

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Sistem kontrol robot manipulator telah berhasil diimplementasikan dengan memanfaatkan dua kamera dan input klik *mouse*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penempatan posisi kamera, penerapan metode inverse kinematic, konversi koordinat piksel menjadi koordinat dunia, dan merencanakan lintasan pergerakan robot. Berdasarkan hasil penelitian, implementasi metode ini menghasilkan beberapa temuan penting yang memberikan wawasan baru dalam kontrol robot manipulator.

1. Mekanisme penginputan dan pengenalan koordinat objek berbasis GUI interaktif terbukti efektif dan mudah digunakan oleh operator. GUI yang dikembangkan memungkinkan operator memberikan input berupa klik mouse pada tampilan kamera atas dan samping, yang kemudian dikonversi dari koordinat piksel menjadi koordinat dunia. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem menghasilkan error posisi rata-rata sebesar 3,4 mm dengan tingkat keberhasilan konversi koordinat sebesar 98,36%, sehingga GUI berfungsi dengan baik sebagai antarmuka utama dalam sistem teleoperasi.
2. Penerapan metode *inverse kinematics* mampu mengonversi koordinat target menjadi sudut servo dengan tingkat akurasi yang tinggi dan konsisten. Pengujian pada 20 titik target menunjukkan tingkat akurasi pergerakan robot berada pada rentang 96,10% hingga 98,84%, dengan akurasi rata-rata sebesar 97,52%. Error posisi end-effector berada pada kisaran 3,31 mm hingga 8,12 mm, yang masih berada dalam batas toleransi sistem mekanik dan aktuator robot manipulator yang digunakan.
3. Pengujian task success rate (TSR) pada 47 kali percobaan pick and place menunjukkan bahwa sistem mencapai keberhasilan penuh (proses pengambilan dan peletakan objek) sebanyak 40 kali (85,1%), keberhasilan parsial sebanyak 5 kali (10,6%), dan kegagalan total sebanyak 2 kali (4,3%). Dengan memperhitungkan keberhasilan parsial sebagai bagian dari kinerja sistem, tingkat keberhasilan keseluruhan meningkat menjadi 90,06%, yang menegaskan bahwa sistem teleoperasi robot manipulator yang dikembangkan memiliki tingkat keandalan yang baik dalam mendukung operasi *pick and place* pada area kerja.
4. Hasil pengujian perencanaan lintasan pergerakan robot manipulator menunjukkan bahwa sistem kendali yang dikembangkan mampu mengarahkan robot bergerak menuju target secara aman pada area kerja. Dari pengujian terhadap 15 target dengan lima tahapan pergerakan, sistem mencapai tingkat keberhasilan sebesar 90% dengan rata-rata bobot 4,5, yang menandakan bahwa sebagian besar tahapan pergerakan dapat dijalankan dengan baik. Keberhasilan penuh pada tahapan bergerak menuju objek dan

berpindah ke posisi aman pada seluruh target membuktikan bahwa pola lintasan vertikal yang diterapkan efektif dalam meminimalkan risiko tumbukan selama robot bergerak di area kerja.

1.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan yang diperoleh, terdapat beberapa hal yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Penelitian selanjutnya disarankan mengganti gripper kaku (rigid gripper) dengan gripper adaptif yang mampu menyesuaikan diri terhadap kontur objek secara otomatis. Penerapan desain underactuated (satu aktuator untuk beberapa jari) atau mekanisme berbasis link–pegas diharapkan dapat meningkatkan toleransi terhadap variasi diameter, bentuk, dan posisi objek, sehingga mengurangi kegagalan pada proses penjepitan.
2. Untuk meningkatkan presisi penjepitan, penelitian selanjutnya disarankan menambahkan sensor umpan balik gaya atau tekanan, seperti *force sensitive resistor (FSR)*, *load cell* mini, atau estimasi arus aktuator servo. Sistem closed-loop ini memungkinkan gripper menyesuaikan gaya jepit secara adaptif, sehingga cukup kuat untuk menahan objek tanpa menimbulkan deformasi atau risiko terlepas saat proses peletakan.
3. Sistem antarmuka dapat dikembangkan ke arah *web-based control* atau *wireless teleoperation* agar robot dapat dioperasikan secara real-time melalui jaringan internet dengan tampilan streaming kamera langsung.