

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Tahap evaluasi dan pengujian komprehensif terhadap sistem kendali robot manipulator 4-DoF berbasis artefak *Electroencephalogram* (EEG) dan pengolahan citra telah memberikan hasil kuantitatif yang spesifik. Pencapaian parameter dari serangkaian skenario pengujian tersebut secara langsung menjawab rumusan masalah penelitian yang telah ditetapkan. Rangkuman hasil pengujian sistem ditarik ke dalam poin-poin kesimpulan sebagai berikut:

1. Model *1-Dimensional Convolutional Neural Network* (1D-CNN) terbukti sukses mengklasifikasikan lima kelas artefak EEG (lirikan kanan, kiri, atas, bawah, dan kontraksi rahang) dengan tingkat akurasi keseluruhan mencapai 98,67%.
2. Pengujian waktu inferensi komputasi mencatat durasi pemrosesan model rata-rata sebesar 10,41 milidetik per *epoch*, membuktikan bahwa algoritma kecerdasan buatan mampu menerjemahkan sinyal masukan secara instan dan sangat responsif untuk kebutuhan operasional waktu nyata (*real-time*).
3. Akurasi pengolahan citra digital berbasis warna HSV dan rumusan *Inverse Kinematics* dalam melokalisasi sasaran terbukti sangat presisi. Pengujian kesalahan posisi akhir (*end-effector error*) mencatat deviasi mekanis rata-rata pada sumbu X sebesar 2,33 mm, sumbu Y sebesar 1,80 mm, sumbu Z sebesar 3,16 mm, dengan total distorsi vektor spasial rata-rata sebesar 4,34 mm.
4. Pengujian integrasi keseluruhan sistem (*end-to-end*) dalam mengeksekusi misi pemindahan target kotak warna menuju area *drop zone* mencapai tingkat keberhasilan sebesar 86,67% dari total 75 kali percobaan.
5. Kinerja operasional sistem membutuhkan waktu respons total rata-rata 10,44 detik untuk menyelesaikan satu siklus instruksi penuh, yang terbagi atas 3,13 detik untuk fase komputasi perangkat lunak dan 7,38 detik untuk fase manuver kinematika pergerakan lengan robot.

5.2 Saran

Penelitian ini telah berhasil merealisasikan purwarupa sistem kendali lengan robot manipulator yang fungsional dan terintegrasi. Meskipun demikian, eksplorasi lebih lanjut masih sangat terbuka untuk menyempurnakan aspek-aspek teknis yang menjadi batasan pada penelitian ini. Rekomendasi yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan sistem di masa mendatang adalah sebagai berikut:

1. Peningkatan Kapabilitas Deteksi Objek

Pengembangan sistem visi komputer direkomendasikan untuk beralih dari metode segmentasi warna statis (HSV) menuju pendekatan algoritma kecerdasan buatan berbasis *Deep Learning*, seperti arsitektur YOLO atau *Mask R-CNN*.

Transisi algoritma ini akan memungkinkan lengan robot untuk tidak hanya membaca warna, melainkan juga mengenali bentuk, dimensi, dan jenis benda-benda nyata yang esensial dalam aktivitas harian penyandang disabilitas, seperti gelas minum, sendok, atau botol obat.

2. Pembaruan Teknologi Pemetaan Spasial

Arsitektur konfigurasi kamera ganda dan metode konversi piksel manual memerlukan pembaruan teknis secara fundamental. Pendekatan kalibrasi rasio skala secara manual terbukti sangat kaku dan mewajibkan kalibrasi ulang secara menyeluruh apabila terjadi sedikit saja pergeseran pada posisi fisik kamera. Implementasi teknologi kamera tiga dimensi yang dinamis, seperti *depth camera* atau sistem *stereo vision*, amat disarankan untuk diterapkan guna membaca jarak dan elevasi spasial target secara absolut dan mandiri.

3. Optimalisasi Derajat Kebebasan Robot

Kapabilitas mekanis aktuasi pada lengan robot manipulator perlu ditingkatkan untuk mengakomodasi manuver pengambilan objek yang lebih kompleks. Konstruksi kerangka robot 4-DoF yang beroperasi saat ini disarankan untuk ditingkatkan (di-*upgrade*) menjadi spesifikasi 5-DoF atau 6-DoF. Penambahan sendi mekanis ini akan mengekspansi volume ruang kerja (*workspace*) dan memberikan fleksibilitas orientasi capit (*end-effector*) yang jauh lebih luwes.

Penyempurnaan secara holistik pada sektor visi komputer, mekanik robot, dan resolusi akuisisi sinyal ini diharapkan dapat membawa purwarupa yang telah dibangun melangkah menuju produk teknologi asistif komersial. Sistem yang andal dan adaptif kelak akan benar-benar mampu mengambil peran dalam merestorasi kemandirian aktivitas bagi pasien dengan kelumpuhan motorik berat

