ダイナミクスを考慮した4次系UAVのフォーメーション制御

○栗城 康弘　滑川 徹（慶應義塾大学）

Formation Control of UAVs With a Fourth-order Flight Dynamics

*Y. Kuriki and T. Namerikawa (Keio University)

Abstract– In this paper, we first show that linearized model of UAVs like quadrotors is expressed as a fourth-order system, and then, we propose formation control algorithm for the fourth-order system after formulating problems. The proposed control law is based on consensus algorithm and a leader-follower structure is applied to the control law in order that the leader can provide the followers with information of target states. We also show that the proposed control algorithm can guarantee accurate formation keeping when fundamental assumptions about the network which is composed of UAVs and a leader are satisfied. Finally, the proposed approach is validated by some simulations.

Key Words: UAV, Formation, Consensus, Cooperative Control, Quadrotor, leader-follower

1　はじめに

近年，マルチビークルシステムの協調制御，特にフォーメーションに関する問題は大きな注目を浴びており[1)–5)]，この協調制御技術は，無人航空機 (UAV : Unmanned Aerial Vehicle)，人工衛星，無人潜水艇，移動観測ロボット等への適用が期待されている．特に民需用の UAV については，Quadrotor を代表とするマルチローター型の無人小型ヘリコプタが近年関心を集めており，そのシンプルな機構を生かして，それを用いた研究が盛んに行われているのみならず，空中監視，空中観測，研究用プラットフォーム等の用途として，既に一般に販売されているものもある[6),7)]．

さて，マルチビークルシステムの協調制御に関する問題について，著者らは合意 (Consensus) をベースとしたフォーメーションの問題に注目[8),9)]してきている．文献 [8] では，ネットワーク構造に依存しない物体の協調取囲みの制御則を提案し，文献 [9] では，リーダー・フォロワー構造を利用し，ビークル群がリーダー機に追従してフォーメーションを達成する制御則を提案した．著者らが提案してきた合意アルゴリズムをベースとした制御則については，1 次系のシステムを対象として研究が盛んに行われてきたという背景から，ダイナミクスを考慮していない 1 次系を制御対象としていた．

しかしながら，Quadrotor を含む UAV は一般的には非線形のダイナミクスを有しており，文献 [9] で提案した手法を UAV モデルへ如何に適用するかが課題であった．そこで，著者らは近年注目を集めている Quadrotor を考え，理想的な状態を仮定すると，Quadrotor は 4 次系のシステムで表現できることに着眼し，文献 [9] の手法を発展させ，また，リーダー・フォロワー構造を利用することで，4 次系で表現される Quadrotor がフォーメーションを達成する制御則を提案する．

本稿では，まず，Quadrotor のモデル化，制御目的について説明する．次に，その設定した問題に対して，Quadrotor に適用する制御則を提案し，その制御則が妥当であることを証明する．最後に，提案した制御則の有効性を数値シミュレーションにより検証する．

2　問題設定

本節では制御対象である Quadrotor のモデル化，制御目的について説明する．

2.1　Quadrotor のモデル化

本稿では，制御対象として Quadrotor を考え，4 つのプロペラに独立に制御入力を与えることができるものとする．Quadrotor は十分低速かつ高度一定で飛行するものとして，これに働く空気抵抗，ローター渦干渉を含む空気力は無視する．また，プロペラは十分早く応答するものとして，各プロペラに対する推力指令からプロペラが実際に指令推力を発生するまでの遅れも無視する．この場合，ヨー方向の運動は発生させず，高度，水平面内速度一定で運動している場合を基準とした時の Quadrotor の縦系・横系の線形化モデルは (1) 式のように表現できる．ここでの制御入力は，各軸周りのモーメント指令値であるが，Quadrotor のプロペラ位置の幾何学的関係から，この各軸周りのモーメント指令値から各プロペラが発生すべき推力を算出できる．なお，各記号の意味は Table 1 のとおりである．

$$\text{縦系}:\begin{cases}\dot{x}=u\\ \dot{u}=-g\theta\\ \dot{\theta}=q\\ \dot{q}=\frac{1}{I_{yy}}M_\theta\end{cases}\qquad \text{横系}:\begin{cases}\dot{y}=v\\ \dot{v}=g\phi\\ \dot{\phi}=p\\ \dot{p}=\frac{1}{I_{xx}}M_\phi\end{cases}\tag{1}$$

次に，新たな変数として，$\tilde{\theta}=-g\theta$，$\tilde{q}=-gq$，$\tilde{M}_\theta=-\frac{g}{I_{yy}}M_\theta$，$\tilde{\phi}=g\phi$，$\tilde{p}=gp$，$\tilde{M}_\phi=\frac{g}{I_{xx}}M_\phi$ を定義すると，(1) 式はそれぞれ次のようになる．

$$\text{縦系}:\begin{cases}\dot{x}=u\\ \dot{u}=\tilde{\theta}\\ \dot{\tilde{\theta}}=\tilde{q}\\ \dot{\tilde{q}}=\tilde{M}_\theta\end{cases}\qquad \text{横系}:\begin{cases}\dot{y}=v\\ \dot{v}=\tilde{\phi}\\ \dot{\tilde{\phi}}=\tilde{p}\\ \dot{\tilde{p}}=\tilde{M}_\phi\end{cases}\tag{2}$$

さらに，新たな変数として，$r_x^{(0)}=x$，$r_x^{(1)}=u$，$r_x^{(2)}=\tilde{\theta}$，$r_x^{(3)}=\tilde{q}$，$r_y^{(0)}=y$，$r_y^{(1)}=v$，$r_y^{(2)}=\tilde{\phi}$，$r_y^{(3)}=\tilde{p}$ を定義し，縦系と横系を合わせた変数として，$r_i^{(k)}=[r_x^{(k)}\ \ r_y^{(k)}]^T$，$k\in\{0,1,2,3\}$，$M_i=[\tilde{M}_\theta\ \ \tilde{M}_\phi]^T$，$i\in$

$\{1,2,\cdots,N\}$ を定義する．この時，(2) 式の Quadrotor の縦系・横系について，(3) 式のような 4 次系のシステムを得ることができる．ここで N 機の Quadrotor を考え，右下の添字の i は，i 機目の Quadrotor に関する状態であることを表わし，また，右肩の括弧付の数字は微分の階数を意味する．本稿では，Quadrotor の縦系・横系から構成される (3) 式に示す 4 次系のシステムを制御対象とする．

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} r_i^{(0)} \\ r_i^{(1)} \\ r_i^{(2)} \\ r_i^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_i^{(1)} \\ r_i^{(2)} \\ r_i^{(3)} \\ M_i \end{bmatrix}, \quad i \in \{1,2,\cdots,N\} \tag{3}$$

Table 1: Definition of Symbols

Symbols	Meanings
x, y (m)	Position (x-axis, y-axis)
u, v (m/s)	Velocity (x-axis, y-axis)
ϕ,θ (rad)	Attitude angle (Roll, Pitch)
p, q (rad/s)	Angular velocity (Roll, Pitch)
M_ϕ,M_θ (Nm)	Control moment (Roll, Pitch)
I_{xx},I_{yy} (kgm^2)	Inertia moment (Roll, Pitch)
g (m/s^2)	Gravity constant

2.2 制御目的

本稿における制御目的は，Quadrotor が Leader 機に追従し，かつフォーメーションを形成して飛行することとする．Fig.1 では，3 機の Quadrotor が Leader 機に追従し，また，フォーメーションを形成して飛行している様子を示している．本稿では制御目的を達成させるために，Leader-Follower 構造をとるものとする．ここで，Follower 機は Quadrotor とし，また，Leader 機は，各 Quadrotor が目標とする状態を各々に付与する役割を担うものとし，Leader 機は実在，仮想どちらであっても良い．

さて，制御目的，つまり，各 Quadrotor の位置が，Leader 機から見た目標相対位置に漸近的に収束することを定式化すると次式のようになる．

$$\lim_{t\to\infty} (r_i(t) - (r_{N+1}(t) + d_i(t))) = 0 \qquad i \in \{1,2,\cdots,N\} \tag{4}$$

なお，添字の $N+1$ は，Leader 機であることを示し，また，d_i は i 機目の Quadrotor に対する Leader 機から見た目標相対位置ベクトルである．

次に，Quadrotor 群と Leader 機から構成されるネットワーク及び Leader 機に対して，この制御目的を達成させるために以下の仮定を置く．

仮定 1. *Quadrotor*（*Follower* 機）のうち少なくとも *1* 機は *Leader* 機の情報を取得しており，また，*Quadrotor* 間のネットワークは常に連結である．

仮定 2. *Leader* 機の動きは独立しており，いずれの *Quadrotor*（*Follower* 機）にも影響されない．

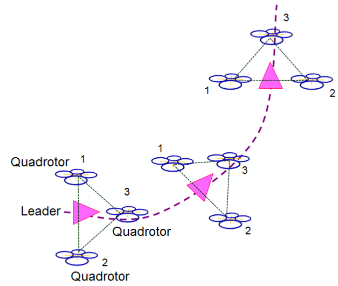

Fig. 1: A Desired Formaion

3 提案制御則

(4) 式の目的を達成するために，i 機目の Quadrotor に適用する制御則は (5) 式のとおりとする．

$$M_i(t) = -\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}\left[\sum_{k=0}^{3}\beta_k(\hat{r}_i^{(k)} - \hat{r}_j^{(k)})\right] + \dot{d}_i^{(3)} \qquad i \in \{1,2,\cdots,N\} \tag{5}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{for } j^{th} \to i^{th} \textit{ network line exists} \\ 0, & \text{for } \textit{otherwise} \end{cases} \qquad i,j \in \{1,2,\cdots,N+1\} \tag{6}$$

$$\hat{r}_j^{(k)} = r_j^{(k)} - d_j^{(k)} \qquad j \in \{1,2,\cdots,N+1\}, \quad k \in \{0,1,2,3\} \tag{7}$$

ここで，$\beta_k \in \mathbb{R}$，$k \in \{0,1,2,3\}$ は正の制御ゲイン，a_{ij} は i 番機が j 番機の情報を取得しているか否かを表わす変数で，情報を取得している場合は 1，そうではない場合は 0 となる変数である．また，$\hat{r}_i$ は，i 機目の Quadrotor の状態からその Quadrotor が目標とする状態を引いたベクトルであり，すべての Quadrotor に対して，$\hat{r}_i^{(k)}$ が Leader 機の対応する状態 $r_{N+1}^{(k)}$ に等しくなる時，制御目的が達成されることになる．

さて，4 次系のシステムで表わされる Quadrotor と (5) 式の制御則について，次の定理が成り立つ．

定理 1. $N \geq 1$ 機の *Quadrotor* を考え，*Leader* 機を含む *Quadrotor* 群は仮定 *1*～*2* を常に満たすものとする．各 *Quadrotor* に対し制御則 *(5)* を適用する．また，*Quadrotor* と *Leader* 機からなるネットワーク構造のグラフラプラシアンの 0 を除く最小の固有値を λ_{min} とする．

この時，制御則内の制御ゲイン β_k，$k \in \{0,1,2,3\}$ について，次の条件を満たすよう選定する時，制御目的は漸近的に達成される．

$$\beta_k > 0, \quad \forall k \in \{0,1,2,3\} \tag{8}$$

$$\lambda_{min} > \frac{\beta_1^2}{\beta_1\beta_2\beta_3 - \beta_0\beta_3^2} \tag{9}$$

$$\beta_1\beta_2 > \beta_0\beta_3 \tag{10}$$

[証明] (3) 式で表わされる i 機目の Quadrotor に (5) 式の制御則を代入する．

$$\dot{r}_i^{(3)} = -\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}\left[\sum_{k=0}^{3}\beta_k(\hat{r}_i^{(k)} - \hat{r}_j^{(k)})\right] + \dot{d}_i^{(3)} \quad i \in \{1,2,\cdots,N\} \tag{11}$$

次に，(11) 式右辺の $\dot{d}_i^{(3)}$ を左辺に移項した後，展開することで次式を得る．

$$\begin{aligned}\dot{\hat{r}}_i^{(3)} = &-\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}[\beta_0(\hat{r}_i^{(0)} - \hat{r}_j^{(0)}) + \beta_1(\hat{r}_i^{(1)} - \hat{r}_j^{(1)}) \\ &+\beta_2(\hat{r}_i^{(2)} - \hat{r}_j^{(2)}) + \beta_3(\hat{r}_i^{(3)} - \hat{r}_j^{(3)})] \\ & i \in \{1,2,\cdots,N\}\end{aligned} \tag{12}$$

次に，N 機の Quadrotor(Follower 機) と Leader 機から構成されるネットワークのグラフラプラシアン[10] $\mathcal{L} \in \mathbb{R}^{(N+1)\times(N+1)}$ は (13) 式のように定義される．なお，Leader 機は $(N+1)$ 機目としている．

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & \cdots & -a_{1N} & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \cdots & -a_{2N} & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -a_{N1} & \cdots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{Nj} & -a_{N(N+1)} \\ 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

また，同一の階数の状態を $(N+1)$ 機分まとめた状態ベクトルとして，$\hat{r}^{(k)} = [\hat{r}_1^{(k)T} \ \ \hat{r}_2^{(k)T} \cdots \ \ \hat{r}_{N+1}^{(k)T}]^T \in \mathbb{R}^{2(N+1)}$，$k \in \{0,1,2,3\}$ を新たに定義する．この状態ベクトル $\hat{r}^{(k)}$ とグラフラプラシアン $\mathcal{L}$ を用いると，(12) 式は次のように表現できる．

$$\begin{aligned}\dot{\hat{r}}^{(3)} = &-\beta_0(\mathcal{L}\otimes I_2)\hat{r}^{(0)} - \beta_1(\mathcal{L}\otimes I_2)\hat{r}^{(1)} \\ &-\beta_2(\mathcal{L}\otimes I_2)\hat{r}^{(3)} - \beta_3(\mathcal{L}\otimes I_2)\hat{r}^{(3)}\end{aligned} \tag{14}$$

ここで，$\otimes$ はクロネッカ積，I_2 は 2 次の単位行列を表わす．さて，ベクトル $\hat{r}^{(k)}$ は，Quadrotor の状態に加えて，leader 機及び目標の状態を含むことに着目し，Quadrotor の状態から leader 機及び目標の状態を独立させて (14) 式を表現することを考える．そこで，必要な代数変形を施すことにより次式を得ることができる．

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} r^{(0)} \\ r^{(1)} \\ r^{(2)} \\ r^{(3)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0_{2N} & I_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & I_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & I_{2N} \\ \beta_0\tilde{\mathcal{M}} & \beta_1\tilde{\mathcal{M}} & \beta_2\tilde{\mathcal{M}} & \beta_3\tilde{\mathcal{M}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} r^{(0)} \\ r^{(1)} \\ r^{(2)} \\ r^{(3)} \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ \beta_0\tilde{\mathcal{M}} & \beta_1\tilde{\mathcal{M}} & \beta_2\tilde{\mathcal{M}} & \beta_3\tilde{\mathcal{M}} & -I_{2N} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{r}_{N+1}^{(0)} \\ \tilde{r}_{N+1}^{(1)} \\ \tilde{r}_{N+1}^{(2)} \\ \tilde{r}_{N+1}^{(3)} \\ \tilde{r}_{N+1}^{(4)} \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ \beta_0\tilde{\mathcal{M}} & \beta_1\tilde{\mathcal{M}} & \beta_2\tilde{\mathcal{M}} & \beta_3\tilde{\mathcal{M}} & -I_{2N} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} d^{(0)} \\ d^{(1)} \\ d^{(2)} \\ d^{(3)} \\ d^{(4)} \end{bmatrix}\end{aligned} \tag{15}$$

ここで，$\mathcal{M} \in \mathbb{R}^{N\times N}$ は，グラフラプラシアン $\mathcal{L}$ の $N+1$ 行及び列成分を除した (16) 式で定義される行列であり，$\tilde{\mathcal{M}} = -\mathcal{M}\otimes I_2$ である．また，$r^{(k)} = [r_1^{(k)^T} \ \ r_2^{(k)^T} \ \ \ldots \ \ r_N^{(k)^T}]^T \in \mathbb{R}^{2N}$, $\tilde{r}_{N+1}^{(k)} = r_{N+1}^{(k)} \otimes 1_N \in \mathbb{R}^{2N}$，$d^{(k)} = [d_1^{(k)^T} \ \ d_2^{(k)^T} \ \ \ldots \ \ d_N^{(k)^T}]^T \in \mathbb{R}^{2N}$，$k \in \{0,1,2,3\}$ であり，0_{2N} は $2N$ 次のゼロ行列，1_N は N 次の単位ベクトルを表わす．

$$\mathcal{M} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \ldots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \ldots & -a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \ldots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{Nj} \end{bmatrix} \tag{16}$$

(15) 式は，Quadrotor の状態 $r^{(k)}$ に関する微分方程式とみなすことができ，Quadrotor の状態 $r^{(k)}$ は leader 機の状態 $\tilde{r}_{N+1}^{(k)}$ 及び目標の状態 $d^{(k)}$ による強制項により影響を受ける形態となっている．(15) 式の微分方程式の解を考えるあたり，まず，(15) 式の強制項をゼロとした斉次方程式の解について検討する．ここで，斉次方程式の安定性に関係する行列 $\mathcal{N}$ の固有値について検討する．行列 $\mathcal{N}$ は (15) 式内にある次式の行列である．

$$\mathcal{N} = \begin{bmatrix} 0_{2N} & I_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & I_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & I_{2N} \\ \beta_0\tilde{\mathcal{M}} & \beta_1\tilde{\mathcal{M}} & \beta_2\tilde{\mathcal{M}} & \beta_3\tilde{\mathcal{M}} \end{bmatrix} \tag{17}$$

次に，行列 $\mathcal{M}$ の固有値を λ，固有ベクトルを s，つまり，$\mathcal{M}s = \lambda s$，また，行列 $\mathcal{N}$ の固有値を μ，固有ベクトルを σ，つまり，$\mathcal{N}\sigma = \mu\sigma$ とすると，(15) 式の斉次方程式から，次の等式が成り立つ必要がある．

$$\begin{bmatrix} 0_{2N} & I_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & I_{2N} & 0_{2N} \\ 0_{2N} & 0_{2N} & 0_{2N} & I_{2N} \\ \beta_0\tilde{\mathcal{M}} & \beta_1\tilde{\mathcal{M}} & \beta_2\tilde{\mathcal{M}} & \beta_3\tilde{\mathcal{M}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{s} \\ \mu\tilde{s} \\ \mu^2\tilde{s} \\ \mu^3\tilde{s} \end{bmatrix} = \mu\begin{bmatrix} \tilde{s} \\ \mu\tilde{s} \\ \mu^2\tilde{s} \\ \mu^3\tilde{s} \end{bmatrix} \tag{18}$$

ここで，$\tilde{s} = s \otimes 1_2$ である．

さらに，(18) 式の最下行の比較から，次式が成り立つ必要がある．

$$\mu^4 + \beta_3\lambda\mu^3 + \beta_2\lambda\mu^2 + \beta_1\lambda\mu + \beta_0\lambda = 0 \tag{19}$$

(19) 式は，行列 $\mathcal{M}$ と行列 $\mathcal{N}$ の固有値の関係を示しており，行列 $\mathcal{M}$ の一つの固有値に対して，行列 $\mathcal{N}$ は 4 つの固有値を有することが分かる．また，グラフラプラシアン $\mathcal{L}$ と行列 $\mathcal{M}$ の固有値の関係については，(13) 式と (16) 式に注意すると，行列 $\mathcal{M}$ の固有値 λ は，ゼロを除くグラフラプラシアン $\mathcal{L}$ の固有値と一致することが分かる．さらに，グラフラプラシアン $\mathcal{L}$ の特性から，仮定 1 が満たされている時，唯一のゼロ固有値を持ち，対応する固有ベクトルは 1 となり，また，ゼロ以外の固有値は正値となることから，行列 $\mathcal{M}$ の固有値 λ はすべて正であることが分かる．

さて，制御目的を達成するためには，行列 $\mathcal{N}$ の固有値の実部がすべて負となる必要がある．ここで，$\lambda > 0$

を用いて，Hurwitz の安定判別法より，μ の実部がすべて負であるための必要十分条件についてまとめると，(8)-(10) 式を得ることができる．この時，(15) 式の斉次方程式の解は，ゼロに収束する．続いて，(15) 式の非斉次方程式の特解が，$r^{(k)} = \tilde{r}^{(k)}_{N+1} + d^{(k)}$，$k \in \{0, 1, 2, 3\}$ となることは，これを (15) 式に代入することで確かめることができる．

最後に，(15) 式の微分方程式の一般解は，斉次方程式の一般解＋非斉次方程式の特解として表わされることから，以上より，(15) 式の解は漸近的に次式のようになる．

$$\lim_{t\to\infty} \begin{bmatrix} r^{(0)} \\ r^{(1)} \\ r^{(2)} \\ r^{(3)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{r}^{(0)}_{N+1} \\ \tilde{r}^{(1)}_{N+1} \\ \tilde{r}^{(2)}_{N+1} \\ \tilde{r}^{(3)}_{N+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d^{(0)} \\ d^{(1)} \\ d^{(2)} \\ d^{(3)} \end{bmatrix} \tag{20}$$

以上より，仮定 1 及び仮定 2 を満たし，制御ゲイン β_k，$k \in \{0, 1, 2, 3\}$ を (8)-(10) 式を満たすよう選定する時，制御目的である $\lim_{t\to\infty} (r_i(t) - (r_{N+1}(t) + d_i(t))) = 0$ が漸近的に達成されることが分かる． □

4 数値シミュレーションによる評価

4 次系システムの Quadrotor を 3 機考え，これらと Leader 機とのネットワーク構造は Fig.2 のとおりとした．また，制御ゲイン β_k は，(8)-(10) 式を満たすよう選定し，$\beta_0 = 1$，$\beta_1 = 5$，$\beta_2 = 17$，$\beta_3 = 3$ とした．また，Leader 機は x，y 軸ともに速度 1(m/s) で移動するものとした．さらに，各 Quadrotor の目標位置については，Leader 機の進行方向ベクトルに対して，反時計方向周りに 0°，90°，270° となる方向に，Leader 機から各々5(m) 離れた位置を，それぞれ 1，2，3 番機の目標位置とした．

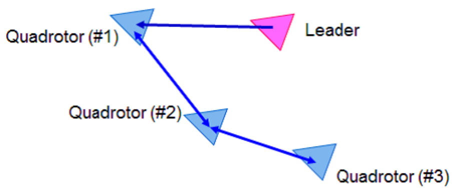

Fig. 2: A network structure

40(s) 間のシミュレーション結果を Fig.3，4 に示す．Fig.3 は移動軌跡，Fig.4 は目標位置からの誤差を示す．これらの結果から，制御目的を達成できていることが分かる．

5 おわりに

本稿では，Quadrotor の縦系・横系の線形モデルが 4 次系のシステムで表現できることを説明し，その 4 次系のシステムに対してフォーメーションを達成する制御則を提案した．また，その制御則の有効性について，数値シミュレーションにより確認した．今後は，UAV のダイナミックスとして 4 次系とは限らない，より一般的な線形システムで表現されるモデルを検討の対象としていきたい．

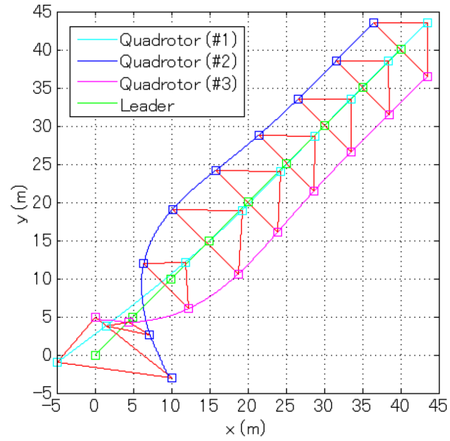

Fig. 3: Simulation results (trajectory)

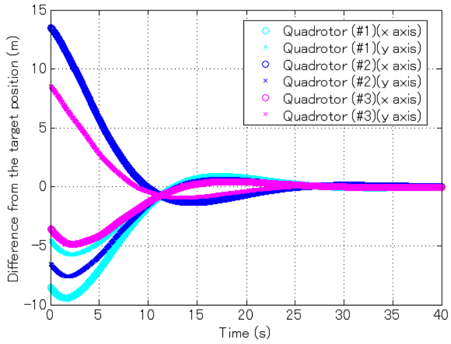

Fig. 4: Simulation results (differences from the target)

参考文献

1) R. Olfati-Saber and R. Murray, "Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time-Delays," *IEEE T. Automatic Control*, Vol. 49, No. 9, pp. 1520-1532, 2004.

2) R. Olfati-Saber, J. Fax and R. Murray, "Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 1, pp. 215-233, 2007.

3) W. Ren et al., "Information consensus in multivehicle cooperative Control," *IEEE Control Systems magazine*, 27(2), pp. 71-82, 2007.

4) W. Ren, "Consensus Tracking Under Directed Interaction Topologies:Algorithms and Experiments," *IEEE T. on control Systems Technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 230-237, 2010.

5) Z. Meng, W. Ren et al., "Leaderless and Leader-Following Consensus With Communication and Input Delays Under a Directed Network Topology," *IEEE T. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 41, No. 1, pp. 75-88, 2011.

6) http://ardrone2.parrot.com/

7) http://www.draganfly.com/

8) 川上裕樹，滑川徹，"ビークル群によるネットワークの変化に依存しない協調取り囲み行動，" 計測自動制御学会論文集, Vol. 45, No. 12, pp. 688-695, 2009.

9) 栗城康弘，滑川徹，" リーダー・フォロワー構造を利用したフォーメーション形状の制御"，第 55 回自動制御連合講演会 (1M206)，2012.

10) C. Godsil and G. Royle, *Algebraic Graph Theory*, Springar, 2001.