

INTISARI

IMPLEMENTASI SISTEM NAVIGASI *QUADROTOR* BERBASIS *EXTENDED KALMAN FILTER* PADA FPGA

Oleh

Muhammad Luthfi Harwidjaya

21/476813/PA/20606

Algoritma estimasi keadaan seperti *Extended Kalman Filter* (EKF) sangat penting untuk sistem navigasi quadrotor, namun memiliki komputasi yang intensif. Masalah timbul ketika dijalankan pada prosesor utama *flight controller*, karena dapat membebani sistem dan menurunkan performa kendali. Penelitian ini mengusulkan solusi berupa implementasi algoritme EKF pada *Field Programmable Gate Array* (FPGA) yang berfungsi sebagai *co-processor*. Sistem ini menggabungkan data sensor inersia yang mencakup akselerometer, giroskop, dan magnetometer—untuk menghasilkan estimasi orientasi dan posisi quadrotor secara *real-time*. Dengan memindahkan tugas estimasi ke perangkat keras terpisah, beban komputasi pada prosesor utama berhasil dikurangi secara signifikan. Implementasi ini menggunakan FPGA Lattice iCE40 berdaya rendah dengan desain yang dikembangkan menggunakan *toolchain open-source*.

Arsitektur EKF yang dirancang secara modular dalam bahasa Verilog menunjukkan akselerasi performa yang signifikan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa latensi pemrosesan EKF pada FPGA hanya 1.06 μs per iterasi (53 siklus *clock*), dengan total latensi *loop* termasuk komunikasi rata-rata 62 μs . Angka ini jauh lebih cepat dibandingkan implementasi EKF berbasis perangkat lunak pada *flight controller* (sekitar 350-500 μs). Dari segi akurasi, pada pengujian dengan data sensor fisik, sistem mencapai kesalahan estimasi orientasi rata-rata di bawah 1 derajat (RMSE untuk *roll* 0.52°, *pitch* 0.55°, dan *yaw* 0.85°). Estimasi posisi menunjukkan *drift* yang merupakan karakteristik sensor inersia tanpa bantuan eksternal, dengan RMSE pada sumbu X, Y, dan Z masing-masing sebesar 0.26 m, 0.29 m, dan 0.93 m.

Desain ini terbukti efisien dalam penggunaan sumber daya, hanya memakai 91% sel logika (LUTs) yang tersedia dan mengonsumsi daya sekitar 80 mW. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa arsitektur EKF berbasis FPGA mampu menjadi solusi estimasi keadaan yang sangat cepat, akurat, dan efisien untuk sistem navigasi quadrotor, sehingga dapat meningkatkan stabilitas dan keandalan sistem secara keseluruhan.

Kata kunci— FPGA, *Extended Kalman Filter*, *Sensor Fusion*, Navigasi Quadrotor, Estimasi Keadaan.

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF QUADROTOR NAVIGATION SYSTEM BASED ON EXTENDED KALMAN FILTER ON FPGA

By

Muhammad Luthfi Harwidjaya

21/476813/PA/20606

State estimation algorithms like the Extended Kalman Filter (EKF) are crucial for quadrotor navigation systems, but they are computationally intensive. A problem arises when these algorithms run on the flight controller's main processor, as they can overload the system and degrade control performance. This research proposes a solution by implementing the EKF algorithm on a Field Programmable Gate Array (FPGA) that functions as a co-processor. This system combines inertial sensor data—including from an accelerometer, gyroscope, and magnetometer—to produce real-time estimations of the quadrotor's orientation and position. By offloading the estimation task to separate hardware, the computational load on the main processor is significantly reduced. This implementation uses a low-power Lattice iCE40 FPGA with a design developed using an open-source toolchain.

The modular EKF architecture, designed in the Verilog language, demonstrates a significant performance acceleration. Test results show that the EKF processing latency on the FPGA is only 1.06 μ s per iteration (53 clock cycles), with a total loop latency, including communication, averaging 62 μ s. This is substantially faster than software-based EKF implementations on a flight controller (approximately 350-500 μ s). In terms of accuracy, tests with physical sensor data achieved an average orientation estimation error of less than 1 degree (RMSE for roll: 0.52°, pitch: 0.55°, and yaw: 0.85°). The position estimation exhibited drift, which is characteristic of inertial sensors without external aiding, with an RMSE on the X, Y, and Z axes of 0.26 m, 0.29 m, and 0.93 m, respectively.

This design proves to be efficient in resource utilization, using only 91% of the available logic cells (LUTs) and consuming approximately 80 mW of power. The results of this research demonstrate that an FPGA-based EKF architecture can provide a very fast, accurate, and efficient state estimation solution for quadrotor navigation systems, thereby enhancing the overall stability and reliability of the system.

Keywords— FPGA, Extended Kalman Filter, Sensor Fusion, Quadrotor Navigation, State Estimation