

BAB V

PENUTUP

Bab ini memuat kesimpulan berdasarkan hasil pengujian sistem penggerak dan navigasi *teach-and-repeat*, serta saran pengembangan untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem penggerak robot mobile pemetik cabai beroda empat berhasil dirancang dan direalisasikan menggunakan dua motor DC PG45, *rotary encoder*, *driver* BTS7960, dan STM32F411CEU6 sebagai pengendali tingkat bawah. Verifikasi *encoder* menghasilkan rata-rata 57.044 *count* pada roda kiri dan 56.999 *count* pada roda kanan terhadap nilai teoritis 56.960 *count* per putaran, dengan simpangan masing-masing +0,15% dan +0,07%, sehingga pencacahan *encoder* dapat digunakan sebagai dasar perhitungan kecepatan dan odometri robot.
2. Penentuan parameter awal kendali PI menggunakan Ziegler-Nichols metode pertama menghasilkan $K_p = 1,2719$ dan $K_i = 7,0407$ untuk motor kiri serta $K_p = 0,8113$ dan $K_i = 2,8039$ untuk motor kanan. Setelah dilakukan penalaan halus, parameter utama yang digunakan adalah $K_p = 0,80$ dan $K_i = 2,80$ dengan *initial duty* 17,10% pada motor kiri serta $K_p = 1,10$ dan $K_i = 4,40$ dengan *initial duty* 20,10% pada motor kanan. K_d tetap bernilai 0 sehingga pengendali yang diterapkan adalah PI.
3. Kinerja kendali PI pada *setpoint* 8 RPM menghasilkan *rise time* 0,056 s pada motor kiri dan 0,068 s pada motor kanan, *maximum overshoot* masing-masing 59,8% dan 32,1%, *settling time* 0,601 s dan 2,249 s, serta *steady state error* sebesar 0,67% dan 0,53%. Kecepatan stabil kedua roda mencapai 7,946 RPM dan 7,958 RPM dengan selisih 0,012 RPM, sehingga kendali PI mampu menghasilkan keseragaman kecepatan yang baik pada kondisi stabil, walaupun respons transien masih menunjukkan overshoot yang cukup besar.
4. Transformasi koordinat YDLIDAR T-mini Plus 25 dan local scan matching telah diimplementasikan pada sistem *teach-and-repeat*. Lima pengujian Repeat/Homing menghasilkan 3.029 Accepted dari 7.089 upaya, dengan rasio penerimaan gabungan 42,73%. Rata-rata best score dan score improvement antarpercobaan masing-masing

sebesar 0,144 dan 0,096. Pada 3.017 pasangan pembaruan yaw, rata-rata simpangan baku raw dan Kalman masing-masing sebesar $3,298^\circ$ dan $2,676^\circ$, dengan rata-rata penurunan per percobaan sebesar 19,06%. Hasil ini menunjukkan pengurangan variasi estimasi koreksi yaw, sedangkan akurasi yaw absolut belum dapat ditentukan tanpa acuan eksternal yang tersinkron. Encoder tetap menjadi sumber utama odometri dan LiDAR memberikan koreksi pose yang dibatasi quality gate.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian, saran pengembangan yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut:

5. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan sistem navigasi menggunakan ROS 2 Navigation2 (Nav2) agar LiDAR dapat dimanfaatkan untuk lokalisasi, pemetaan, *path planning*, dan *obstacle avoidance*, sedangkan kendali PI pada STM32 tetap berperan sebagai pengendali tingkat bawah.
6. Robot sebaiknya dikembangkan agar mampu beroperasi pada permukaan tanah yang tidak rata melalui peningkatan sistem roda, suspensi, traksi, serta penyesuaian kendali agar pergerakan tetap stabil pada perubahan kondisi permukaan.
7. Pengujian lanjutan perlu dilakukan pada lingkungan perkebunan cabai yang sebenarnya untuk mengevaluasi kinerja robot terhadap variasi jarak tanaman, kondisi tanah, perubahan pencahayaan, serta keberadaan objek penghalang pada kondisi nyata.
8. LiDAR scan matching dan odometri perlu divalidasi dengan ground truth agar *error* pose dapat diukur secara kuantitatif dan parameter koreksi pada tahap repeat dapat disempurnakan.