivitas kedipan mata, lirik, dan gigitan rahang menghasilkan tingkat akurasi klasifikasi keseluruhan yang sangat tinggi, yakni mencapai 96,22% dengan tingkat kecepatan komputasi 0,000024 detik. Algoritma ini juga mencatatkan nilai presisi dan sensitivitas (*recall*) yang dominan stabil di atas rentang 85% hingga menyentuh angka sempurna 100% pada instruksi krusial seperti gigitan dan kedipan tunggal. Pencapaian ini membuktikan bahwa metode LDA mampu memisahkan pola sinyal bioelektrik secara optimal dan tangguh terhadap derau (*noise*), sehingga sangat layak diimplementasikan sebagai antarmuka *Brain-Computer Interface* (BCI) yang responsif tanpa membebani komputasi sistem secara iteratif.

Pada aspek persepsi visual, penerapan teknik *image processing* berbasis ruang warna *Hue, Saturation, Value* (HSV) dan konfigurasi dua kamera secara ortogonal (atas dan samping) berhasil mengidentifikasi objek beserta koordinat spasialnya dengan tingkat presisi yang mumpuni. Sistem visi komputer ini mampu mengekstraksi titik pusat (*centroid*) objek dan mengonversinya dari titik piksel dua dimensi menjadi koordinat dunia nyata tiga dimensi (X, Y, Z). Berdasarkan pengujian deteksi pada objek fisik (merah, hijau, biru) yang disebar di empat kuadran area kerja yang berbeda, rata-rata simpangan kesalahan (*error*) komputasi berada di bawah angka 2 mm secara keseluruhan. Margin kesalahan paling minim tercatat pada deteksi objek di Kuadran I dengan deviasi hanya sebesar 0,06 mm, sementara simpangan tertinggi hanya menyentuh 1,7 mm, yang mengonfirmasi bahwa pemetaan spasial kamera berjalan sangat akurat.

Dari sisi aktuasi mekanik, pemodelan dan perhitungan matematis *Inverse Kinematics* yang ditanamkan pada robot manipulator 4-DOF sukses beroperasi secara otomatis untuk mengalkulasi besaran sudut rotasi setiap persendian (*joint*) menuju titik target. Berdasarkan evaluasi pergerakan *end-effector* ke lima titik koordinat kartesian yang berbeda dengan total akumulasi 50 kali perulangan uji, lengan robot menunjukkan kepresisian yang luar biasa tanpa penyimpangan yang berarti. Tingkat keandalan mekanis pada kelima rentang titik pengujian tersebut secara konsisten mencatatkan persentase rata-rata keberhasilan akhir sebesar 98,46%, 98,72%, 99,46%, 99,48%, dan menyentuh akurasi tertinggi di angka 99,96%. Hal ini memvalidasi bahwa toleransi *error* dari algoritma pergerakan sistem robotik sangat minim dan aman untuk operasional ruang spasial fisik.

Sebagai simpulan akhir dari pengujian performa integrasi keseluruhan sistem, ekosistem robotik yang memadukan klasifikasi sinyal artefak EEG, otomasi pengolahan citra, dan eksekusi lengan robot telah beroperasi secara utuh dan *real-time*. Evaluasi siklus pemindahan objek terhadap lima subjek menunjukkan *success rate* (persentase keberhasilan) sebesar 100% pada instruksi pengambilan objek (kedipan tunggal) dan pelepasan objek (gigitan). Meskipun tercatat adanya sedikit tantangan akurasi pada instruksi kedip dua mata (90%) akibat dominasi asimetris otot sebelah kanan, serta instruksi rotasi lengan melalui lirik kiri (80%) dan lirik kanan (85%) akibat adanya *overlapping* amplitudo pada bola mata horizontal, performa keseluruhan sistem dapat dinyatakan sangat andal. Model robot manipulator ini secara sukses menjadi bukti konsep valid dari sebuah inovasi teknologi asistif masa depan yang *hands-free*, akurat, dan responsif bagi kemandirian pasien dengan disabilitas kelumpuhan motorik berat.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan batasan masalah yang ada, saran pertama untuk pengembangan sistem di masa depan difokuskan pada perluasan kapabilitas deteksi objek target. Sistem pengolahan citra yang saat ini menggunakan metode deteksi warna HSV pada objek dasar (merah, hijau, dan biru) disarankan untuk ditingkatkan pengenalannya terhadap objek-objek benda nyata yang esensial dalam aktivitas kehidupan sehari-hari, seperti gelas minum, botol obat, sendok, atau telepon genggam. Untuk merealisasikan hal tersebut, metode visi komputer dapat diintegrasikan dengan algoritma kecerdasan buatan berbasis *Deep Learning* (seperti arsitektur YOLO atau CNN), sehingga sistem tidak hanya mendeteksi warna dan titik koordinat, tetapi juga mampu mengenali bentuk, dimensi, dan jenis benda guna memberikan interaksi bantuan yang lebih aplikatif bagi penyandang disabilitas.

Saran kedua berkaitan dengan arsitektur konfigurasi kamera dan sistem pemetaan koordinat spasial. Metode konversi titik piksel menjadi jarak nyata dalam satuan milimeter yang digunakan saat ini disarankan untuk tidak lagi dipertahankan pada pengembangan selanjutnya. Pendekatan konversi manual ini terbukti sangat riskan dan tidak fleksibel, apabila terjadi sedikit saja pergeseran posisi pada konfigurasi fisik kamera maupun ruang kerja (*workspace*), nilai konversi akan langsung terpengaruh sehingga sistem mewajibkan proses kalibrasi ulang secara menyeluruh. Sebagai solusi atas kerentanan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengadopsi teknologi visi tiga dimensi yang lebih dinamis, seperti penggunaan *depth camera* atau sistem kamera *stereo vision* yang mampu membaca jarak spasial secara otomatis dan mandiri dari posisi peletakkannya.

Saran selanjutnya berkaitan dengan peningkatan kapabilitas mekanis dan aktuasi pada lengan robot manipulator. Konstruksi robot 4-DOF yang digunakan saat ini disarankan untuk ditingkatkan menjadi lengan robot 5-DOF atau 6-DOF guna memberikan ruang kerja (*workspace*) dan fleksibilitas orientasi manuver yang lebih luwes di ruang tiga dimensi.

Pada aspek antarmuka kendali *Brain-Computer Interface* (BCI), penelitian mendatang direkomendasikan untuk mengeksplorasi skema BCI hibrida guna menambah jumlah perintah kendali dan mengurangi potensi kelelahan otot wajah akibat kontraksi yang berulang. Sistem hibrida ini dapat menggabungkan sinyal artefak otot dengan paradigma sinyal otak murni seperti *Motor Imagery*. Penggunaan perangkat *headset* EEG nirkabel dengan elektroda kering (*dry-sensor*) juga sangat disarankan untuk meningkatkan ergonomi dan kenyamanan pengguna. Dengan penyempurnaan pada sektor visi, mekanik robot, dan akuisisi sinyal ini, purwarupa yang telah dibangun diharapkan dapat berevolusi menjadi produk teknologi asistif komersial yang sungguh-sungguh mampu meningkatkan kemandirian pasien kelumpuhan motorik berat di masa depan

