

## 知能化外乱オブザーバを用いた飛行制御 Flight Control with Intelligent Disturbance Observer

○古川大貴<sup>1</sup>, 内山賢治<sup>2</sup>, 増田開<sup>2</sup>\*Daiki Furukawa<sup>1</sup>, Kenji Uchiyama<sup>2</sup>, Kai Masuda<sup>2</sup>

The presence of uncertainties and wind disturbances is one of the most significant problems for quadrotor flight and can affect its control performances. In this paper, the intelligent disturbances observer (IDO) designed with DAC observer and radial basis function (RBF) neural networks estimate uncertainties such as wind disturbances and modeling error without information on nonlinear terms of mathematical models. The IDO can tune adaptive law based on the Lyapunov function and can train neural networks online. To decide the mean and variance of the RBF neural network, the k-means clustering algorithm is used as an offline method, which creates error datasets for the difference between the reference model and the disturbance model. The validity of the proposed observer is shown through numerical simulation.

### 1. 緒言

UAV(Unmanned Aerial Vehicle)の研究や開発は世界中で行われており、様々な場での活躍に注目が集まっている。それに伴い、これまで多くの誘導制御則が提案されてきた。特に Quadrotor は機動性に優れ垂直離着陸ができるなどの利点が多い反面、その数学モデルは強い非線形性を有しており、さらに風外乱などの不確かさが飛行性能に非常に大きな影響を与えてしまう。そのような問題に対して、ロバスト性と外乱抑圧の両方にアプローチ可能な手法がいくつか提案されているものの、複雑な設計を要する傾向にある。また、スライディングモード制御は設計が容易であるものの、広帯域のアクチュエータ特性を要求するなどの問題もある。また、強い風外乱をニューラルネットワークで直接推定することによって打ち消し、軌道に追従させるものも存在するが、モデル化誤差を考慮して設計していないことが問題としてあげられる。

そこで、本研究では数学モデルの非線形項が未知である Quadrotor に対して、強い風外乱状況下でも制御できるニューラルネットワークを用いた補償器を提案する。最後に数値シミュレーションを行い提案手法の有効性を示す。

### 2. Quadrotor の制御系

#### 2.1 運動方程式及びコントローラ

Quadrotor の制御系を考えるにあたって以下のように数学モデル<sup>[1]</sup>を定める。

$$\begin{cases} \dot{\xi} = \mathbf{v} \\ m\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{R}_{I/B}\mathbf{F} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}(\Phi)\ddot{\Phi} = \Omega(\Phi, \dot{\Phi})\dot{\Phi} + \Psi^T\Gamma \quad (2)$$

(1), (2)式は、それぞれ機体の並進運動及び回転運動を示す。 $\xi$ は慣性座標系での位置、 $m$ は質量、 $\Phi$ はオイラー角 $\mathbf{R}_{I/B}$ 、 $\Psi$ は座標変換行列である。また、 $\mathbf{F}$ 及び $\Gamma$ は制御入力、 $\mathbf{M}$ 及び $\Omega$ は慣性モーメントとオイラー角による非線形行列を示す。

Quadrotor の制御系における外生入力は、Dynamic Inversion(DI)法により運動を線形化し、最適レギュレータによって決定する。モデル化誤差や風外乱のある状況下では、DI法によって完全に非線形項を打ち消すことができないため、非線形項をオブザーバで推定する必要がある。本研究ではDACオブザーバとニューラルネットワークの補償器からなるIDOを用いて推定しQuadrotorの制御系を設計する。DACオブザーバでは、運動方程式に現れる非線形項を未知パラメータとして時間 $t$ の1次関数で近似する。

#### 2.2 Intelligent Disturbance Observer (IDO)

DACオブザーバでは推定しきれないモデル化誤差や風外乱をRadial Based Function(RBF)ニューラルネットワークにより補償する<sup>[2]</sup>。ニューラルネットワークからの入力 $\mathbf{W}_i$ をニューラルネットワークの重み行列 $\mathbf{S}_i$ を活性化関数とし以下のように定義する。

$$v_{nn_i} = \mathbf{W}_i^T \mathbf{S}_i \quad (3)$$

ここで、ニューラルネットワークの適応則は任意の適応ゲイン $\lambda_i$  ( $i = x, y, z$ )から以下のように定めることで重み行列を修正する。

$$\dot{\mathbf{W}}_i = \lambda_i \mathbf{S}_i \mathbf{E}_i \mathbf{P}_i \mathbf{B}_i \quad (4)$$

$\mathbf{E}_i$ は、線形化した理想プラントと実際の出力の誤差で $\mathbf{B}_i$ は誤差方程式の入力行列である。また、 $\mathbf{P}_i$ はHurwitz安定行列 $\mathbf{G}_i$ と任意の正定行列 $\mathbf{Q}_i$ から次式を満たすような正定対象行列である。

1 : 日大理工・院 (前) 2 : 日大理工・教員・航宇

$$\mathbf{G}_i^T \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \mathbf{G}_i = \mathbf{Q}_i \quad (5)$$

RBF ニューラルネットワークの平均値と分散は k-means clustering algorithm により決定する。

### 2.3 安定解析

リアプノフ関数の候補を以下のように定める。

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{E}_i^T \mathbf{P} \mathbf{E}_i + \frac{1}{\lambda_i} \text{tr}\{\mathbf{W}_i'^T \mathbf{W}_i'\} \quad (6)$$

RBF ニューラルネットワークの最適な重み  $\mathbf{W}_i^{\text{opt}}$  から  $\mathbf{W}_i'$  は以下のように定義する。

$$\mathbf{W}_i' = \mathbf{W}_i^{\text{opt}} - \mathbf{W}_i \quad (7)$$

リアプノフ関数の候補を微分した結果を次式に示す。

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \mathbf{E}_i^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_i + \text{tr}\{(\lambda_i \mathbf{B}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{E}_i \mathbf{S}^T - \dot{\mathbf{W}}_i^T) \mathbf{W}_i'\} \quad (8)$$

(4)式の適応則を用いることで負定となり安定性が証明できる。

### 3. 数値シミュレーション

風外乱は Dryden モデル<sup>[3]</sup>を用いる。また、(9)式に示す抗力の式により入力外乱を算出した。

$$D = \frac{1}{2} C_d \rho U^2 A \quad (9)$$

Quadrotor の質量  $m = 0.6$  [kg], 慣性モーメントは  $I_x = I_y = 5 \times 10^{-3}$  [kg · m<sup>2</sup>],  $I_z = 1 \times 10^{-2}$  [kg · m<sup>2</sup>] とする。Quadrotor は、原点を初期値として、高度 3 [m] で円運動する軌道を目指軌道とした。Figure 2 を見ると、DAC オブザーバは、外乱の絶対値の増大に伴い推定誤差も増大している。これに対して、IDO の推定誤差は、ほぼゼロ付近で推移していることが分かる。

Figure 3 に飛行軌跡を示す。DAC オブザーバを用いたときは円軌道から逸脱している様子が確認できる。一方、IDO を用いたときは、参照軌道から大きく逸脱することなく、安定した円軌道を描いており、外乱環境下においても優れた制御性能を示している。

### 4. 結言

数学モデルの非線形項と強い風外乱を、ニューラルネットワークを用いて同時推定する補償器を提案した。推定精度を向上させることで目標軌道に追従させることができた。また、数値シミュレーションでは、提案手法により推定精度が向上し、目標軌道への追従が可能であることを確認した。

### 参考文献

[1] K. Nonami, F. Kendoul, S. Suzuki, et al.: “Autonomous Flying Robot, Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles”, Springer, 2010

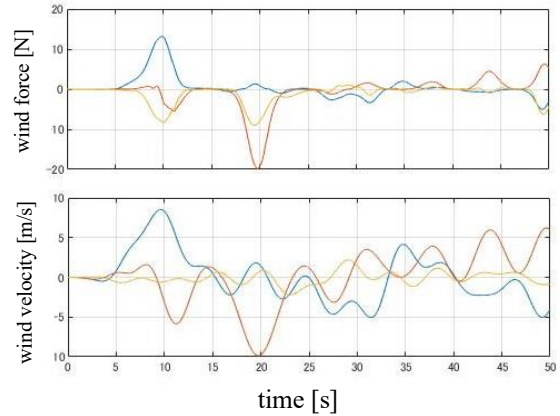


Figure 1. Wind disturbances (— x, — y, — z )

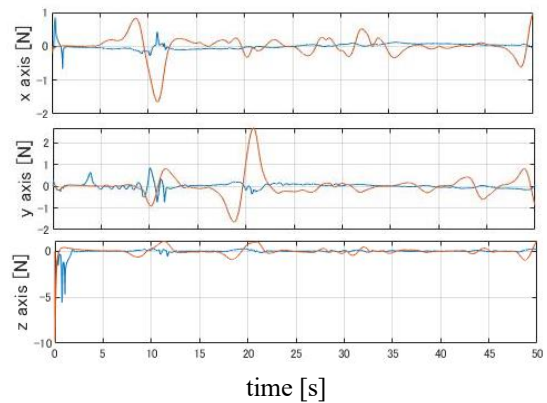


Figure 2. Estimation error of designed observers (— IDO, — DAC)

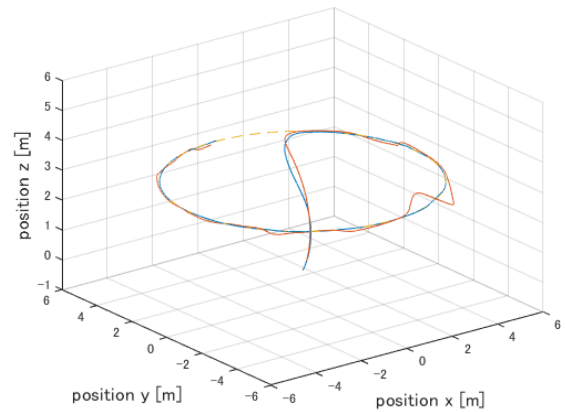


Figure 3. Trajectory of quadrotor following circular orbit (— reference, — IDO, — DAC)

- [2] I. M. Lazim, A. R. Husain, N. A. M. Subha, and M. A. M. Basri: “Intelligent Observer-Based Feedback Linearization for Autonomous Quadrotor Control”, International Journal of Engineering & Technology, 7 (4.35), pp.904-911, 2018
- [3] S. L. Waslander, C. Wang: “Wind Disturbance Estimation and Rejection for Quadrotor Position Control”, AIAA Infotech@Aerospace Conference, AIAA-2009-1983, 2009.