

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis lengan robot 5 DOF yang telah dilakukan. Kesimpulan disusun untuk menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian, sedangkan saran diberikan sebagai acuan untuk pengembangan sistem selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, pengujian, dan analisis lengan robot 5 DOF berbasis STM32F411CEU6 pada Robot *Arm Mobile Chilli Picker* (CHIMI-BOT), diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Lengan robot 5 DOF berbasis STM32F411CEU6 telah berhasil dirancang dan diimplementasikan sebagai subsistem manipulator pada CHIMI-BOT. Sistem menggunakan motor stepper NEMA 23 pada *joint base*, *shoulder*, dan *elbow*, serta servo DS3225 pada *wrist pitch*, *wrist yaw*, dan *gripper*. Posisi referensi awal *joint* stepper ditentukan melalui proses *homing* menggunakan sensor Hall A3144. Dari lima kali pengujian *homing*, seluruh pengulangan berhasil kembali ke area referensi dengan selisih maksimum sebesar $0,20^\circ$ pada *base*, $0,20^\circ$ pada *shoulder*, dan $1,00^\circ$ pada *elbow*. Pengujian aktuator menunjukkan *error* maksimum sebesar 0,33% pada *base*, 3,67% pada *shoulder*, dan 3,00% pada *elbow*, sedangkan pengujian servo menghasilkan *error* maksimum sebesar 1,89% pada *wrist pitch* dan 1,56% pada *wrist yaw*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem *homing* dan aktuator telah mampu digunakan sebagai dasar pergerakan lengan robot.
2. Metode *inverse kinematics* telah berhasil diterapkan untuk mengubah koordinat target X, Y, dan Z menjadi sudut joint dan gerakan fisik lengan robot. Pengujian dilakukan pada empat posisi dengan masing-masing lima kali pengulangan sehingga diperoleh 20 percobaan. Seluruh percobaan berhasil mencapai target dengan selisih posisi *end-effector* sebesar 4,58–

10,77 mm dan *error* posisi sebesar 0,76–1,13%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model *inverse kinematics* yang telah disesuaikan dengan geometri dan kalibrasi lengan mampu menghasilkan gerakan menuju koordinat target pada area pengujian yang digunakan.

3. Kinerja lengan robot berdasarkan pengujian akurasi dan keterulangan menunjukkan bahwa posisi *end-effector* dapat dicapai secara relatif konsisten. Lima kali pengulangan pada setiap posisi menghasilkan rentang perubahan posisi sebesar 1–3 mm pada sumbu X, Y, dan Z, dengan rentang perubahan terbesar sebesar 3 mm. Pada pengujian sistem terintegrasi, delapan dari sembilan target berhasil dicapai oleh lengan atau sebesar 88,89%. Dari delapan target yang berhasil dicapai, tujuh objek berhasil dijepit oleh *gripper*, sehingga keberhasilan penjepitan pada target yang tercapai sebesar 87,50%. Secara keseluruhan, tujuh dari sembilan pengujian berhasil menyelesaikan tahapan pencapaian target dan penjepitan objek atau sebesar 77,78%. Penilaian pada pengujian terintegrasi dilakukan berdasarkan pengamatan visual sehingga hasil tersebut digunakan sebagai verifikasi fungsional integrasi Jetson, STM32F411CEU6, lengan robot, dan *gripper* pada kondisi pengujian yang dilakukan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan, beberapa pengembangan yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kinerja sistem adalah sebagai berikut:

1. Sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan sensor posisi atau *encoder* pada *joint base*, *shoulder*, dan *elbow* agar posisi aktual setiap *joint* dapat diketahui secara langsung. Pada sistem saat ini, posisi *joint stepper* masih ditentukan berdasarkan proses *homing* dan jumlah pulsa yang diberikan. Penambahan umpan balik posisi dapat digunakan untuk mendeteksi penyimpangan gerak selama operasi dan meningkatkan kemampuan pemantauan posisi aktuator.
2. Kalibrasi mekanik pada *joint shoulder* dan *elbow* dapat ditingkatkan karena kedua *joint* menunjukkan penyimpangan yang lebih besar dibandingkan

base. Pengembangan dapat dilakukan melalui pemeriksaan ketegangan *timing belt*, posisi *pulley*, referensi *homing*, kelonggaran sambungan mekanik, serta kesesuaian parameter geometri aktual dengan parameter yang digunakan dalam perhitungan *inverse kinematics*.

3. Pengujian *inverse kinematics* dapat diperluas menggunakan lebih banyak koordinat pada keseluruhan *workspace* lengan, termasuk posisi yang mendekati batas minimum dan maksimum jangkauan. Pengujian dengan jumlah titik yang lebih banyak dapat digunakan untuk mengetahui perubahan akurasi *end-effector* pada berbagai bagian ruang kerja dan menentukan area yang menghasilkan posisi paling konsisten.
4. Sistem pembentukan dan pengiriman koordinat target dari Jetson dapat dikembangkan agar posisi target yang diterima oleh STM32F411CEU6 tetap stabil selama proses pendekatan lengan. Pengembangan dapat mencakup peningkatan kestabilan koordinat target, transformasi koordinat antara kamera dan lengan, serta penentuan kondisi berhenti *end-effector* terhadap objek.
5. Sistem *gripper* dapat dikembangkan dengan menambahkan sensor umpan balik untuk mengetahui kondisi objek setelah proses penjepitan. Pada sistem saat ini, keberhasilan penjepitan masih ditentukan melalui pengamatan visual. Penambahan sensor akan memungkinkan keberhasilan penjepitan dievaluasi secara otomatis dan memberikan data kuantitatif untuk membedakan keberhasilan gerakan lengan dengan keberhasilan proses penjepitan.
6. Pengujian sistem terintegrasi dapat dilakukan dengan jumlah target dan pengulangan yang lebih banyak serta variasi posisi dan orientasi objek yang lebih beragam. Pengujian tersebut dapat digunakan untuk memperoleh evaluasi yang lebih representatif dan membantu memisahkan kegagalan yang terjadi pada tahap pembentukan koordinat target, pergerakan lengan, maupun proses penjepitan oleh *gripper*.