

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

○栗城康弘 滑川徹 (慶應義塾大学)

Control For Formation Configuration Using Leader and Follower Structure

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

Abstract— In this paper, we study the problem of trajectory tracking and reconfigurable formation control for a multi-vehicle system represented by a first-order system. More specifically, the goal of our study is to hold UAV's position relative to their leader's direction of movement even if the direction of the leader's flight path might be changed. This means that UAV's configuration which is seen from the ground will change with changes in the direction of the leader's flight path. Therefore, we have to be able to change the UAV's configuration while maintaining the formation. In order to achieve this objective, we basically extend our team's control algorithm for multi-vehicles to surround a moving target in a coordinated way. This control algorithm is based on consensus with a dynamic network topology. Furthermore, we adopt a leader and followers structure to give the followers the information of desired position relative to the leader's direction of movement. Finally, the proposed approach is validated by some simulations.

Key Words: Multi-vehicle, Reconfigurable Formation, Consensus, Leader, Follower

1 はじめに

近年, マルチエージェントシステムの協調制御に関する問題が大きく注目されている¹⁾. この問題は, 無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle), 無人潜水艇 (UUV: Unmanned Underwater Vehicle), 人工衛星, 移動観測ロボット等, さまざまなビークル (移動体) はもとより, センサーネットワークといった分野にも適用されようとしている.

このシステムのメリットとしては, 複数機が協調してタスクを行うことで, 単機でタスクを行う場合と比較してより短時間でタスクを行えるなど, より効率的にタスクを行える可能性があることである. また, あるビークルが故障などによりタスクの実行が困難となった場合でも, 残りの健全なビークル群により, 当初目的としたタスクを実行できる可能性があり, 単機の場合と比較して格段に優れた耐故障性を有することができると言える. さらに, 高機能・高性能ではあるが高価なビークルと, これと比較して機能・性能が劣ってはいるがコストメリットに優れたビークルの 2 種類を考える. 後者のコストメリットに優れたビークルは, これらを複数機協調させることにより, 高機能・高性能なビークル単機が行うタスクと同等以上のタスクを実行できる可能性もあり, コストの面でもメリットを有する可能性があると言える.

さて, マルチエージェントシステムの協調制御の問題の中で特に重要な問題は, 合意 (Consensus) やフォーメーションといった問題である. これは, 速度や位置といったある状態量が同一の値に収れんすることが, 実問題として有用な場合が多いためである. 他方, この問題が理論の枠を超えて, 実問題に適用されようとしている背景には, このシステムの前提として, 遠隔のエージェントと情報を交換し合うことが必要であり, 昨今の情報通信技術が急速に進展しているという状況がある. このネットワークは常続的かつ静的に接続されているとは限らないため, 派生の問題として, 動的ネットワークや通信遅延といった問題についても多くの研

究報告がなされてきている.

フォーメーション制御の問題については, これまでに数多くの研究が報告されてきている. 手法として, 集中制御型と分散制御型に大別されるが, 前者はリーダー機がすべてのフォロワー機の制御入力を計算するという構造である一方, 後者は, フォロワー機が情報を収集し, 己の制御入力を自ら計算するという構造である. 前者はネットワークの信頼性に大きく依存するため, 多くの研究は後者の分散型の手法に主眼を置いたものとなっている. 代表的な研究報告を数例挙げると文献^{2)~7)} などであるが, ここでは, グラフ理論⁸⁾ を用いて, マルチビークルシステムのネットワーク構造を表現し, 合意アルゴリズムをベースとしてフォーメーションを達成する手法を提案している. また, 動的なネットワーク構造下や通信の遅延が存在する場合においても安定性が保たれることも示している.

著者らのグループも, 合意をベースとしたフォーメーションの問題^{9)~11)} に注目してきており, 線形システムで表現されるマルチエージェントシステムの合意問題⁹⁾, 物体を複数のビークルで取囲む問題や保持する問題等を扱ってきた. 文献¹⁰⁾ では, ネットワーク構造に依存しない物体協調取囲みの制御則などを提案しているが, ここでは, 物体やビークルに指向性は考えていないため, フォーメーション時のビークルの配置は, 物体がどのように移動しても地上から観察すると固定されてしまう. この制御則をそのまま指向性を有する UAV や自動車といったビークルによるフォーメーションに適用すると, ビークルの配置とビークルの進行方向の関係で不自然さが生じることになる. そこで, 物体協調取囲みのアルゴリズムをもとにして, リーダー・フォロワー構造を利用し, フォロワー機が位置すべき目標情報やその変化率をリーダー機が付与することで, ビークル群がリーダー機に追従するフォーメーションを達成するとともに, リーダー機の進行方向の変化に伴って, ビークル群の配置を変更できる制御則を提案する.

本稿では、まず、問題設定として、マルチビークルシステムのモデル化、制御目的について説明し、次に制御目的を達成するための制御則を提案し、定理の証明を行う。最後に数値シミュレーションにより、提案制御則の有効性を検証する。

2 問題設定

2.1 マルチビークルシステムのモデル化

まず、本稿で扱うビークルモデルについて説明する。 N 機の同一の運動特性を有するビークルを考え、各ビークルは次式で表わされる1次系の質点モデルとする。

$$\dot{r}_i = u_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

ここで、 $r_i \in \mathbb{R}^2$ 、 $u_i \in \mathbb{R}^2$ はそれぞれ i 番目のビークルの位置及び制御入力である。

次に、マルチビークルシステムを扱うために、複数のビークル間に亘って情報がどのように流れているかを表現する必要がある。このマルチビークルシステムのネットワーク構造を表現するために、グラフ理論を用いる。

グラフ $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$ は、一般的に頂点、弧から構成される。 i 番目の頂点を v_i とすると、 $\mathcal{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ は N 個の頂点集合であり、弧集合は、 $\mathcal{A} \in \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ で表わされる。頂点 v_i から頂点 v_j が連結であるとは、この間の経路が存在する場合を言う。なお、2 頂点が連結であるために、必ずしも2 頂点が隣接している必要はない。グラフは無向グラフと有向グラフに分類され、すべての弧が双方向の向きを持つグラフ（向きを持たないグラフ）を無向グラフ、その他のグラフを有向グラフと言う。任意の頂点 v_i から任意の頂点 v_j が連結である場合、そのグラフを（強）連結グラフと言う（有向グラフの場合、強が付く）。

グラフを代数的に表現するために主に用いられるものは、隣接行列 \mathcal{A} 、次数行列 \mathcal{D} 、グラフラプラシアン \mathcal{L} である。隣接行列 $\mathcal{A} = [a_{ij}]$ の各成分は、次のように表現される。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (\text{頂点 } v_j \text{ が頂点 } v_i \text{ と連結の場合}) \\ 0, & (\text{その他の場合}) \end{cases} \quad (2)$$

マルチビークルシステムにおいては、 i 番目のビークルが j 番目のビークルから情報を取得している場合、その a_{ij} 成分を 1 とし、そうでない成分を 0 とすることを意味する。

次に、次数行列 \mathcal{D} は、頂点 v_i の入力次数が i 行目の対角成分となる行列であり、次のように表現される。

$$\mathcal{D} = \text{diag}(\deg(v_1), \deg(v_2), \dots, \deg(v_N)) \quad (3)$$

また、グラフラプラシアン \mathcal{L} は次のように定義される。

$$\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A} \quad (4)$$

グラフラプラシアン \mathcal{L} はさまざまな性質を有しているが、有用な性質としては、グラフが連結の場合、ゼロ固有値が唯一存在すること、また、固有値の実部が非負となることである。

2.2 制御目的

本稿における制御目的は次のとおりとする。 N 機のビークルが Leader 機に追従し、Leader 機を含むビークル間でフォーメーションを達成すること。また、フォーメーションの形状（地上からみたビークルの配置）の変更が可能であること。ここで、Leader 機は、仮想のものであってもよい。また、ビークルは Leader 機に追従することから、これ以降、ビークルを Follower 機と呼ぶ。

具体的に説明すると、UAV や車のような指向性を有するビークルによるフォーメーションを考える。Fig.1 に示すように、Leader 機が進行方向を変化させて移動した場合、この進行方向からみた Follower 機群の配置が一定となるよう、各 Follower 機が移動することが UAV 等のフォーメーションとして自然な動きと言え、これを達成することを制御目的としている。これを簡潔に表現すると次のようになる。

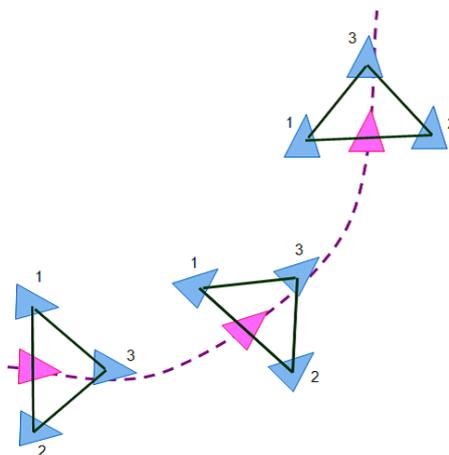


Fig. 1: An intended movement during a formation

[制御目的]

各 Follower 機は Leader 機に追従し、また、各 Follower 機の位置は Leader 機からみた時変の目標位置 (follower 機ごとに設定) に漸近的に収束すること。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|r_i(t) - (r_L(t) + d_i(t))\| = 0 \quad (5)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

ここで、Fig.2 に示すように、 r_i は i 番機 (Follower 機) の位置、 d_i は i 番機 (Follower 機) の Leader 機からみた目標位置、 r_L は Leader 機の位置を示す。

次に、この制御目的を達成するために必要となる仮定を 2 つ置く。

仮定 1

Leader 機及び Follower 機群のネットワーク構成は時変であっても問題ないが、すべての Follower 機は、Leader 機と常に連結である。

(注意) Follower 機すべてが、Leader 機と隣接した状態で連結している必要はない。

仮定 2

Leader 機の動きは独立しており, Follower 機の動きには影響されない.

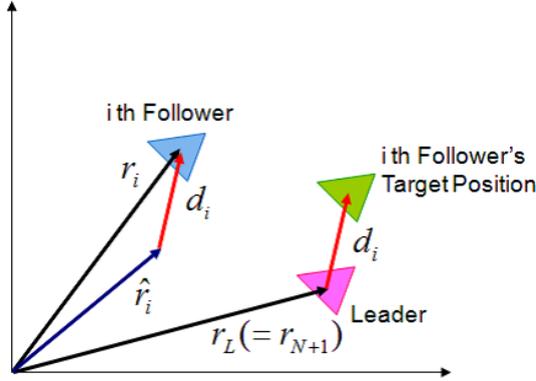


Fig. 2: Definition of symbols

3 提案手法

著者らのグループによる物体の協調取囲みのアルゴリズム¹⁰⁾をそのまま適用すると, Fig.3 に示すように, Leader 機に追従し, 一定のフォーメーションは達成するものの, Leader 機が進行方向を変えたとしても, Follower 機群の配置は地上から観測すると固定されてしまう. これは, 協調取囲みのアルゴリズムでは, 指向性のない円形状物体を協調して取囲むことを目的としており, ビークルの指向性を考慮に入れていなかったためである.

そこで, (5) 式の制御目的を達成するために, 協調取囲みのアルゴリズムをベースに, Follower 機が位置すべき目標情報とその変化率を Follower 機群とは動きが独立した Leader 機が付与するという手法を提案する.

i 番機 (Follower 機) に適用する制御則は (6) 式のとおりとする.

$$u_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}} \left[\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \{-k(\hat{r}_i - \hat{r}_j) + \dot{r}_j + (\dot{d}_i - \dot{d}_j)\} \right] \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (j \text{ 番機が } i \text{ 番機と連結の場合}) \\ 0, & (\text{その他の場合}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{r}_i = r_i - d_i \quad (i = 1, \dots, N+1) \quad (8)$$

ここで, $k \in \mathbb{R}$ は正の定数ゲインであり, また, $N+1$ 番目のビークルを Leader 機として, 右下添字の $N+1$ は Leader 機であることを示す. 他方, a_{ij} は i 番機が j 番機の情報取得しているか否かを表わす変数で, 情報取得している場合は 1, そうではない場合は 0 であ

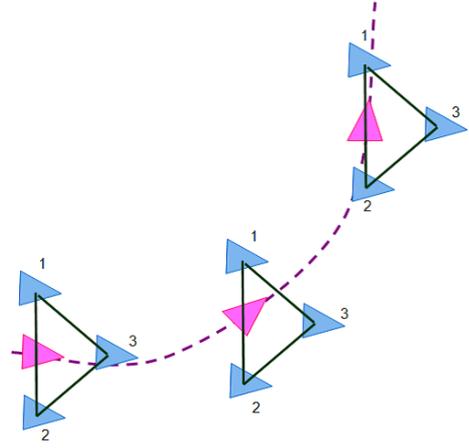


Fig. 3: A movement in case of applying the algorithm shown in the 10th literature

る. さらに, \hat{r}_i は, (8) 式, Fig.2 に示すように, i 番機 (Follower 機) の位置から, その機に対する Leader 機からみた目標位置を引いたベクトルであり, すべての Follower 機について, ベクトル \hat{r}_i が Leader 機の位置 r_{N+1} に等しくなる時, 制御目的が達成される.

さて, この Leader 機及び Follower 機群から構成されるマルチビークルシステム及び制御則 (6) 式について, 次の定理が成り立つ.

定理 1

$N(\geq 1)$ 機の (1) 式で表現される Follower 機群, 及び 1 機の Leader 機から構成されるマルチビークルシステムについて, 仮定 1, 2 は常に満たされるものとする. この時, 各 Follower 機に対して制御則 (6) 式を適用すると, 制御目的 (5) 式は漸近的に達成される.

[証明] i 番機 (Follower 機) に制御則 (6) 式を代入する.

$$\dot{r}_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}} \left[\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \{-k(\hat{r}_i - \hat{r}_j) + \dot{r}_j + (\dot{d}_i - \dot{d}_j)\} \right] \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

ここで, d_i の定義より, $d_{N+1} = 0$ となることに注意して, (9) 式を変形すると次のようになる.

$$\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \{\dot{r}_i - \dot{r}_j\} = -k \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \{\hat{r}_i - \hat{r}_j\} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

(10) 式から, $k > 0$ であれば, 明らかに漸近的に次

が成立する.

$$\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \{\hat{r}_i - \hat{r}_j\} = 0 \quad (11)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

ここで, r_i の次元は 2次元であることを考慮すると, (11) 式は次のように表わすことができる.

$$(\mathcal{L} \otimes I_2) \hat{r} = 0 \quad (12)$$

なお, $\mathcal{L} \in \mathbb{R}^{(N+1) \times (N+1)}$ は (13) 式で表わされるリーダー機を含むマルチビークルシステムのネットワーク構造のグラフラプラシアン, \otimes はクロネッカ積, I_2 は 2 次の単位行列, $\hat{r} \in \mathbb{R}^{2(N+1)}$ は $\hat{r} = [\hat{r}_1^T \hat{r}_2^T \dots \hat{r}_N^T \hat{r}_{N+1}^T]^T$ である.

$$\mathcal{L} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

次に, (12) 式を満たす解について検討する. 仮定 2 よりグラフが連結であることから, グラフラプラシアンの性質より, 唯一のゼロ固有値を持ち, 対応する固有ベクトルは $\mathbf{1}$ となることを用いると, 次式を得る. なお, 仮定 2 を満たす場合, 他の固有値の実部はすべて正である.

$$(\mathcal{L} \otimes I_2) \mathbf{1} = 0 \times \mathbf{1} \quad (14)$$

ここで, (12) 式と (14) 式を見比べると, (12) 式を満たす \hat{r} は次式を満たさなければいけない.

$$\hat{r} = \mathbf{1} \quad (15)$$

これは, \hat{r} の各成分がすべて等しくなることを意味する.

$$\hat{r}_1 = \hat{r}_2 = \dots = \hat{r}_N = \hat{r}_{N+1} (= r_L) \quad (16)$$

したがって, (5) 式の制御目的が漸近的に達成される.

$$\begin{cases} r_1 = r_L + d_1 \\ r_2 = r_L + d_2 \\ \vdots \\ r_N = r_L + d_N \end{cases} \quad (17)$$

以上より, マルチビークルシステムのネットワーク構造を表現するグラフが連結であれば, そのネットワーク構造に依らず, 制御目的を達成することが分かる. \square

4 数値シミュレーションによる検証

4.1 シミュレーション設定

本稿では, (1) 式で表わされる 3 機の Follower 機と 1 機の Leader 機で構成されるマルチビークルシステムに対して (6) 式の制御則を適用したモデルを対象とし

Table 1: Conditions of numerical simulations

	C1	C2	C3	C4
Controller Gain(k)	5	5	2	20
Network	NET1		NET2	
Leader's Path	LEAD1			
Configuration	FOM1		FOM2	

て, Table 1 の 3 種類の条件でシミュレーション検証を行った. 以下, シミュレーションの各条件について説明する.

ネットワーク構造

ネットワーク構造は次の 2 種類とする. NET1 では, すべての Follower 機が Leader 機の情報に直接得ることができる. 他方, NET2 では, すべての Follower 機は Leader 機と連結であるが, Follower 機 (1) のみが Leader 機の情報に直接得ることができ, 他の Follower 機は, Leader 機の情報に直接得ることができず, 他の Follower 機を介して Leader 機の情報を得るという設定である.

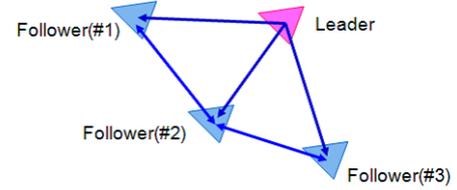


Fig. 4: A network structure [NET1]

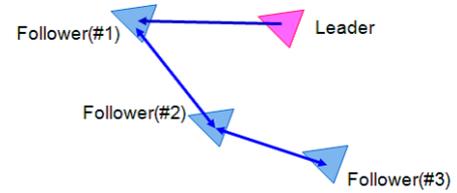


Fig. 5: A network structure [NET2]

Leader 機の移動軌跡

Leader 機の移動軌跡は次のとおりとする.

LEAD1

周期 20(s), 長径 10(m), 短径 8(m) の楕円軌道を描く. なお, Leader 機の初期位置は (0, 0) とする.

フォーメーション形状

マルチビークルシステムが形成するフォーメーション形状は次の 2 種類とする.

FOM1

各 Follower 機は, Leader 機と一定の距離を保ち, また, Leader 機の進行方向ベクトル (単位速度ベクトル: $r_{N+1}/|r_{N+1}|$) に対して常に一定の方位を保つこととする. これを i 番機 (Follower 機) の Leader 機に対する目標位置 d_i として表現すると, (18) 式ようになる.

ここで, Fig.6 に示すように, $|d_i|$, θ_i はそれぞれ, i 番機 (Follower 機) の Leader 機との目標相対距離, Leader 機の世界速度ベクトル方向を起点とした目標方位角 (反時計

周りを正)である。

$$\begin{cases} d_i = \frac{|d_i|}{|\dot{r}_{N+1}|} R(\theta_i) \dot{r}_{N+1} & (|\dot{r}_{N+1}| \geq 0.1) \\ d_i = |d_i| R(\theta_i) & (|\dot{r}_{N+1}| < 0.1) \end{cases} \quad (18)$$

$$R(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \quad (19)$$

FOM2

フォーメーションの形状を時々刻々変化させることを考える。ここでは、各 Follower 機は、Leader 機の進行方向ベクトル (単位速度ベクトル: $r_{N+1}/|r_{N+1}|$) に対して常に一定の方位を保つが、Leader 機との相対距離を周期的に変化させることとする。これを i 番機 (Follower 機) の Leader 機に対する目標位置 d_i として表現すると、(20) 式ようになる。なお、 $R(\theta_i)$ の定義は (19) 式、 $\omega_{FOM} = 2\pi/3[\text{rad/s}]$ とした。

$$\begin{cases} d_i = \frac{(|d_i| + \sin \omega_{FOM} t)}{|\dot{r}_{N+1}|} R(\theta_i) \dot{r}_{N+1} & (|\dot{r}_{N+1}| \geq 0.1) \\ d_i = |d_i| R(\theta_i) & (|\dot{r}_{N+1}| < 0.1) \end{cases} \quad (20)$$

$|d_i|$, θ_i については、Table 1 のいずれの条件においても次のとおりの設定とした。

Table 2: Parameters of a target position

Follower	# 1	# 2	# 3
Relative Distance($ d_i $)	2	2	2
Azimuth(θ_i)	0°	90°	270°

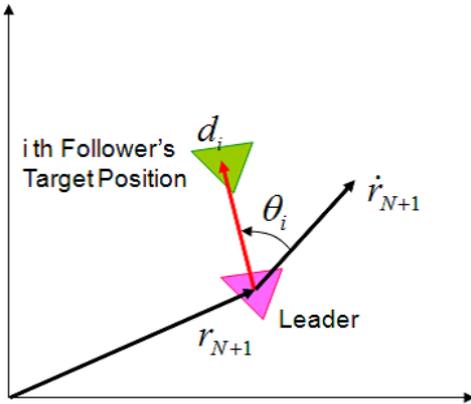


Fig. 6: Definition of a target position

4.2 シミュレーション結果

Table 1 の 4 条件で行った 16[s] 間のシミュレーション結果を以下の各図に示す。

C1 の条件での結果は Fig.7, Fig.11, C2 の条件での結果は Fig.8, Fig.12, C3 の条件での結果は Fig.9, Fig.13, C4 の条件での結果は Fig.10 である。

Fig.7~10 は、各 Follower 機、Leader 機の移動軌跡を示しており、これらの機の位置を 2[s] 間隔で描いたものを併せて図中に示している。他方、各 Follower 機の目標位置からの誤差 (x 軸, y 軸) を Fig.11~13 に示す。

まず、C1, C2 の結果の比較から、すべての Follower 機が Leader 機から直接情報を得ていなくともフォーメーションを達成でき、また、フォーメーション達成までの速さはこのネットワーク構造の違いに依存していないことがわかる。次に、C2, C3 の結果の比較から、フォーメーション達成までの速さは制御定数 k に依存していることが分かる。他方、C4 の結果から、Follower 機の配置形状を時々刻々変化させつつフォーメーションを達成できていることが分かる。

以上から、いずれの条件においても制御目標を達成できており、提案制御則の有効性を確認できた。

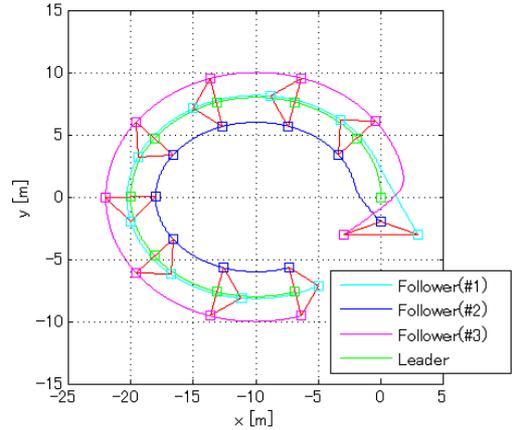


Fig. 7: The simulation result [C1]

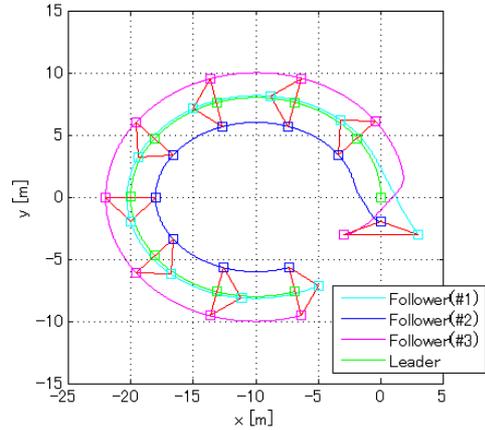


Fig. 8: The simulation result [C2]

5 おわりに

本稿では、指向性を有するビークルのフォーメーションを念頭に、フォーメーションを形成している最中にビークルの配置を変化させることができる制御則を提案した。この制御則は、文献¹⁰⁾の制御アルゴリズムをベースに、リーダー・フォロワー構造を利用したものであり、数値シミュレーションによりその有効性を確認した。

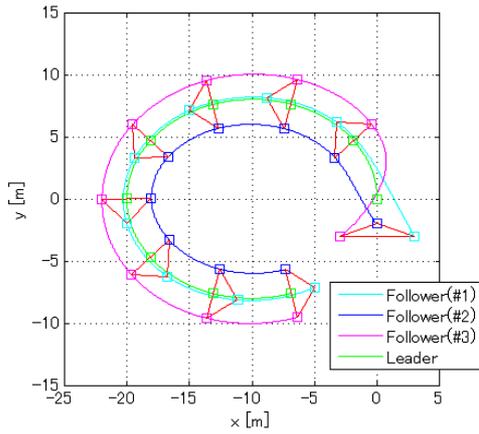


Fig. 9: The simulation result [C3]

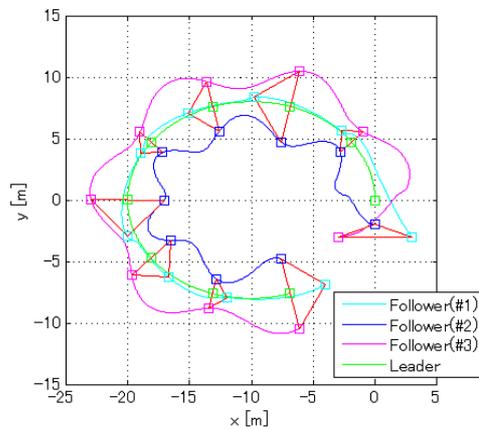


Fig. 10: The simulation result [C4]

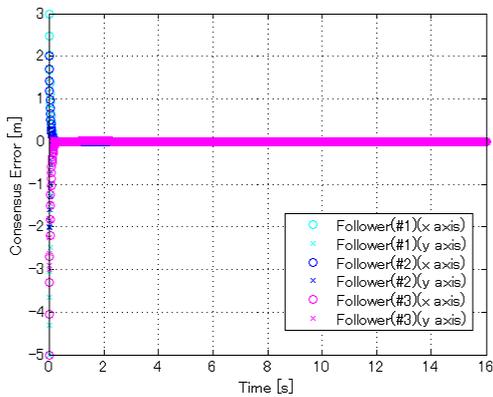


Fig. 11: The simulation result [C1]

今回は、ビークルモデルとして1次系の単純なモデルを対象としたが、今後は、ビークルのダイナミクスを考慮して、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。

参考文献

1) R. Murray, "Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.129, pp.571-583, 2007.

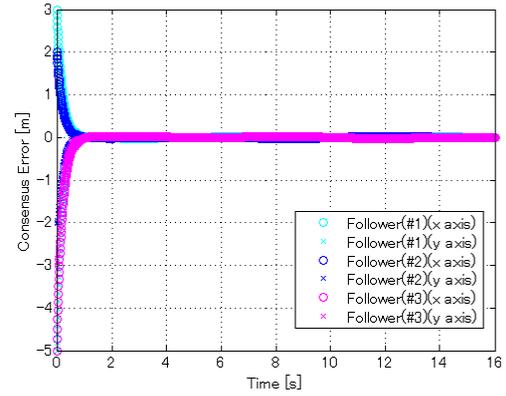


Fig. 12: The simulation result [C2]

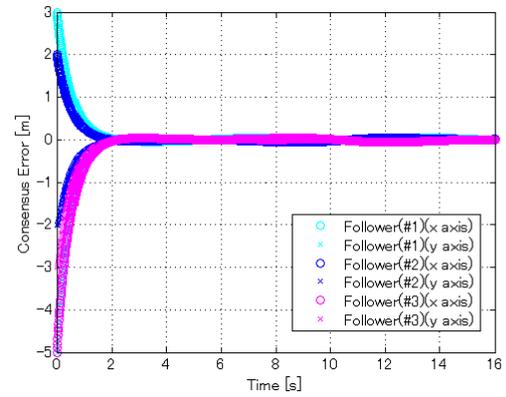


Fig. 13: The simulation result [C3]

2) 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.

3) J. Fax and R. Murray, "Information Flow and Cooperative Control of vehicle Formations," *IEEE T. Automatic Control*, Vol.49, No.9, pp.1465-1476, 2004.

4) 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.

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

6) 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.

7) 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.

8) C. Godsil and G. Royle, *Algebraic Graph Theory*, Springer, 2001.

9) 吉岡愛, 滑川徹, "マルチエージェントシステムの合意問題とそのフォーメーション制御への応用," 計測自動制御学会論文集, Vol. 44, No. 8, pp. 663-669, 2008.

10) 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.

11) 石村 晃士, 滑川 徹, "ネットワーク構造に依存しないマルチビークルシステムによる物体協調把持" 第54回自動制御連合講演会, pp.96-101, 2011.