

外乱環境下で UGV へ着陸を想定したクワッドロータの制御系設計 Control System Design of Quadrotor for Landing on UGV in Disturbed Environment

○岡本誠彦¹, 内山賢治², 増田開²

*Masahiko Okamoto¹, Kenji Uchiyama², Kai Masuda²

The quadrotor has been used in various missions because of their small takeoff and landing space and flexible flight attitude. However, the quadrotor has problems in terms of flight time and cruising distance due to battery powered. This paper treats the cooperation control between the quadrotor and the UGV. The quadrotor lands on UGV and arrives at its destination. We propose the controller considering the effect of wind disturbance on control performance for the landing problem. The control system consists of a controller using feedback linearization and a disturbance observer. The numerical simulation is conducted to verify the validity of the proposed control system.

1. 緒言

クワッドロータは離着陸のスペースが小さく、飛行姿勢が柔軟であるという特徴があることから、無人航空機の研究のホットスポットである。しかし、そのほとんどはバッテリー駆動のため、30分程度しか飛行できない。この問題を解決するため、走行するUGV上への離着陸を可能とする方法が提案された^[1]。しかし、[1]では、外乱の影響を考慮していない。クワッドロータは外乱の影響を強く受けることから、高い精度の着陸を実現するためには、外乱を正確に把握する必要がある。

そこで、本研究では、外乱環境下でクワッドロータが走行するUGVに安定して着陸可能にすることを目的として、出力の値から外乱を推定でき、かつ構造がシンプルで実装が簡単である外乱オブザーバを用いたクワッドロータの制御系の設計手法を提案する。しかし、既存の外乱オブザーバのほとんどは線形システムのみしか適用できないため^[2]、クワッドロータの運動モデルにフィードバック線形化を用いて、非線形システムの線形化を行った。最後に、数値シミュレーションにより、設計した制御系の有効性を確認する。

2. 運動方程式

本研究では **Figure 1** のようなクワッドロータを使用する。

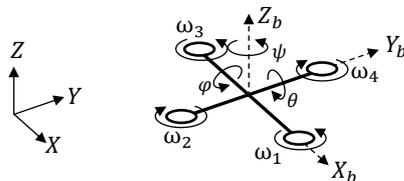


Figure 1. Coordinate system of quadrotor

慣性座標系での運動方程式は、次の並進と回転の2つの式で記述される。

$$m\ddot{\xi} = -mg + \mathbf{T} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\eta} + \mathbf{C}\dot{\eta} = \Psi^T \boldsymbol{\tau}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & c\theta s\phi \\ 0 & -s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \Psi^T \mathbf{J} \Psi$$

$$\mathbf{C} = -\Psi^T \mathbf{J} \dot{\Psi} + \Psi^T (\Psi \dot{\eta} \times \mathbf{J} \Psi)$$

ここで、 m は機体質量、 ξ は慣性座標での位置、 \mathbf{g} は重力ベクトル、 η はオイラー角、 \mathbf{J} は慣性テンソル、 \mathbf{T} は並進入力、 $\boldsymbol{\tau}$ はトルク入力、 $s()$ と $c()$ は $\sin()$ と $\cos()$ とする。

3. 制御系設計

3.1 フィードバック線形化

(1), (2)式の非線形方程式を線形化するため、フィードバック線形化を行う。

並進入力 $\mathbf{T} = [T_x \ T_y \ T_z]^T$ 、トルク入力 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_\phi \ \tau_\theta \ \tau_\psi]^T$ をそれぞれ次のように定義する。

$$\mathbf{T} = m\mathbf{g} + m\boldsymbol{\mu} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}\Psi\tilde{\boldsymbol{\tau}} + (\Psi^T)^{-1}\mathbf{C}\dot{\eta} \quad (4)$$

ここで、疑似入力 $\boldsymbol{\mu} = [\mu_x \ \mu_y \ \mu_z]^T$ 、 $\tilde{\boldsymbol{\tau}} = [\tilde{\tau}_\phi \ \tilde{\tau}_\theta \ \tilde{\tau}_\psi]^T$ とする。(3), (4)式を運動方程式に代入すると以下のようになる。

$$\ddot{\xi} = \boldsymbol{\mu} \quad (5)$$

$$\ddot{\eta} = \tilde{\boldsymbol{\tau}} \quad (6)$$

3.2 並進方向の制御

状態量 $\boldsymbol{\chi} = [\xi - \xi_d \ \dot{\xi} - \dot{\xi}_d]^T$ と定義し、次の誤差方程式を作る。添え字 d は、目標値を表している。

1 : 日大理工・院 (前)・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\chi} + \mathbf{B}(\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\xi}_d)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{I}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7)式に対し最適レギュレータを適用し、状態フィードバックゲインを求める。

3.3 姿勢角の生成

(3)式で示された並進入力の各軸方向の成分を用いて、クワッドロータの姿勢角指令値を生成する。各指令値は次式のようになる。

$$\varphi_d = -\tan^{-1}\left(\frac{T_y}{T_z}\right) \quad (8)$$

$$\theta_d = \tan^{-1}(T_x/T_z), \quad \psi_d = 0$$

3.3 回転方向の制御

状態量 $\mathbf{e} = [\boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_d \quad \dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\boldsymbol{\eta}}_d]^T$ と定義し、次の誤差方程式を作る。

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{Ae} + \mathbf{B}(\ddot{\boldsymbol{\tau}} - \ddot{\boldsymbol{\eta}}_d) \quad (9)$$

(9)式に対し最適レギュレータを適用し、状態フィードバックゲインを求める。

3.4 外乱オブザーバの設計

外乱を加えた状態方程式は、次のように示される。

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\chi} + \mathbf{B}(\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\xi}_d) + \mathbf{B}\mathbf{a} \quad (10)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{a}} = [\hat{a}_{wx} \quad \hat{a}_{wy} \quad \hat{a}_{wz}]^T$ とし、拡大形を組む。

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \bar{\mathbf{A}}\boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{u}' + \mathbf{H}(\boldsymbol{\xi} - \hat{\boldsymbol{\xi}}) \quad (11)$$

\mathbf{H} はオブザーバゲインである。また、それぞれの行列を、以下のように定義する。

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\chi} \\ \hat{\mathbf{a}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\bar{\mathbf{C}} = [\mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 6}]$$

$$\bar{\mathbf{F}} = [\mathbf{0}_{3 \times 6} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3}]$$

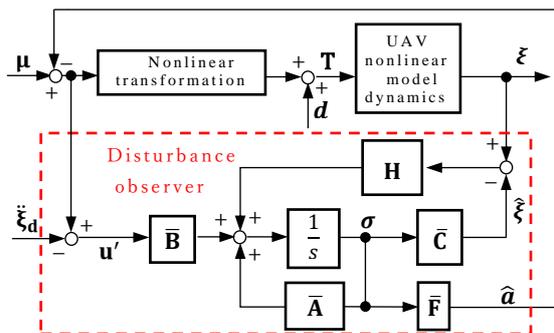


Figure 2. Block diagram of disturbance observer

4. 数値シミュレーション

UGV は半径 30[m]、速度 1[m/s]で等速円運動し、クワッドロータと UGV の相対位置、相対速度が共に 0 となった時点でミッションを完了とした。なお、外乱は正弦波で与えた。Figure 3 を見ると、外乱オブザーバで外乱を正確に推定できていることが分かる。また、Figure 4 ではクワッドロータが外乱の環境下でも走行する UGV に追従できており、提案手法の有効性が確認できた。

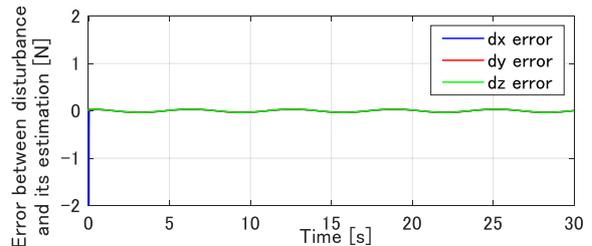


Figure 3. Estimation of disturbance error

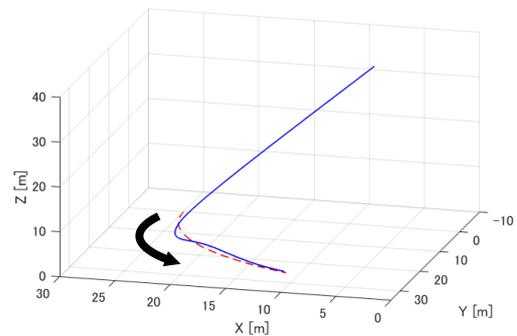


Figure 4. Trajectories (— :UAV, - - - :UGV)

5. 結言

本研究では、外乱オブザーバを用いることで、外乱環境下でも、走行する UGV にクワッドロータの着陸が可能な制御系を提案した。また、数値シミュレーションにより、提案手法の有効性を示すことができた。

6. 参考文献

- [1] 福田悠貴, 椿野大輔: 単一の制御則によるクワッドロータの陸上車両への追従に関する研究, 第61回自動制御連合会, 2018, pp.595-600
- [2] A. A. Saif, "Design of disturbance observers for nonlinear discrete time systems," 2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2016, pp. 370-375