

## UAV のフォーメーションフライトにおけるネットワーク情報量の抑制 Reduction of Information Redundancy for Formation Flight of UAVs

○中村亜祐<sup>1</sup>, 鈴木大介<sup>2</sup>, 内山賢治<sup>3</sup>\*Ayu Nakamura<sup>1</sup>, Daisuke Suzuki<sup>2</sup>, Kenji Uchiyama<sup>3</sup>

Abstract: This paper describes the network configuration using graph theory for a formation flight of UAVs. It would be difficult to achieve a formation flight of UAVs because there exists time delay when UAVs communicate each other. Therefore, it is necessary to improve a network configuration on reduction of information redundancy for the formation flight. Guidance law is derived by using potential function method that can reduce calculation time to control UAVs. Numerical simulation is performed to verify the validity of proposed system.

### 1. はじめに

無人航空機 (UAV) を用いたフォーメーションフライトにより<sup>[1]</sup>, 効率的かつ多彩なミッションの遂行が期待されている. しかし, UAV の協調制御には, 通信の遅延に起因するシステムの不安定性, 故障や通信障害によるシステムの脆弱性などが指摘されている.

一般に, フォーメーションを形成するためのネットワーク構造は集中型と分散型に大別される. 前者では, リーダー機がシステム全体を制御することから, フォロワー機の計算負荷は比較的軽微なものとなる. しかし, リーダー機の故障や通信障害はミッションの継続に致命的なものとなってしまうため信頼性に問題が生じてしまう. 一方, 後者では, 各機体が自ら情報を収集し制御することでフォーメーションが形成されるため, 事故などに対して柔軟に対応することができるものの, 情報量は膨大なものになる. そこで, 本稿では上記の脆弱性を考慮しつつフォーメーション形成に必要な情報量を削減するため, 制御目的に応じて異なったネットワーク構造を用いた誘導則を提案し, 数値シミュレーションにより, その有効性を確認する.

### 2. ネットワーク構造

集中型・分散型のネットワークには一長一短があることから, 各々の長所を活かした情報ネットワークを構成しフォーメーションフライトを実現することが望ましい. そこで, 本稿では目標位置への誘導に集中型, 衝突回避に対して分散型のネットワーク構造を用いる.

#### 2.1 機体の誘導

ここでは, 機体の誘導に集中型ネットワークを適用する場合, その構造の信頼性を高めるために, Virtual Leader という概念を導入する. これにより故障のリスクを低減化できるとともに, 処理能力の高い装置を用いることで遅延なく制御を行うことが可能となる.

#### 2.2 情報量の削減

障害物回避や UAV 同士の衝突回避には, 基本的に相互の情報が必要となるため, 分散型のネットワーク構造をとることになる. そこで, フォーメーションフラ

イトに最低限必要となる情報について検討し, 情報量の削減を図る.

複数の機体で協調制御を行う場合, 以下の式でシステムを表現することができる<sup>[3]</sup>.

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L}\mathbf{x} + \mathbf{b}\mathbf{u} \quad (1)$$

$\mathbf{x}$  は各機体の情報,  $\mathbf{u}$  は基準となる機体の情報を表している, また,  $\mathbf{L}$  はグラフラプラシアン行列を示し, 次数行列  $\mathbf{D}$  と隣接行列  $\mathbf{A}$  を用いて次式で表せる.

$$\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A} \quad (2)$$

フォーメーションフライトを実現する場合, Fig.1 左図のように UAV 同士が相互に情報を交換することが考えられるが, この場合, 処理すべき情報量が多く, システムの安定性に問題が生じてしまう. 情報量を削減するためには(2)式のラプラシアン行列の構造を見ればよい. その際, 以下の3点について考慮する.

- ・衝突回避が行える最低限の情報量
- ・情報の方向を考える (有向グラフ)
- ・情報量の授受はできるだけ均等にする

上記3点を考慮したネットワーク構造の例を Fig.1 右図に示す. この場合, 次数行列  $\mathbf{D}$  は次式で表せる.

$$\mathbf{D} = \begin{cases} \text{diag}\left(\frac{n}{2}, \dots, \frac{n}{2}, \frac{n-1}{2}, \dots, \frac{n-1}{2}\right) & (\text{偶数機}) \\ \text{diag}\left(\frac{n-1}{2}, \dots, \frac{n-1}{2}\right) & (\text{奇数機}) \end{cases} \quad (3)$$

また, 隣接行列  $\mathbf{A}$  の非対角要素  $a_{ij}$  は以下の様に表せる. なお, 隣接行列  $\mathbf{A}$  の対角要素は 0 である.

$i > j$  のとき

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, (i+j) \text{ が奇数} \\ 0, (i+j) \text{ が偶数} \end{cases} \quad (4)$$

$i < j$  のとき

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, (i+j) \text{ が偶数} \\ 0, (i+j) \text{ が奇数} \end{cases} \quad (5)$$

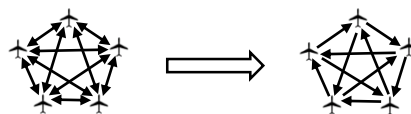


Figure 1. Network configuration of UAVs

### 3. 誘導則

#### 3.1 Leader 機

Virtual Leader 機の目標ラインへの誘導には誘導ポテンシャル関数<sup>[1]</sup>を用い、その勾配場を速度場として指令速度を導出する。

$$U_i^S = C_h \left( \sqrt{(\rho_l - \rho_d)^2 + 1} + \sqrt{z_l^2 + 1} \right) \quad (6)$$

$$\rho_l = x_l \text{ or } y_l \text{ or } z_l$$

$C_h$  は誘導ポテンシャル関数の最大変化率を表し、 $x_l, y_l, z_l$  は Leader 機の位置を表す。

#### 3.2 Follower 機

Virtual Leader 機との相対位置の制御は配列ポテンシャル関数 $U^A$ を用いる。UAV 同士の衝突回避には反発ポテンシャル関数 $U_{ij}^R$ を用いる<sup>[2]</sup>。 $U_i^A$  と  $U_{ij}^R$  を偏微分し合成した速度場  $\mathbf{v}_i$  を(8)式に示す。

$$U_i^A = C_A \sqrt{\rho_{li}^2 + 1} + C_A \sqrt{(z_{li} - n_i)^2 + 1} \quad (7)$$

$$\rho_{li} = \sqrt{(x_{li} - l_i)^2 + (y_{li} - m_i)^2 + (z_{li} - n_i)^2}$$

$$\mathbf{v}_i = -\nabla_i U_{ii}^A(\mathbf{x}_{ii}) - \nabla_i U_{ij}^R(\mathbf{x}_{ij}) \quad (8)$$

$C_A$  は誘導ポテンシャル関数の最大変化率を表し、 $l_i, m_i, n_i$  はフォーメーションの形状および位置を決定するパラメータを示す。また、 $x_{li}, y_{li}$  および  $z_{li}$  は Leader 機から見た  $i$  番目の機体の相対位置を表す。

ここで、(8)式を  $x$  軸方向の速度指令値  $u_{i,d}$  として用いるため慣性座標から機体軸に座標変換する。また、(8)式から次式の指令方位角  $\psi_{i,d}$ 、指令ピッチ角  $\theta_{i,d}$  が得られる。

$$\psi_{i,d} = \tan^{-1} \frac{v_{i,d}}{u_{i,d}} \quad (9)$$

$$\theta_{i,d} = \tan^{-1} \frac{w_{i,d}}{\sqrt{u_{i,d}^2 + v_{i,d}^2}} \quad (10)$$

### 4. 数値シミュレーション

理論の有効性を確認するために、5 機のデルタフォーメーションを想定した数値シミュレーションを行った。この場合ラプラシアン行列は次式のように表せる。

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 2 & -1 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

この構造に基づいて UAV で情報の授受を行った数値シミュレーション結果を Fig.2 から Fig.5 に示す。数値シミュレーションでは、実機に搭載している CPU と GPS の周期の違いやセンサノイズも模擬している。データの補間には EKF を用いた。図より、5 機の UAV は、衝突することなくフォーメーションが形成されていることが分かる。

### 5. まとめ

本稿ではフォーメーションを形成するために、情報を抑制したネットワーク構造を提案した。また、数値シミュレーションにより提案手法の有効性が確認できた。

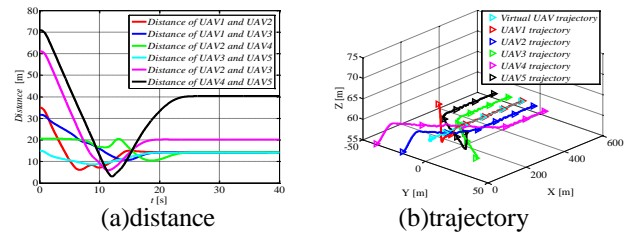


Figure 2. Relative distance and trajectories of UAVs

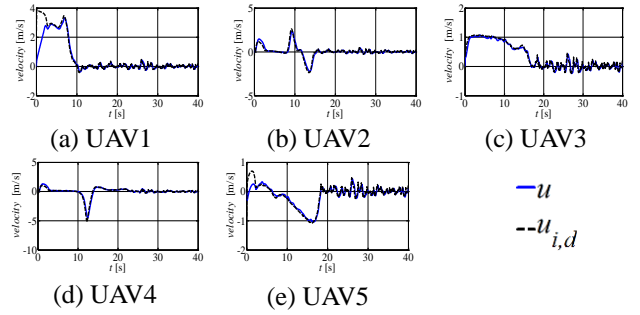


Figure 3. Time responses of velocity of UAVs

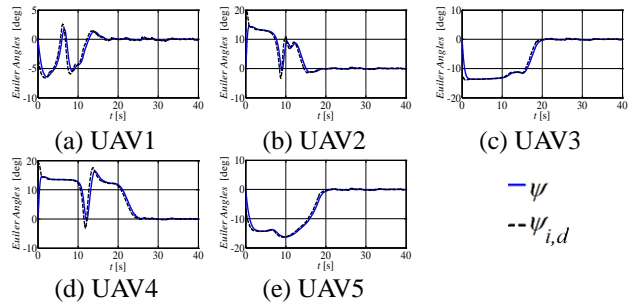


Figure 4. Time responses of heading angle of UAVs

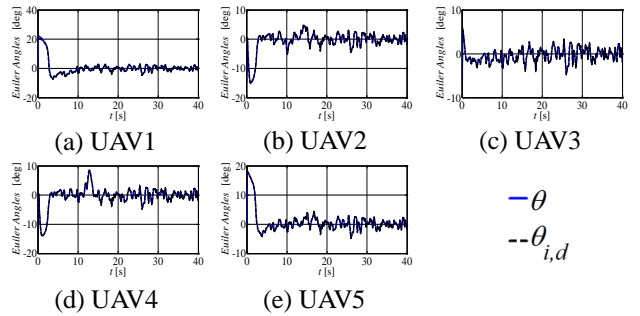


Figure 5. Time responses of pitch angle of UAVs

### 参考文献

- [1] 鈴木真之, 内山賢治, D.Bennet and C.R.McInnes: 速度場に分岐理論を適用した UAV の 3 次元フォーメーションフライト, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.59, No.693, pp.259-265, 2011
- [2] Kento Nakai and Kenji Uchiyama: Vector Fields for UAV Guidance Using Potential Function Method, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA 2013-4626, 2013.
- [3] J. A. Guerrero and R. Lozano: Flight Formation Control, WILEY.