

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perancangan, implementasi, dan pengujian sistem navigasi pada *Autonomous Delivery Vehicle*, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Akuisisi, validasi, dan prapengolahan data sensor berhasil menghasilkan sumber measurement yang sesuai untuk sistem lokalisasi. Pengujian GNSS menunjukkan perbedaan kualitas yang jelas antara kondisi terhalang dan outdoor. Pada kondisi outdoor diperoleh rata-rata 16 satelit, pDOP 0,978, hAcc 1,204 m, *quality gate pass* 100%, dan RMS dispersi posisi 0,817 m, sedangkan kondisi terhalang menghasilkan hAcc 9,907 m dan *quality gate pass* 0%. IMU menunjukkan karakteristik linear dengan slope 0,995430, $\sqrt{R^2}$ sebesar 0,999987, RMSE heading 1,002°, dan laju aktual 48,671 Hz. Data feedback kecepatan dan steering juga dapat digunakan sebagai dasar pembentukan odometri setelah domain steering absolut aktuator disetarakan terhadap sudut steering kendaraan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses validasi GNSS, koreksi IMU, penyetaraan heading, serta pemetaan feedback aktuator diperlukan sebelum data digunakan oleh estimator.
2. EKF lokal berhasil menghasilkan estimasi gerak kendaraan yang kontinu pada kerangka odom, dengan konfigurasi Baseline memberikan kompromi kinerja yang paling sesuai pada dataset pengujian. Baseline menggunakan frequency 30 Hz, sensor_timeout 0,25 s, nilai measurement covariance dan process noise pada tingkat menengah, serta predict_to_current_time = true. Kombinasi tersebut menghasilkan RMSE residual kecepatan 0,04154 m/s, P95 measurement age 0,126 s, continuity 99,2%, dan mean ketidakpastian posisi $\sqrt{\sigma_x}$ sebesar 0,928 m. Candidate B menghasilkan residual lebih kecil sebesar 0,03311 m/s, tetapi P95 age meningkat menjadi 0,330 s dan continuity turun menjadi 87,9%, sedangkan Candidate A mempertahankan continuity tinggi tetapi uncertainty posisi membesar hingga 7,151 m. Dengan demikian, konfigurasi lokal dipilih berdasarkan keseimbangan respons estimator, keterbaruan measurement, kontinuitas, residual, dan kestabilan covariance, bukan hanya berdasarkan nilai residual terendah.

3. EKF global berhasil menghasilkan estimasi pose kendaraan terhadap kerangka map dengan memanfaatkan posisi GNSS dan informasi gerak serta heading yang telah divalidasi, sedangkan Baseline memberikan karakteristik koreksi global yang lebih seimbang. Baseline menghasilkan RMSE residual XY terhadap GNSS sebesar 0,23774 m, P95 measurement age 0,123 s, continuity 99,6%, serta maximum position jump 1,99236 m. Candidate B menghasilkan RMSE lebih kecil sebesar 0,17756 m, tetapi P95 age meningkat menjadi 0,334 s, continuity turun menjadi 96,4%, dan maximum position jump meningkat menjadi 2,39846 m. Oleh karena itu, Baseline dipertahankan karena memberikan keseimbangan antara kemampuan estimator mengikuti measurement GNSS, freshness, continuity, uncertainty, dan kestabilan koreksi posisi global. Karakteristik tersebut sesuai untuk digunakan sebagai estimasi global yang selanjutnya diintegrasikan oleh LocalizationCore dalam menjaga hubungan koordinat antara map dan odom; namun kinerja LocalizationCore sendiri tidak dievaluasi sebagai eksperimen terpisah pada Bab IV.
4. Smac Hybrid-A* berhasil digunakan sebagai global planner dengan mempertimbangkan karakteristik kinematika kendaraan Ackermann dan informasi biaya pada global costmap. Pada konfigurasi operasional digunakan model gerak DUBIN dengan minimum turning radius 1,4524 m. Baseline menghasilkan *planning time* 925 ms dan *endpoint error* 0,04472 m, kemudian proses navigasi berakhir pada jarak 0,45047 m dari goal dengan status SUCCEEDED dan berada di dalam XY goal tolerance 1,0 m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa global path yang dibentuk dapat digunakan oleh Navigation2 untuk membawa kendaraan menuju wilayah tujuan sesuai kriteria keberhasilan sistem. Perbandingan antarprofil tetap diperlakukan sebagai karakteristik paket konfigurasi karena start-goal dan beberapa parameter planner tidak sepenuhnya identik pada setiap run.
5. Secara keseluruhan, sistem navigasi ADV berhasil diimplementasikan sebagai satu rantai pemrosesan yang menghubungkan validasi sensor, pembentukan odometri, EKF lokal, EKF global, sistem koordinat map–odom, global costmap, dan Smac Hybrid-A* pada ROS 2 Navigation2. Hasil sintesis menunjukkan bahwa tidak terdapat satu profil yang unggul pada seluruh indikator. Candidate B memiliki residual estimator paling rendah, sedangkan Candidate A memiliki beberapa

indikator continuity dan endpoint error yang lebih baik pada run tertentu. Baseline dipertahankan sebagai konfigurasi operasional karena secara terintegrasi memberikan P95 measurement age yang rendah, continuity di atas 99% pada EKF lokal dan global, residual yang tetap rendah, *planning time* 925 ms, *final distance to goal* 0,45047 m, serta status navigasi SUCCEEDED.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, beberapa pengembangan yang dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut. Arah pengembangan ini juga selaras dengan sistematika laporan yang menempatkan saran pada peningkatan sensor, tuning EKF, penyempurnaan model, planner/controller, dan perluasan skenario pengujian.

1. Validasi lokalisasi perlu menggunakan ground truth posisi dan orientasi yang independen serta memiliki akurasi lebih tinggi, misalnya GNSS RTK atau sistem referensi posisi lain yang sesuai. Pada penelitian ini, RMSE EKF global merupakan residual terhadap measurement GNSS, sehingga belum dapat dinyatakan sebagai error posisi absolut kendaraan. Ground truth eksternal memungkinkan evaluasi error *x*, *y*, heading, drift, serta kestabilan transformasi map–odom secara lebih objektif.
2. Tuning EKF lokal dan global perlu dilanjutkan menggunakan eksperimen terkontrol satu variabel atau rancangan eksperimen yang mempertahankan parameter lain tetap. Frequency, sensor_timeout, measurement covariance *R*, process noise *Q*, dan predict_to_current_time pada penelitian ini berubah sebagai satu paket Candidate A, Baseline, dan Candidate B. Pengujian lanjutan dengan start condition, lintasan, durasi, sumber measurement, dan parameter lain yang sama diperlukan agar pengaruh individual setiap parameter terhadap RMSE, measurement age, continuity, covariance, dan *position jump* dapat ditentukan secara kuantitatif.
3. Mekanisme pembobotan measurement dapat dikembangkan menjadi lebih adaptif terhadap kualitas sensor aktual. Sistem saat ini telah menggunakan kualitas GNSS, termasuk hAcc, sebagai bagian dari pembentukan covariance posisi. Pengembangan selanjutnya dapat memperluas pendekatan tersebut terhadap IMU dan odometri, misalnya dengan menyesuaikan covariance ketika terjadi peningkatan noise, perubahan kualitas heading, atau indikasi slip pada odometri. Dengan demikian,

tingkat kepercayaan EKF terhadap setiap measurement dapat menyesuaikan kondisi kendaraan dan lingkungan secara dinamis.

4. Evaluasi global costmap dan Smac Hybrid-A* perlu dilakukan menggunakan skenario planner yang lebih terkontrol dan lebih kompleks. Perbandingan parameter seperti `minimum_turning_radius`, `downsampling_factor`, `cost_penalty`, dan planner tolerance sebaiknya menggunakan posisi awal, goal, peta, footprint, serta kondisi costmap yang identik dan diulang pada beberapa run. Pengujian dapat diperluas pada tikungan dengan radius berbeda, koridor sempit, jalur yang memerlukan clearance berbeda, serta perubahan obstacle sehingga pengaruh parameter terhadap *planning time*, panjang jalur, minimum clearance, endpoint error, dan keberhasilan pencarian dapat dianalisis secara lebih kuat.
5. Pengujian terintegrasi perlu diperluas dari keberhasilan global planning menuju evaluasi performa kendaraan selama mengikuti jalur dalam durasi dan jarak tempuh yang lebih panjang. MPPI saat ini digunakan sebagai *local controller* pendukung, tetapi tuning dan evaluasi performanya belum menjadi objek penelitian. Pengembangan berikutnya dapat mengukur *path tracking error*, respons steering, kecepatan aktual, jumlah replanning, kestabilan map–odom, akumulasi drift odometri, serta tingkat keberhasilan misi pada pengulangan lintasan. Pengujian tersebut akan memberikan evaluasi *end-to-end* mulai dari estimator hingga kemampuan kendaraan mengikuti global path secara aktual. Batasan laporan saat ini memang menempatkan tuning MPPI dan sistem persepsi di luar objek utama penelitian.