

## ファジィインテグラルスライディングモード制御を用いたクワッドロータの姿勢制御 Attitude Control of Quadrotor Using Fuzzy Integral Sliding Mode Control

○中村圭太<sup>1</sup>, 内山賢治<sup>2</sup>, 増田開<sup>2</sup>

\*Keita Nakamura<sup>1</sup>, Kenji Uchiyama<sup>2</sup>, Kai Masuda<sup>2</sup>

This paper proposes an attitude controller based on the integral sliding mode control (ISMC) method using fuzzy logic to decide gains. The main objective of this work is to reduce the chattering phenomenon. ISMC provides robustness not only during the sliding mode but also to the entire system. However, chattering phenomenon of control inputs deteriorates control performance when using ISMC. We apply the fuzzy logic to ISMC so as to obtain appropriate gains of the methods. The simulation results show the validity of the proposed control method.

### 1. 緒言

クワッドロータは災害時の捜索救助活動など様々な場面で使われている。しかし、屋外で動作する際に突風などの外乱の影響を受けやすいため高精度な軌道追従制御器の設計と実装が課題である。制御器としてPID制御やLQR制御, SMCなどがある。SMCは高速応答とロバスト性, 設計のシンプルさがあるが, 従来のSMCでは到達モードにロバスト性の欠如があり, 有限時間内での収束が保証されていない。そこで, インテグラルスライディングモード制御(ISMC)を用いてシステム全体にロバスト性をもたらす。一方でスライディングモードはチャタリングに問題があり, スイッチングゲインと密接な関係があるため外乱に応じてゲイン調整のできるファジィ制御を用いる。

本研究では, ファジィ制御と ISMC を組み合わせた制御器におけるクワッドロータの回転制御においてロバスト性を維持したままチャタリングを低減した制御器を提案する。

### 2. クワッドロータの制御

#### 2.1 クワッドロータの運動モデル

クワッドロータの座標系を Figure 1 と回転の運動方程式は以下のように表される。

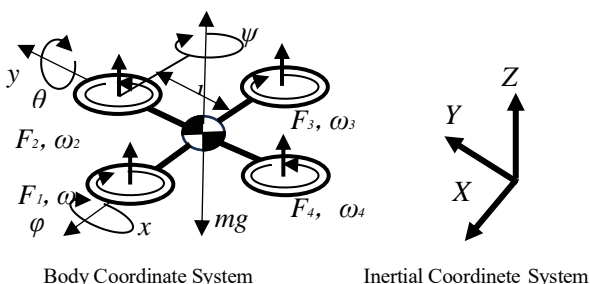


Figure 1. Coordinate system of quadrotor

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{I_x}(\dot{\theta}\dot{\psi}(I_y - I_z) + \tau_\phi) + d \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{I_y}(\dot{\phi}\dot{\psi}(I_z - I_x) + \tau_\theta) + d \quad (2)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{I_z}(\dot{\phi}\dot{\theta}(I_x - I_y) + \tau_\psi) + d \quad (3)$$

$\phi, \theta, \psi$  はロール, ピッチ, ヨーの角度,  $m$  は機体質量,  $I_x, I_y, I_z$  は慣性モーメント,  $d$  は外乱である。

$$\tau_\phi = (-F_2 + F_4) \quad (4)$$

$$\tau_\theta = (-F_1 + F_3) \quad (5)$$

$$\tau_\psi = D(-F_1 + F_2 - F_3 + F_4) \quad (6)$$

$D$  は抗力係数,  $F_1, F_2, F_3, F_4$  はそれぞれのロータの推力である。

#### 2.2 インテグラルスライディングモード制御

制御入力として次式を考える。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{no} + \mathbf{u}_{co} = -\mathbf{K}\mathbf{x} - \alpha \text{sgn}(\boldsymbol{\sigma}) \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = S \left[ \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_0) - \int_0^t (\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{no}) d\tau \right] \quad (8)$$

ここで,  $S$  は超平面,  $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_\phi \ \alpha_\theta \ \alpha_\psi]$  はスイッチングゲイン,  $\mathbf{K}$  は LQR のゲインである。  $\mathbf{u}_{no}$  の状態量のフィードバックには LQR 制御が使われている<sup>[1]</sup>。

#### 2.3 ファジィ制御則

ISMC のロバスト性を低下させることなく, チャタリングを低減するためにスイッチングゲインに対してゲイン調整のできるファジィルール<sup>[2]</sup>を適用する。スライディングモードのチャタリングはスイッチングゲインと密接な関係がある。超平面から離れていれば, 大きなゲインを入力し超平面に近づける必要がある。一方, 超平面に拘束できている場合は大きなゲインを入力する必要はない。そこで超平面からの距離を入力し, ゲインを出力する。

1 : 日大理工・学部・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

$$l = \frac{|S_1 \mathbf{x} + S_2 \dot{\mathbf{x}}|}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}} \quad (9)$$

$S_1, S_2$ は超平面の傾きの比率,  $l$ は超平面からの距離である. メンバシップ関数を Figure 2 に示す. メンバシップ関数によってゲインの大きさを決めている.

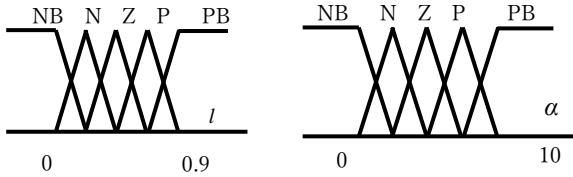


Figure 2. Membership function of  $l$  and  $\alpha$

### 3. 数値シミュレーション

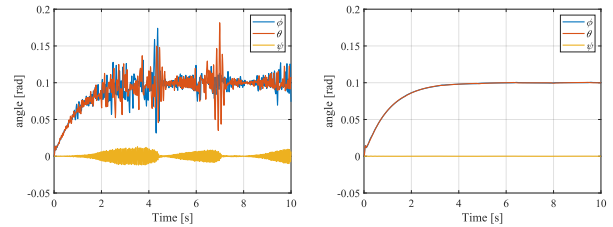
数値シミュレーションでは, 機体質量が 1.6[kg], 機体重心からロータ中心までの距離を 0.27[m]のクワッドロータを制御対象とする. 外乱として振幅 1, 角周波数 2[rad/s]の正弦波を加える.

Table1 に制御入力のチャタリングの p-p 値を示す. ISMC では, 各ロータで約 40[N]のチャタリングが発生している. 一方, FISMIC では約 0.4~0.7[N]となっており, 提案手法によりチャタリングを抑えていることが分かる.

Figure 3(a)に ISMC を適用した際のクワッドロータの姿勢角変化を, Figure 3(b)に提案手法である FISMIC を適用した際の姿勢角の時間履歴を示す. ISMC を用いた制御ではチャタリングの影響を受け, 姿勢角が激しく変化し制御性能の劣化が顕著に現れている. FISMIC ではチャタリングの影響が抑えられ, 姿勢角の時間応答にチャタリングの影響は見られない. Figure 4 に FISMIC を適用した際のゲインの時間変化, Figure 5 に各手法の推力の時間変化を示す. ISMC では, チャタリングの発生が見られる. しかし, FISMIC では, Figure 4 に見られるように, チャタリングが発生しないようゲインが適切に変化することで制御性能の劣化を抑えることができた.

Table1. Peak to peak values of thrust

|       | Using ISMC | Using FISMIC |
|-------|------------|--------------|
| $F_1$ | 44.8       | 0.738        |
| $F_2$ | 42.6       | 0.604        |
| $F_3$ | 43.0       | 0.420        |
| $F_4$ | 43.2       | 0.420        |



(a)using ISMC (b)using FISMIC

Figure 3. Time responses of angle

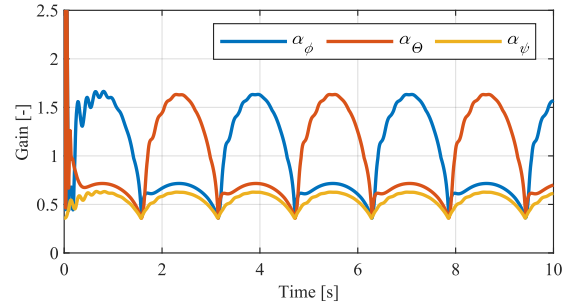
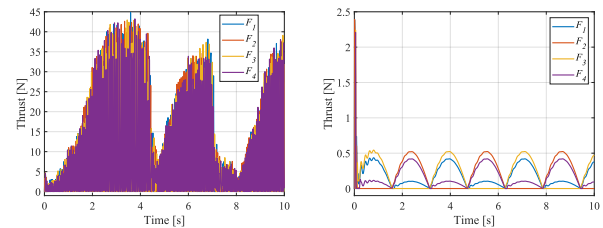


Figure 4. Fuzzy Gains



(a) ISMC (b) FISMIC

Figure5. Time responses of thrust

### 4. 結言

インテグラルスライディングモード制御における減の決定に決めるファジィ理論を適用し, クワッドロータの姿勢制御を行った. 従来のインテグラルスライディングモード制御ではチャタリングにより制御性能の劣化が顕著にみられたが, 提案手法ではチャタリングを抑える事で高い制御性能が得られた. 今後は, 回転運動だけではなく, 並進運動制御にも適用したクワッドロータの制御を行う.

### 参考文献

- [1] S. Kamal, A. Chalanga, Ramesh Kumar P. and B. Bandyopadhyay, "Multivariable continuous integral sliding mode control," 2015 International Workshop on Recent Advances in Sliding Modes (RASM), pp. 1-5, 2015
- [2] Y. Liu, C. He and S. Cheng, "Dual Fuzzy Sliding Mode Control of Manipulator Based on Rotor UAV Platform," 2022 6th International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR), pp. 63-69, 2022