

## RISE に基づく UAV フォーメーション制御におけるロバスト性の検証

### Robustness of Formation Control of UAVs Based on RISE

○秋江俊介<sup>1</sup>, 内山賢治<sup>2</sup>, 増田開<sup>2</sup>\*Shunsuke Akie<sup>1</sup>, Kenji Uchiyama<sup>2</sup>, Kai Masuda<sup>2</sup>

This paper verifies robustness of a flight control system using Robust Integral of Signum of Error (RISE) that is a feedback type controller for a class of uncertain nonlinear system. Control performance during formation flying of UAVs is generally affected by modelling uncertainties and disturbances such as wind gust. We design the flight control system for the formation flying based on RISE to have robustness against a sinusoidal disturbance and an actuator dynamics. Optimal control theory is applied to design a controller considering the actuator dynamics. Results of numerical simulation of formation flying of UAVs show the effectiveness of the proposed flight control system.

#### 1. 緒言

複数機の UAV から構成される協調システムは、作業効率の面から注目されており、同時に、様々な制御手法が提案されている。このような協調システムにおいて問題となるのが、モデル化の不確かさや外乱に起因する制御性能の劣化とシステムの不安定化である。

これに対し、RISE(Robust Integral of Signum of Error)と呼ばれる制御手法が研究されている<sup>[1]</sup>。RISE は PID 制御に積分型スライディングモードを加えたものであり、符号関数を導入することで高いロバスト性を有しながら入力連続性を保持している点を特徴としている。しかし、これまでの研究<sup>[2]</sup>では RISE に関するロバスト性の検証が不十分であり、その適用可能範囲が明確になっていない。例えば、アクチュエータの動特性が制御性能に与える影響は大ききく、これによるシステムの不安定化が懸念されるものの、アクチュエータの動特性に対するロバスト性については一切検討されていない。

そこで本研究では、アクチュエータの動特性を考慮した RISE に基づく飛行制御系を提案する。適用例として UAV のフォーメーションフライトを示し、その有効性を数値シミュレーションにより確認する。数値シミュレーションでは、アクチュエータの帯域内の正弦波外乱をシステムに加え、提案した制御系のロバスト性についても検証を行う。

#### 2. UAV のダイナミクス

本稿では、リーダー・フォロワ構造を利用したマルチコプタ型 UAV のフォーメーション制御を行う。制御系を設計する際には、プロペラが実際に推力を発生させるまでの遅れ(アクチュエータの動特性)を考慮する。

式(1)に、鉛直方向に定常飛行している UAV の状態方程式を示す。ただし、UAV には外乱が加わるものとする。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \dot{h} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tilde{T}_{total} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f \quad (1)$$

ここで、 $h$  は地上座標系における高度、 $f$  は外乱を示す。また、 $\tilde{T}_{total}$  はシステムの操作量を示し、各プロペラの推力を合計したものである。

次に、推力制御用アクチュエータの動特性を 1 次遅れ要素と仮定すると、アクチュエータの動特性を示す伝達関数  $G_{th}$  は次式で表せる。

$$G_{th} = \frac{K}{T_{th}s + 1} \quad (2)$$

ここで、 $K$  は任意の定数、 $T_{th}$  はアクチュエータの時定数を示す。いま、アクチュエータの指令値を  $\tilde{T}$  とし、実際に機体に加わる力を  $\tilde{T}_{total}$  とすると、(2)式より次式が得られる。

$$T_{th} \dot{\tilde{T}}_{total} = -\tilde{T}_{total} + K\tilde{T} \quad (3)$$

(1)式で示された UAV の状態方程式に、(3)式で示したアクチュエータの動特性を考慮すると、(1)式の状態方程式は以下の式のように書き換えられる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h \\ \dot{h} \\ \tilde{T}_{total} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{th}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \dot{h} \\ \tilde{T}_{total} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{T_{th}} \end{bmatrix} \tilde{T} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} f \quad (4)$$

但し、UAV 間は常に双方向に通信することができるものとする。また、リーダー機は仮想機とし、外乱の影響を受けないと仮定し、少なくとも 1 機の UAV は、このリーダー機からの情報を取得できるものとする。

1 : 日大理工・学部・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

### 3. RISE に基づく補償器

複数機の UAV の中で、 $i$  番目の機体に次のような制御入力  $\tilde{T}_{total_i}(t)$  を加える。

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{total_i}(t) = & - \sum_{j \neq i} \left\{ a_{ij} \gamma_0 (h_i(t) - h_j(t)) \right. \\ & \left. + \gamma_1 (\dot{h}_i(t) - \dot{h}_j(t)) \right\} \\ & - a_{ii} \{ \gamma_0 (\dot{h}_i(t) - \dot{h}_i(t)) + \gamma_1 \dot{h}_i(t) \} \\ & - \hat{f}_i(t) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\gamma_0$  と  $\gamma_1$  は任意の定数であり、 $a_{ij}$  はグラフ理論によるネットワークの構造を示す変数である。これは、 $i$  番機が  $j$  番機の情報取得しているか否かを表しており、取得している場合は 1、取得していない場合を 0 としている。 $h_i(t)$  は仮想リーダー機の高度を示す。また、 $\hat{f}_i(t)$  は RISE を用いた外乱推定値であり式(6)のように表される。

$$\hat{f}_i(t) = \alpha_f e_{h_i}(t) + \int_0^t \{ e_{h_i}(\tau) + \beta_f \text{sgn}(e_{h_i}(\tau)) \} d\tau \quad (6)$$

ここで、 $\alpha_f, \beta_f > 0$  は任意の定数、 $e_{h_i}(t)$  は UAV の状態推定誤差  $\tilde{h}_i(t)$  によって構成される新たな変数を示す。変数  $e_{h_i}(t)$  を次のように定義する。

$$e_{h_i}(t) = \tilde{h}_i(t) + \frac{\gamma_0}{\gamma_1} \dot{\tilde{h}}_i(t) \quad (7)$$

ここで、 $\tilde{h}_i(t)$  は UAV の状態推定誤差を示し、UAV の状態値  $h_i(t)$  とその推定値  $\hat{h}_i(t)$  を用いて、次のように表される。

$$\tilde{h}_i(t) = h_i(t) - \hat{h}_i(t) \quad (8)$$

また、状態推定値  $\hat{h}_i(t)$  の二階微分  $\ddot{\hat{h}}_i(t)$  は次のように表され、これを積分することで  $\dot{\hat{h}}_i(t), \hat{h}_i(t)$  を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{\hat{h}}_i(t) = & - \sum_{j=1}^n a_{ij} \left[ +\gamma_1 \{ \dot{\hat{h}}_i(t) - \dot{\hat{h}}_j(t) \} \right. \\ & \left. - a_{ii} \left[ \gamma_0 \{ \dot{h}_i(t) - \dot{h}_i(t) \} + \gamma_1 \dot{\hat{h}}_i(t) \right] \right. \\ & \left. + \frac{\gamma_0}{\gamma_1} \{ \dot{h}_i(t) - \dot{\hat{h}}_i(t) \} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

### 4. 数値シミュレーション

数値シミュレーションで用いたパラメータの値を Table 1 に示す。また、変数  $a_{ij}$  及び  $a_{ii}$  については、全機が問題なくネットワークで繋がれていると仮定し、全て 1 とした。各機体の初期高度については、仮想リーダー機を 2 [m]、1 番機から 3 番機の高度をそれぞれ 2.5 [m]、1 [m]、0 [m] とし、外乱については、振幅 0.6 [N]、周波数 0.159 [Hz] の正弦波を(1)式の  $f$  として加えた。入力に関しては絶対値が過大になることを防ぐため、入力の制約を  $\pm 5$  [N] とした。

RISE を含まない制御系によるシミュレーション結果を Figure1 に、RISE を含む制御系によるシミュレーション結果を Figure2 に示す。Figure1 と Figure2 を比較すると、入力に大きな違いは見られないが、UAV の高度の時間履歴を見ると、RISE を加えた方がより収束性が高いことが分かる。以上より、アクチュエータの動特性を考慮した場合でも RISE の有効性を確認した。

### 5. 結言

本研究では、外乱が存在するマルチ UAV システムに対してモータのダイナミクスを導入した上で、より厳密な条件下でも RISE を含んだシステムがロバスト性を維持することを確認した。

### 参考文献

[1] 駒木根悠, 滑川徹, 「RISE に基づくマルチ UAV システムのロバスト合意制御」, 第 59 回自動制御連合講演会, ThB6-4, 2016.

[2] Aman Behal, Warren Dixon, Darren M. Dawson, and Bin Xian, “Lyapunov-Based Control of Robotic Systems”, CRC Press, pp.233-247, 2010.

Table 1. Simulation Conditions

$T_{th}$	$\gamma_0$	$\gamma_1$	$\alpha_f$	$\beta_f$	K1
0.223	1	1.90	30	0.01	0.303

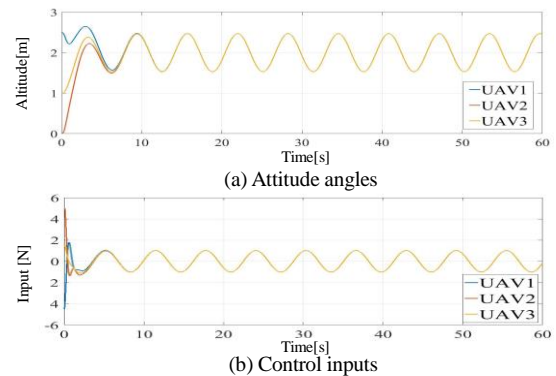


Figure 1. Time responses of UAV without RISE

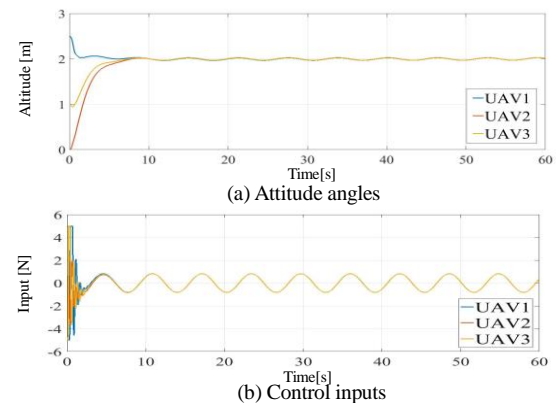


Figure 2. Time responses of UAV with RISE