



ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have been deployed for various applications due to their autonomous flight ability. One of the most popular UAV is the quadrotor which is capable of performing high-speed maneuvers and vertical takeoff and landing. For a quadrotor to be able to fly autonomously, it needs a way of determining its position and orientation. There are various methods of navigation. The most common method is by using an integrated inertial navigation system (INS) and global navigation satellite system (GNSS). In GNSS-denied environments, visual-based methods can be applied. However, these methods cannot work in both GNSS-denied and poor visual environments. Using the INS method only can cause the position estimation to diverge over time. To solve this problem, vehicle dynamic models (VDMs) have been applied to aid the inertial navigation. However, most of the VDM-aided inertial navigation research conducted experiments without analyzing the observability. Observability analysis is necessary to guarantee the observed states can converge to their true values.

Nonlinear observability analysis was conducted on the recent quadrotor VDM-aided inertial navigation model. This analysis was conducted on two cases: VDM-aided inertial navigation and VDM parameter estimation. This observability analysis was then validated using simulation from a real flight dataset. In the case of inertial navigation, only the inertial measurement unit (IMU) and barometric altimeter sensors are utilized. For the case of parameter estimation, combinations between the IMU, GNSS, and barometric altimeter sensors are utilized to discover which sensor configurations enable parameter estimation.

In the case of inertial navigation, the quadrotor's position in the x and y -axes are unobservable while all the other trajectory states are observable. This analysis theoretically proves the experimental results from previous research that VDM-aided quadrotor inertial navigation is only feasible for short periods of GNSS-denied flight. In the case of parameter estimation, an interesting finding was discovered that parameter estimation is still possible even though only an IMU sensor is available.

Keywords : quadrotor, inertial navigation, vehicle dynamic model, system identification, nonlinear observability analysis



INTISARI

Pesawat nirawak telah diaplikasikan pada berbagai bidang dikarenakan kemampuannya untuk terbang secara otomatis. Salah satu pesawat nirawak yang paling umum adalah *quadrotor* yang memiliki kemampuan terbang dengan kecepatan tinggi serta lepas landas dan mendarat secara vertikal. Agar *quadrotor* mampu terbang secara otomatis, diperlukan pengetahuan tentang posisi dan orientasinya yang disebut dengan navigasi. Terdapat berbagai macam metode navigasi. Metode yang paling umum adalah menggabungkan sistem navigasi inersial dengan *global navigation satellite system* (GNSS). Ketika *quadrotor* melalui lingkungan tidak dilingkupi sinyal GNSS, metode navigasi visual dapat digunakan. Namun, metode ini tidak dapat digunakan dalam lingkungan yang tidak dilingkupi sinyal GNSS dan pandangan yang tidak jelas. Penggunaan navigasi inersial sendiri dapat menyebabkan estimasi posisi divergen dari waktu ke waktu. Untuk mengatasi masalah ini, *vehicle dynamic model* (VDM) telah diaplikasikan untuk membantu navigasi inersial. Namun, mayoritas riset navigasi inersial dengan bantuan VDM langsung melakukan eksperimen tanpa melakukan *observability analysis*. *Observability analysis* diperlukan untuk menjamin *state* yang diestimasi konvergen ke nilai sebenarnya.

Nonlinear observability analysis dilakukan pada model navigasi inersial *quadrotor* yang dibantu oleh VDM. Analisis ini dilakukan pada dua kasus: navigasi inersial yang dibantu oleh VDM dan estimasi parameter VDM. *Observability analysis* ini divalidasi dengan simulasi dari dataset penerbangan *quadrotor*. Untuk kasus navigasi inersial, hanya sensor *inertial measurement unit* (IMU) dan *barometric altimeter* yang digunakan. Untuk kasus estimasi parameter, kombinasi sensor IMU, GNSS, dan *barometric altimeter* digunakan untuk menemukan konfigurasi sensor mana yang dapat digunakan untuk mengestimasi seluruh parameter.

Untuk kasus navigasi inersial, posisi *quadrotor* pada sumbu x dan y tidak *observable*. Analisis ini membuktikan secara teori hasil eksperimen dari riset terdahulu bahwa navigasi inersial *quadrotor* yang dibantu oleh VDM hanya dapat digunakan untuk periode terbang yang pendek. Untuk kasus estimasi parameter, sebuah penemuan menarik ditemukan bahwa estimasi parameter masih dimungkinkan walaupun hanya sensor IMU yang tersedia.

Kata kunci – *quadrotor*, navigasi inersial, *vehicle dynamic model*, identifikasi sistem, *nonlinear observability analysis*