

通信遅延を考慮したマルチビークルシステムの Flocking 制御

○吉岡 愛 滑川 徹 (金沢大学)

Flocking Control of Multi-Vehicle Systems with Communication Delays

*C. Yoshioka and T. Namerikwa (Kanazawa University)

Abstract— This paper deals with the flocking control problem in networked multi-vehicle systems. This is one of formation control problem and the dynamics are represented as second-order systems. Communication networks generally cause time delays and multi-vehicle systems might be destabilized by communication delays. Hence, we propose control laws considering communication delay which stabilize the system. Then, multi-vehicle systems with estimators are proposed to reduce communication traffic. Finally, experimental results of multi-vehicle formation control are shown and the effectiveness of the proposed approach is evaluated.

Key Words: Multi-Vehicle System, Formation Problem, Flocking Problem, Communication Delay

1 はじめに

複数の制御対象が協調して作業を行うマルチエージェントシステム (以下: MAS) に関する研究が, グラフ理論とシステム制御理論の融合により発展している. 各エージェントが自律的に望ましい動作を行い, 他エージェントと協調行動を行う MAS は, 高度なミッションを要求される衛星システムや安全運転支援システムへの応用が可能であり, よって, エージェントを車両とするマルチビークルシステム (以下: MVS) による編隊問題を考えることは実用的にも有用である.

編隊形成では, 車両の位置を制御することは重要な問題である. 文献¹⁾では, エージェントの状態を一致させる合意制御²⁾を位置合意問題として, 編隊制御に適用している. また, 文献³⁾では, より良い制御応答を得るために位置合意だけではなく速度合意も行う MVS の Flocking 制御則を提案し, Flocking 制御の有効性は, 位置合意問題との比較実験により示されている¹⁾.

実際の車両に MVS の適用を考えた場合, 車両同士の通信に対して通信遅延, 情報量の制約などの問題が考えられる. しかし, 文献³⁾では, これらの通信問題は考慮されていない. そこで, 本稿では, Flocking 制御³⁾に通信遅延を考慮し, 更に情報量の削減問題について考える.

車両間の通信に遅延が生じた場合, MVS を不安定化させる恐れがあり, 通信遅延を考慮することは重要である. MAS の通信遅れの問題は, 文献^{2), 4)}で議論されている. 文献⁴⁾は, 一定の通信遅延に対する安定化条件を提案している. また, 送受信量に制約がある場合, 通信量を減らす必要がある. 通信量は, 出力情報を削減するには状態推定が必要であり, MVS システムの状態推定問題として文献⁵⁾では, 各車両と通信している他の車両の状態を推定した並行推定器を用いたものが提案されている.

よって本稿では, 文献³⁾の Flocking 問題の拡張として通信遅延を有する場合の MVS の安定化と情報削減のための推定問題について考える. 通信遅延の扱いについては, 文献⁴⁾を参考とし, 状態推定には, 文献⁵⁾よりも単純な方法を提案する. これによって通信遅延を考慮した MVS の Flocking を達成する. 更に, 提案した MVS 制御手法を実システムに応用し制御実験により有効性を検証する.

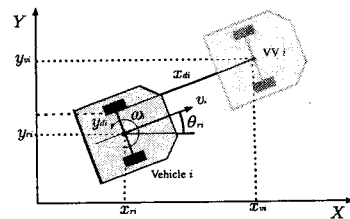


Fig. 1: i th Real Vehicle and corresponding Virtual Vehicle

2 問題設定

2.1 車両一台のモデルと Virtual Structure¹⁾

1台の車両は, Fig. 1 (左下) のような独立2輪車両として考える. N 台の車両が同じダイナミクスで表され, 摩擦等を考慮しないと仮定すると, i 台目の車両モデルは以下で表される.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{ri} \\ \dot{y}_{ri} \\ \dot{\theta}_{ri} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ri} & 0 \\ \sin \theta_{ri} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし, (x_{ri}, y_{ri}) は, i 番目の車両の重心位置. θ_{ri} は姿勢角, 制御入力は, 速度 v_i , 角速度 ω_i である.

次に, Fig. 1 (右上) のように各車両に Virtual Vehicle (以下 VV) を与え, i 番目の車両とそれに対応する VV を i 番目の Virtual Structure (以下 VS) として捉える. 車両と VV の位置関係を, Fig. 1 のように与えると, VV の状態は以下で表される.

$$\begin{bmatrix} x_{vi} \\ y_{vi} \\ \theta_{vi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ri} + x_{di} \cos \theta_{ri} - y_{di} \sin \theta_{ri} \\ y_{ri} + x_{di} \sin \theta_{ri} + y_{di} \cos \theta_{ri} \\ \theta_{ri} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし, (x_{ri}, y_{ri}) , θ_{ri} は VV の重心位置, 姿勢を表す. 式 (2) を時間微分し, まとめると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{vi} \\ \dot{y}_{vi} \\ \dot{\theta}_{vi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{vi} \\ B_{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B_{vi} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -x_{di} \sin \theta_i - y_{di} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & x_{di} \cos \theta_i - y_{di} \sin \theta_i \end{bmatrix}, \quad B_{\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

となる. $x_{di} \neq 0$ と選ぶことで, B_{vi} は正則となる. よって, $r_{vi} = (x_{vi}, y_{vi})$, 速度を $v_{vi} = \dot{r}_{vi}$ とし, 実際の車両に与える入力を

$$\begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = B_{vi}^{-1} v_{vi} \quad (4)$$

とすることで, VV の重心位置のダイナミクスは, フィードバック線形化される¹⁾. 本稿では, この VS システムに対して, 編隊問題を考える.

式(4)を式(3)に代入することにより, Virtual Vehicleの重心位置のダイナミクスは,

$$\dot{v}_{vi} = u_{vi} \quad \dot{r}_{vi} = v_{vi} \quad (5)$$

と考えることができる。ただし, u_{vi} は i 番目の VV の制御入力である。状態空間表現より, i 番目の VV は,

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_{vi} \\ \dot{v}_{vi} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \otimes I_2 \right) \begin{bmatrix} r_{vi} \\ v_{vi} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes I_2 \right) u_{vi} \quad (6)$$

となる。ただし, \otimes はクロネッカ積, I_p は p 次の単位行列を表す。

2.2 Virtual Vehicle 一台の制御則

まず, 各 VV が一定目標速度 v^* で走行するために, 各 1 台での制御目的を $v_{vi} \rightarrow v^*$ と考える。目標速度で走行するための制御則は,

$$u_{vi} = -k_v(v_{vi} - v^*) + v_{vi} \quad (7)$$

となる。ただし, $k_v > 0$ は設計パラメータであり, u_{vi} は新たな制御入力である。ダイナミクス(6)に制御入力(7)を代入し, 速度偏差 $v_{ei} = v_{vi} - v^*$ として表すと

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_{vi} \\ \dot{v}_{ei} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -k_v \end{bmatrix} \otimes I_2}_A \begin{bmatrix} r_{vi} \\ v_{ei} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes I_2}_B u_{vi} \quad (8)$$

となる。各 VV に目標速度を与えるのは, 初期速度が 0 の場合, 実際の車両が編隊を達成しないためである。

3 MVS の編隊問題

編隊問題を考える。VV を用いて, 編隊を達成する場合, 位置と姿勢が重要となる。以下に示す制御目的を与える。

$$v_{vi} \rightarrow v_{vj} \rightarrow v^*, \quad r_{ri} - r_{rj} \rightarrow r_{ri} - r_{rj}, \quad t \rightarrow \infty \quad (9)$$

r_{ri} は目標とする編隊の重心からの座標を示す。文献¹⁾より, VV の設定値 x_{di}, y_{di} によって編隊を形成する場合, $r_{ri} = 0$ となる。Fig. 2 は, $r_{ri} = 0$ の場合, Fig. 3 は, $r_{ri} \neq 0$ の場合の制御目的の達成を表している。ここで, $\hat{r}_{vi} = r_{vi} - r_{ri}$ とし, 状態を $x_i = [\hat{r}_{vi}^T \ v_{ei}^T]^T$ として定義する。これより N 台の VV の MVS は,

$$\dot{x}(t) = (I_N \otimes A)x(t) + (I_N \otimes B)u(t) \quad (10)$$

となる。ただし, $x = [x_1^T \ x_2^T \ \dots \ x_N^T]^T, u = [u_1^T \ u_2^T \ \dots \ u_N^T]^T$ とする。ここで, i 番目の VV の制御入力 u_i と MVS の制御入力 u を

$$u_i(t) = -K \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (x_i - x_j) \quad (11)$$

$$u(t) = -(L \otimes K)x(t) \quad (12)$$

と与える。ただし, K はフィードバックゲインであり, L はグラフラプラシアンを表す。 j 番目の車両から i 番目の車両に情報が渡される場合を $a_{ij} = 1$ とすると, グラフラプラシアン $L = [l_{ij}]$ は, $l_{ii} = \sum_{j \neq i} a_{ij}, l_{ij} = -a_{ij}$ で表される行列である。また, $a_{ij} = 0$ を除いた j の集合を i の隣接集合 \mathcal{N}_i と呼ぶ。

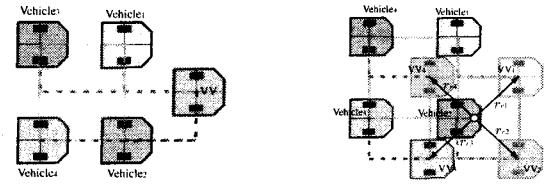


Fig. 2: Control target $r_{ri} = 0$ Fig. 3: Control target $r_{ri} \neq 0$

よって, MVS(10) は,

$$\dot{x}(t) = (I_N \otimes A)x(t) - (L \otimes BK)x(t) \quad (13)$$

と表される。

式(11)は i 番目の車両と任意の j 番目の車両との協調行動を意味し, この協調行動は, グラフによって表現できる。グラフには双方向通信のみを表現する無向グラフと単方向通信を表現する有向グラフがある。本稿ではこのグラフ構造に以下の仮定を置く。

仮定 1: グラフ構造は連結無向グラフとする。

グラフラプラシアンは, このグラフ構造を表す行列のひとつであり, MVS の安定性解析においてグラフラプラシアンは重要で, 特有の性質をもっている。そのひとつが準正定行列となることである。ここで, グラフラプラシアン L の固有値 $\lambda_k(L)$ ($k = 1, 2, \dots, N$) は,

$$0 = \lambda_1(L) \leq \lambda_2(L) \leq \dots \leq \lambda_N(L) \quad (14)$$

として表す。このとき MVS(13) では, 以下の定理が成り立つ。

定理 1: グラフ構造が仮定 1 を満たし, (A, B) は可安定と仮定する。このとき,

$$XA^T + AX - \lambda_k(Y^T B^T + BY) < 0 \quad \forall \lambda_k (\lambda_k \neq 0) \quad (15)$$

を満たす $X = X^T > 0, Y$ が存在した場合, $K = YX$ で, MVS(13) は, 漸近安定となり, 制御目的(9)を達成する。ただし, Λ_e は任意の直交行列 S を用いて, 相似変換 $S^{-1}LS = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_e \end{bmatrix}$ により得られる行列である。

証明: グラフラプラシアン L の右固有ベクトルからなる行列 $S = [\nu_1 \ \nu_2 \ \dots \ \nu_N]$ を考える。ただし, ν_k は $\lambda_k(L)$ の右固有ベクトルである。無向グラフであるから, $L^T = L$ となり, L を対角化する直交行列 S が存在する。これより,

$$\Lambda := S^{-1}LS = \text{diag}(\lambda_1(L), \lambda_2(L), \dots, \lambda_N(L)) \quad (16)$$

を得る。また, 仮定 1 より, L は, 零固有値を唯一もつので, $\lambda_1(L) = 0$ となる。 $z = S^{-1}x$ として座標変換を行うと

$$\begin{aligned} \dot{z} &= (S^{-1}IS \otimes A)z - (S^{-1}LS \otimes BK)z \\ &= (I_N \otimes A)z - (\Lambda \otimes BK)z \end{aligned} \quad (17)$$

を得る。また, 式(17)は,

$$\dot{z}_1 = Az_1 \quad (18)$$

$$\dot{z}_e = (I_{N-1} \otimes A)z_e - (\Lambda_e \otimes BK)z_e \quad (19)$$

と表すことができる。ただし、 $z_e = [z_2^T z_3^T \cdots z_N^T]^T$ 。また、 (A, B) が可安定の場合、 $(A, \lambda_k B)$ ($k = 2, 3, \dots, N$) も可安定であるので、式 (19) が安定となるコントローラゲイン K が存在する。

ここで、式 (18) について着目すると、ベクトル z_1 の第一要素は、位置を変換した z_{p1} であり、第二要素は速度を変換したものであるので、 $z_1 = [z_{p1}^T \dot{z}_{p1}^T]^T$ とできる。これより、

$$\dot{z}_1 = \begin{bmatrix} \dot{z}_{p1} \\ \dot{z}_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{z}_{p1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \ddot{z}_{p1} = 0 \Rightarrow \dot{z}_{p1} = z_{p1}(0) \quad (20)$$

を得る。次に式 (19) について考える。 $z_e \rightarrow 0$ の場合、 x は

$$x(t) = Sz(t) \rightarrow (\nu_1 \otimes I)z_1 \quad (t \rightarrow \infty) \quad (21)$$

に収束する。 ν_1 はグラフラプラシアン L の零固有値に対応するベクトルで、 $\nu_1 = \mathbf{1}$ であるので、各状態は、同じ値に収束する。ここで、汎関数 V_1 を考える。

$$V_1(z_e) = z_e^T (I_{N-1} \otimes P) z_e \quad (22)$$

$P = P^T > 0$ とすると、 $V_1 > 0$ となる。 V_1 を解軌道に沿って時間微分し、 $X = P^{-1}$ 、 $Y = KP^{-1}$ と置くことにより、

$$\dot{V}_1 = z_e^T (I_{N-1} \otimes (XA^T + AX) - (\Lambda_e^T \otimes Y^T B^T + \Lambda_e \otimes BY)) z_e < 0 \quad (23)$$

これより、式 (23) を満たした場合、 $z_e \rightarrow 0$ となるので、制御目的 (9) を達成する。また、 Λ_e は対角要素にグラフラプラシアン L の固有値をもつ対角行列であることから、式 (15) となることは明らか。□

4 通信遅延を有する場合の MVS

通信遅延を有する場合の MVS を考える。車両間に時変の通信遅延 $\tau(t)$ がある場合の制御入力は、

$$u_i(t) = -K \sum_{j \in N_i}^N (x_i(t - \tau(t)) - x_j(t - \tau(t)))$$

$$u(t) = -(L \otimes K)x(t - \tau(t)) \quad (24)$$

として考えることができる。制御入力 (24) をシステム (6) に代入すると、

$$\dot{x}(t) = (I \otimes A)x(t) - (L \otimes BK)x(t - \tau(t)) \quad (25)$$

と表現される。前節と同様に $z = S^{-1}x$ となるベクトルに変換すると

$$\dot{z}_1(t) = Az_1 \quad (26)$$

$$\dot{z}_e(t) = (I_{N-1} \otimes A)z_e - (\Lambda_e \otimes BK)z_e(t - \tau) \quad (27)$$

を得る。また式 (27) は次のように表すことができる。

$$\dot{z}_e(t) = ((I_{N-1} \otimes A) - (\Lambda_e \otimes BK))z_e$$

$$+ (\Lambda_e \otimes BK) \int_{t-\tau(t)}^t (I_{N-1} \otimes A)z_e(\theta) - (\Lambda_e \otimes BK)z_e(t - \tau(\theta))d\theta \quad (28)$$

ここで、MVS (25) に対して以下の定理が成り立つ。

定理 2: グラフ構造が仮定 1 を満たし、通信遅延が $\tau(t) \in [0, \bar{\tau}]$ で、通信遅延の変化率 $\dot{\tau}(t)$ が $\dot{\tau}(t) \leq \tau^* \leq 1$ の条件を満たすとす。

このとき、MVS (25) が安定であるための十分条件は、MVS (6) が安定でかつ、次の LMI 条件

$$\begin{bmatrix} \Phi & \bar{\tau}(1 - \tau^*)\lambda_k(BK)^T P \\ \bar{\tau}(1 - \tau^*)\lambda_k PBK & -\frac{\bar{\tau}r_2}{r_1 + r_2(1 - \tau^*)}\bar{\tau}I \end{bmatrix} < 0$$

$$\Phi = A^T P + PA - \lambda_k \left((BK)^T P + PBK \right)$$

$$+ r_1 \tau A^T A + \lambda_k^2 r_2 \frac{2 - \tau^*}{1 - \tau^*} \bar{\tau} (BK)^T BK \quad (29)$$

を満たす $P = P^T > 0$ が存在することである。ただし、 r_1, r_2 は正定数である。

証明: 汎関数 V_2 を

$$V_2(z_e, t) = z_e^T(t) (I_{N-1} \otimes P) z_e(t)$$

$$+ r_1 \int_{t-\tau(t)}^t \int_{\theta}^t \|(I_{N-1} \otimes A)z_e(s)\|^2 ds d\theta$$

$$+ \frac{r_2}{(1 - \tau^*)} \int_{t-\tau(t)}^t \int_{\theta}^t \|(\Lambda_e \otimes BK)z_e(s)\|^2 ds d\theta$$

$$+ r_2 \int_{t-\tau(t)}^t \int_{t-\tau(\theta)}^t \|(\Lambda_e \otimes BK)z_e(s)\|^2 ds d\theta \quad (30)$$

と定義する。 $z_{e\tau}(\theta) = z_e(t + \theta)$ 、 $\theta \in [-\tau, 0]$ 、 $P > 0$ であり、 $r_1, r_2 > 0$ と考えると、 $V_2 > 0$ となる。 V_2 を解軌道に沿って時間微分すると、

$$\dot{V}_2(z_e, t) = z_e^T (I_{N-1} \otimes (A^T P + PA)) z_e$$

$$- z_e^T (\Lambda_e^T \otimes ((BK)^T P)) z_e + z_e^T (\Lambda_e \otimes PBK) z_e$$

$$+ 2z_e^T (I_{N-1} \otimes P) (\Lambda_e \otimes BK)$$

$$\times \int_{t-\tau(t)}^t (I_{N-1} \otimes A)z_e(\theta) - (\Lambda_e \otimes BK)z_e(t - \tau(\theta))d\theta$$

$$+ r_1 \tau(t) \|(I_{N-1} \otimes A)z_e(t)\|^2$$

$$+ r_2 \frac{2 - \tau^*}{1 - \tau^*} \tau(t) \|(\Lambda_e \otimes BK)z_e(t)\|^2$$

$$- r_2 (1 - \dot{\tau}(t)) \int_{t-\tau(t)}^t (1 - \dot{\tau}(\theta)) \|(\Lambda_e \otimes BK)z_e(t - \tau(\theta))\|^2 d\theta \quad (31)$$

を得る。また、任意の実ベクトル X, Y とスカラー $r > 0$ は、 $X^T Y + Y^T X \leq \frac{1}{r} X^T X + r Y^T Y$ を満たすことから、

$$\dot{V}_2 \leq z_e^T \left((I_{N-1} \otimes (A^T P + PA)) - \Lambda_e^T \otimes (BK)^T P - \Lambda_e \otimes PBK \right.$$

$$+ \tau(t) \frac{r_1 + r_2(1 - \tau^*)}{r_1 r_2(1 - \tau^*)^2} (\Lambda_e^T \Lambda_e \otimes PBK(BK)^T P)$$

$$\left. + r_1 \tau(t) \|I_{N-1} \otimes A\|^2 + r_2 \frac{2 - \tau^*}{1 - \tau^*} \tau(t) \|(\Lambda_e \otimes BK)\|^2 \right) z_e < 0 \quad (32)$$

となり、 $\tau(t) \leq \bar{\tau}$ より、

$$I_{N-1} \otimes (A^T P + PA) - \Lambda_e^T \otimes (BK)^T P - \Lambda_e \otimes PBK$$

$$+ \bar{\tau} \frac{r_1 + r_2(1 - \tau^*)}{r_1 r_2(1 - \tau^*)^2} (\Lambda_e^T \Lambda_e \otimes PBK(BK)^T P)$$

$$+ r_1 \bar{\tau} \|I_{N-1} \otimes A\|^2 + r_2 \frac{2 - \tau^*}{1 - \tau^*} \bar{\tau} \|(\Lambda_e \otimes BK)\|^2 < 0 \quad (33)$$

がいえる。これより、上式を満たすような $r_1, r_2 > 0$ 、 $P = P^T > 0$ が存在した場合 $z_e \rightarrow 0$ となる。また Λ_e は無向連結グラフの場合、グラフラプラシアン L の固有値を対角要素にもつ対角行列であることから、式 (33) に Schur Complement を適用することで、式 (29) が得られる。□

5 オブザーバベース MVS

推定器を用いた MVS は文献⁵⁾で提案されている。各車両の推定器で情報交換するすべての車両の状態を推定するので情報交換する車両の数が増えるほどコントローラの次数が増えるという問題がある。そこで、各車両のダイナミクスが同じであると仮定すると各車両で、状態 x を推定するよりも $(L \otimes I_n)x$ を推定した場合のほうが、各車両のコントローラの次数が車両の数に依存しないので有効であるといえる。よって本稿では $(L \otimes I_n)x$ を推定する問題を Flocking 問題に適用する。

推定器を用いての Flocking 問題を考える場合、2 次システムにおいて必要なのは位置と速度情報であるが、通信量削減のため速度情報を情報交換しない場合を考える。つまり、各車両の出力は重心位置のみとする。このときの i 番目の車両の出力 y_i と被制御量 Z_i を

$$y_i = Cx_i, \quad Z_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (y_i - y_j) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} C(x_i - x_j) \quad (34)$$

とすると MVS は、

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (I_N \otimes A)x + (I_N \otimes B)u \\ Z &= (L \otimes I_m)y = (L \otimes C)x \end{aligned} \quad (35)$$

として表すことができる。ただし、 $y = [y_1^T \ y_2^T \ \dots \ y_N^T]^T$, $Z = [Z_1^T \ Z_2^T \ \dots \ Z_N^T]^T$. ここで、 $x_F = (L \otimes I_n)x$, $u_F = (L \otimes I_m)u$ として考えると

$$\begin{aligned} \dot{x}_F &= (I_N \otimes A)x_F + (I_N \otimes B)u_F \\ Z &= (I_N \otimes C)x_F \end{aligned} \quad (36)$$

となる。ただし、 n は x の状態数、 m は入力数を表す。ダイナミクス (36) に対し、 $x_F \rightarrow 0$, ($t \rightarrow \infty$) を達成する制御器を設計する。この制御目的は、制御目的 (9) と等価である。この制御目的を達成するために x_F の状態はすべて得ることができないので、オブザーバにより状態推定を行う。全体のオブザーバベースコントローラは、

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_F &= (I_N \otimes (A - HC))\hat{x}_F + (I_N \otimes HC)x_F + (I_N \otimes B)u_F \\ u_F &= -(I_N \otimes K)\hat{x}_F \end{aligned} \quad (37)$$

となる。これより、全体の制御系の状態を $[x_F^T \ e^T]^T$ として表すと、

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_F \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \left(I_N \otimes \begin{bmatrix} A - BK & -BK \\ 0 & A - HC \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_F \\ e \end{bmatrix} \quad (38)$$

となる。ただし、偏差 $e = \hat{x}_F - x_F$. これより、 $A - HC$ が安定ならば、 $\hat{x}_F \rightarrow x_F$ ($t \rightarrow \infty$) であることがいえる。よって、速度を含めた被制御量 $x_F = (L \otimes I_n)x$ が推定されたといえる。 i 番目の VV の制御入力を

$$u_i = -K\hat{x}_{F_i} \quad (39)$$

とし、定理 1 を満たすとき、編隊を達成できることは明らかである。また、このオブザーバは $(L \otimes I_n)x$ を推定する問題としているが、 $(L \otimes I_n)x(t - \tau)$ を推定することにより、通信遅延がある場合のシステムに対しても適用可能である。

6 実験検証

制御実験により、通信遅延を考慮したオブザーバベース MVS の有効性を検証する。実験には、4 台の車両を用いる。通信を行うグラフ構造は、完全グラフとし、車両間の距離が 0.4[m] の正方形の編隊を考える。また、通信遅延 τ は 0.5[s] とする。車両一台に対して等速直線

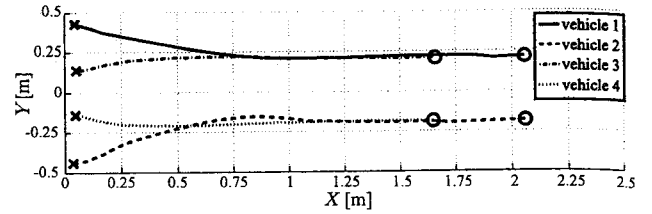


Fig. 4: Trajectories

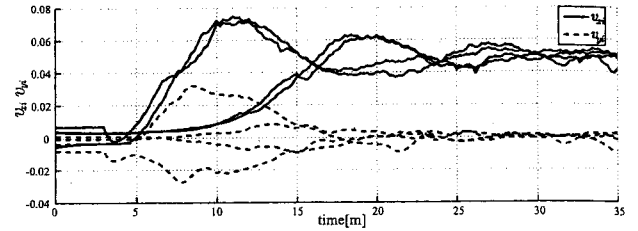


Fig. 5: VV's Velocities v_{vi}

運動を行うためのコントローラは、同じゲインを用い、フィードバックゲイン $k_v = 0.1$ とする。また、編隊のためのフィードバックゲインを $K = [0.005 \ 0.116]$, オブザーバゲインを $H = [3.46 \ 1.0]^T$ とする。また実際の車両の初期値を Fig. 4 の \times に示す。初期姿勢 θ_{ri} はすべての車両で 0 とし、初期速度もすべて 0, 目標速度は、 $v^* = [0 \ 0.05]^T$ とする。また、VV の設定値は、すべての車両で、 $x_{di} = 0.05$, $y_{di} = 0$ である。

Figs. 4-5 に実験結果を示す。Fig. 4 のトラジェクトリから編隊を達成していることがわかる。○が車両の最終重心位置である。Fig. 5 から目標速度 v^* を達成していることがわかる。また推定値 \hat{x}_F が、合意を達成し、推定誤差が $e \rightarrow 0$ となっていることを確認した。

7 おわりに

本稿では、通信遅延を有する場合と情報軽減のために位置情報のみを情報交換する Flocking 問題について考えた。通信遅延を有する場合でもシステムが安定となるための条件を導出し、また、情報量軽減のためにオブザーバベース MVS を提案した。また、通信遅延を考慮したオブザーバベース MVS の有効性を制御実験により示した。

参考文献

- 1) 吉岡, 滑川, “仮想構造を用いたマルチビークルシステムの編隊制御,” 第 7 回計測自動制御学会制御部門大会資料, 71-1-1, march, 2007.
- 2) Reza Olfati-Saber and Richard Murray, “Consensus Problems in Networks of Agents With Switching Topology and Time-Delays,” *IEEE Trans. AC*, Vol. 49, No. 9, pp. 1520-1532, 2004.
- 3) Wei Ren, “Consensus Based Formation Control Strategies for Multi-vehicle System,” in *Proc. ACC*, pp. 4237-4242, June. 2006.
- 4) Masateru Amano, Zhi-wei Luo, Shigeyuki Hosoe, “Graph-Dependent Sufficient Conditions for Synchronization of Network Coupled System with Time-delay,” 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No.9, pp. 925-933, 2004.
- 5) Roy S. Smith, Fred Y.Hadaegh “A Distributed Parallel Estimation Architecture for Cooperative Vehicle Formation Control,” in *Proc. ACC*, pp. 4219-4224, June. 2006.