

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian yang telah dilaksanakan menghasilkan beberapa poin kesimpulan sebagai berikut:

1. Implementasi prototipe sistem simulasi navigasi bagi jemaah umrah berhasil diwujudkan melalui arsitektur terlepas (*decoupled architecture*) menggunakan protokol komunikasi UDP socket. Pendekatan ini efektif memisahkan lingkungan pemrosesan penglihatan komputer (ORB-SLAM2) dari mesin *rendering* grafis Unity 3D, yang menjamin stabilitas sistem tanpa menyebabkan kebocoran memori (*memory leak*) atau penutupan paksa pada lingkungan simulasi. Integrasi logika State Machine terbukti berhasil menegakkan kesesuaian simulasi terhadap kurikulum rukun ibadah secara sekuensial, dan didukung oleh pengujian fungsionalitas *Black Box* yang memastikan mekanisme deteksi jarak spasial serta transisi rukun berjalan sempurna tanpa cacat logika.
2. Evaluasi kinerja algoritma ORB-SLAM2 di dalam lingkungan *Digital Twin* mencatatkan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk *Absolute Trajectory Error* (ATE) sebesar 2,94 meter pada skenario trajektori melingkar Tawaf, dan 9,26 meter pada skenario trajektori linier Sa'i. Tingkat pergeseran pose lokal yang diukur melalui *Relative Pose Error* (RPE) mencatatkan nilai RMSE sebesar 0,91 meter untuk Tawaf dan 1,56 meter untuk Sa'i. Meskipun modul *Loop Closing* terbukti andal mengoreksi akumulasi drift secara otomatis pada akhir lintasan, sistem *Monocular SLAM* masih rentan terhadap ambiguitas skala (*scale ambiguity*) dan mengalami degradasi performa berupa *tracking lost* saat pengguna melakukan manuver rotasi ekstrem, seperti pada putaran balik di ujung lintasan bukit Marwah.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis, kesimpulan, serta keterbatasan sistem yang telah ditemukan selama proses implementasi dan evaluasi pada penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat direkomendasikan untuk pengembangan dan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Peningkatan Algoritma ke *Visual-Inertial SLAM* (VI-SLAM)

Untuk mengatasi masalah ambiguitas skala (*scale ambiguity*) pada kamera *monocular* dan kerentanan kehilangan pelacakan (*tracking lost*) akibat manuver rotasi ekstrem, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan data sensor inersia (*Inertial Measurement Unit/IMU*) dengan data visual. Implementasi kerangka kerja yang lebih mutakhir, seperti ORB-SLAM3, diharapkan mampu memberikan ketahanan pelacakan yang lebih solid meskipun pengguna melakukan pergerakan kepala yang sangat cepat di dalam lingkungan simulasi.

2. Migrasi ke Platform VR *Standalone* dan *Mobile*

Guna memperluas aksesibilitas dan hilirisasi aplikasi agar dapat digunakan secara praktis oleh jemaah secara massal, disarankan untuk melakukan rekayasa ulang perangkat lunak. Modul komputasi algoritma V-SLAM perlu di-*porting* menggunakan *Native Development Kit* (NDK) agar dapat berjalan langsung di atas arsitektur ARM perangkat bergerak. Hal ini akan membebaskan sistem dari ketergantungan pada *server desktop* berlapis WSL, sehingga aplikasi dapat dieksekusi secara mandiri pada kacamata VR *Standalone* (seperti Meta Quest) maupun ponsel pintar.

3. Integrasi Hambatan Dinamis (*Dynamic Obstacles*) pada *Digital Twin*

Lingkungan simulasi dapat disempurnakan dengan menambahkan agen kecerdasan buatan (AI) untuk merepresentasikan pergerakan acak kerumunan jemaah lain di area tawaf dan sa'i. Simulasi kepadatan massa yang realistis ini akan menciptakan oklusi dinamis, yang sangat berguna untuk menguji dan melatih sistem SLAM tingkat lanjut yang dikombinasikan dengan *Deep Learning* guna mengabaikan objek bergerak dan mempertahankan titik *landmark* statis.

4. Perluasan Cakupan Topologi Ruang Ibadah

Penelitian lanjutan dapat memperluas jangkauan pemodelan lingkungan 3D di luar area *Mataf* dan *Masaa*. Simulasi navigasi dapat dikembangkan untuk mencakup rute kompleks lainnya, seperti pemanduan arah dari pintu-pintu kedatangan eksterior (gerbang Masjidil Haram), titik-titik fasilitas umum di dalam masjid, hingga simulasi pengambilan *Miqat*. Perluasan ini akan memberikan pembentukan memori spasial (peta kognitif) yang lebih komprehensif bagi jemaah sebelum keberangkatan ke Tanah Suci.

