

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan utama:

a. Desain dan Integrasi Sistem

Sistem *robot arm* mobile chilli picker 5-DOF berhasil dibangun dengan mengintegrasikan NVIDIA Jetson Orin Nano, STM32, kamera *eye-in-hand*, YOLOv8n-Seg, dan *uncalibrated image-based visual servoing*. Jetson berfungsi sebagai pemroses visi dan pengendali utama, sedangkan STM32 menangani perhitungan gerak robot serta aktuator melalui komunikasi UART.

b. Kinerja Model dan Pemrosesan *Real-time*

Model YOLOv8n-Seg yang dioptimasi menggunakan TensorRT berhasil bekerja secara *real-time*. Model B menghasilkan Macro *Precision* 89,18%, Macro *Recall* 84,73%, Macro Skor F1 86,58%, Mean IoU 92,32%, dan *Counting error* 3,68%. Pada Jetson Orin Nano, inferensi TensorRT membutuhkan rata-rata 8,78 ms dengan kecepatan pemrosesan sistem visi sebesar 25,46 FPS.

c. Kinerja *Visual Servoing*

Kontrol uncalibrated IBVS berbasis *empirical Jacobian* berhasil mengarahkan *cut-point* menuju *desired point*. Pada lima pengujian berulang, rata-rata *error* berkurang dari 196,95 piksel menjadi 13,03 piksel atau sebesar 93,32%. Namun, keberhasilan koreksi pada bidang citra 2D belum selalu menjamin keberhasilan pemetikan secara fisik karena posisi longitudinal target masih berpengaruh.

d. Kinerja Integrasi dan Waktu Siklus

Pada pengujian multi-cabai, 8 dari 9 target berhasil menyelesaikan urutan program atau sebesar 88,89%, sedangkan 7 dari 9 target berhasil dipetik secara fisik atau sebesar 77,78%. Rata-rata waktu siklus pada sepuluh siklus terintegrasi sebesar 92,55 s. Analisis FSM menunjukkan bahwa keterlambatan utama bukan

berasal dari inferensi visi, tetapi dari gerakan fisik robot dan sinkronisasi STM32. Pada satu siklus representatif, 50,6% waktu *Visual Servoing* digunakan pada proses MOTION_BUSY → MOTION_DONE dan 30,7% pada MOTION_TX → MOTION_ACK.

5.2 Saran

Saran ini ditujukan untuk mengatasi keterbatasan yang ditemukan selama pengujian, terutama pada waktu siklus pemetikan, proses koreksi *Visual Servoing*, dan ketepatan posisi longitudinal saat proses pemetikan. Beberapa pengembangan yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

a. Optimasi Waktu Siklus dan Gerak Robot

Melakukan optimasi kecepatan dan profil gerak robot manipulator, terutama pada proses *approach*, *retract*, *drop/home*, dan *return-to-scan*. Hasil analisis FSM menunjukkan bahwa sebagian besar waktu *Visual Servoing* digunakan pada proses MOTION_BUSY → MOTION_DONE, sehingga pengurangan waktu gerak fisik robot berpotensi memberikan pengaruh paling besar terhadap penurunan waktu siklus keseluruhan.

b. Optimasi Komunikasi dan Kontrol *Visual Servoing*

Mengoptimalkan proses komunikasi dan sinkronisasi antara Jetson Orin Nano dan STM32, khususnya pada interval MOTION_TX → MOTION_ACK. Selain itu, jumlah iterasi *step-and-look* dapat dikurangi melalui penyempurnaan *empirical Jacobian*, *gain scheduling*, dan parameter kontrol pada kondisi FAR, MID, dan NEAR agar robot dapat mencapai kondisi READY dengan jumlah koreksi yang lebih sedikit. Kemudian dapat diubah menjadi *continuous* IBVS sebagai pengembangannya.

d. Pengembangan Estimasi Jarak Longitudinal

Melakukan pengembangan dan validasi lebih lanjut terhadap *active monocular range estimation* menggunakan variasi ukuran cabai, orientasi, dan jarak yang lebih beragam. Hal ini diperlukan karena keberhasilan koreksi posisi pada bidang citra 2D belum selalu menjamin posisi pemetikan yang tepat pada ruang

3D. Estimasi jarak yang lebih akurat diharapkan dapat meningkatkan ketepatan *final X insertion* dan keberhasilan pemetikan fisik.