

Consensus Filterを用いた対象物の協調取り囲み行動

川上 裕樹 滑川 徹 (金沢大学)

Consensus filter based cooperative target-enclosing strategy for multiple vehicle systems

H. Kawakami and T. Namerikawa (Kanazawa University)

Abstract— This paper deals with cooperative target-enclosing problems using consensus filter for multiple vehicle systems. Proposed strategies are based on consensus algorithms and at least one vehicle only has to acquire the states of target-object. In addition, the measurement signals are made to be agreed by using the consensus filters when each vehicle acquires the noisy signal of the target-object. To analyze the enclosing problem, algebraic graph theory and lyapunov theory are utilized. Numerical simulations and experiments are carried out to demonstrate the effectiveness of proposed method.

Key Words: Target-enclosing problem, Consensus filter, Multiple vehicle systems, Consensus algorithms

1 はじめに

近年、複数のエージェントを用いた協調制御に関する研究が盛んに行われている [1]-[4]。その中でも複数エージェントによって対象物を協調して取り囲む協調取り囲み問題に関する研究がある。対象物の取り囲みとは、移動もしくは停止している対象物を複数のエージェントによって包含することをいう。小林ら [1] は、全方向移動可能なエージェントを用いた隣接する2つのエージェントの情報が必要となる制御則を勾配法などにより提案している。一方、Kimら [3] は、Cyclic Pursuit の概念を応用した取り囲み制御則を提案している。ここでは、3次元空間における対象物の取り囲みを達成しており、制御則には隣接する1つのエージェント情報のみで良い。文献 [1][3] の制御手法ではネットワーク構造に対して制約があり、任意のネットワーク構造では取り囲みを達成することができず、対象物を原点とした極座標系を導入しているため、全てのエージェントが対象物情報を必要とする。

著者ら [4] は、合意アルゴリズムを基にした制御則を非ホロノミック拘束を有するビークルによる取り囲み問題に適用し、制御実験によりその有効性を示した。しかし、全てのビークルが対象物情報を取得する、もしくはリーダー・フォロアによる取り囲みしか取り囲みを達成していなかった。そこで、本稿では文献 [5] の合意アルゴリズムの概念を用いることによってネットワーク構造のクラスを広げる。そして、ネットワーク構造は広域木を有する場合、少なくとも一台のビークルが対象物情報を取得することができればよいことを示す。

一方、ビークルが対象物情報を取得する際、対象物の形状、センサ雑音等の影響により、性能が劣化する問題がある。文献 [6] では、複数のビークルがそれぞれ取得した雑音を含んだ信号を情報交換することによって平均値近傍に収束させる合意アルゴリズムを基にした consensus filter が提案されている。そこで本稿では、consensus filter を用いることにより雑音などの影響によって各ビークルによって対象物情報が異なる場合に信号を収束させ、その値を用いて取り囲みを行うことにより、取り囲み性能の劣化を抑えることを考える。提案制御手法は、数値シミュレーションと制御実験によりその有効性を検証する。

2 問題設定

2.1 ネットワーク構造

ビークル間のネットワーク構造を表現するためにグラフを導入する。グラフ $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ は、点集合 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}$ 、辺集合 $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ から構成される図形である。ビークルを点として考え、ビークル間の情報の流れを辺を用いて表す。グラフにおいて、点と点が辺によって結合している状態を隣接していると呼び、 i 番目の点に隣接している点の集合を近傍集合 \mathcal{N}_i として以下のように定義する。

$$\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} : \|r_j - r_i\| < \rho_j\} \quad (1)$$

ただし、 r_i はビークルの位置を表し、 $\|r_j - r_i\|$ はビークル間の距離を表す。上記の定義は、ビークル同士が ρ_j 以下の距離にいる場合、隣接しているという定義となる。また、対象物と i 番目のビークルとの距離が $\|r_{obj} - r_i\| < \rho_{obj}$ となる場合に i 番目のビークルは対象物情報を取得できるとする。ここで、グラフを数式で表現するために、以下の行列を定義する。隣接行列 $A(\mathcal{G}) = [a_{ij}]$ は隣接している辺の本数 (次数) を行列要素に持つ行列である。次数行列 $D(\mathcal{G}) = \text{diag}[d_1, \dots, d_n]$ は点の次数を要素に持ち、隣接行列の要素を用いると $d_i = \sum_{j \neq i} a_{ij}$ と表現できる。上記の行列を基に以下のラプラシアン行列を

$$\mathcal{L} \triangleq D - A \quad (2)$$

と定義する。グラフには、辺に方向のない無向グラフと、方向のある有向グラフがある。無向グラフにおいて任意の点から任意の点への経路が存在するとき、無向グラフは連結であると呼び、有向グラフにおいて任意の点から任意の点への経路が存在する場合、強連結であるという。グラフ内の全ての点において次数が k であるとき、 k -正則であるという。さらに、他の点から辺が存在しない点 (根, root などと呼ばれる) からそれ以外の全ての点に対して経路が存在するとき、このグラフは根付き広域木 (spanning tree) を有しているという。

2.2 ビークルのモデルと仮想構造

本稿では、以下に示すキネマティクスを有する n 台のビークル (Fig. 1(a)) を扱う。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

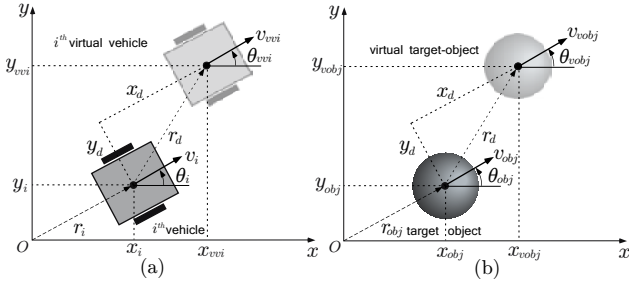


Fig. 1: (a) Real vehicle and virtual vehicle, (b) Real target-object and virtual target-object.

ここで、 $r_i = [x_i \ y_i]^T \in \mathbb{R}^2$ はビークルの重心位置、 $\theta_i \in \mathbb{R}$ は姿勢角、 $v_i \in \mathbb{R}$ は並進速度、 $\omega_i \in \mathbb{R}$ は角速度を表す。このビークルは、非ホノミック拘束を有することが知られている。このビークルに対して仮想構造(仮想ビークル)を次のように定義する (Fig. 1(b)).

$$\begin{bmatrix} x_{vvi} \\ y_{vvi} \\ \theta_{vvi} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} x_i + x_d \cos \theta_i - y_d \sin \theta_i \\ y_i + x_d \sin \theta_i + y_d \cos \theta_i \\ \theta_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $r_{vvi} = [x_{vvi} \ y_{vvi}]^T \in \mathbb{R}^2$ は仮想ビークルの位置、 $\theta_{vvi} \in \mathbb{R}$ は仮想ビークルの姿勢、 $r_d = [x_d \ y_d]^T \in \mathbb{R}^2$ は実際のビークルと仮想ビークルとの距離を表すベクトルである。式 (4) を一階時間微分し、まとめて表現すると

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{vvi} \\ \dot{y}_{vvi} \\ \dot{\theta}_{vvi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i \\ -B_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。ただし、

$$B_i \triangleq \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -x_d \sin \theta_i - y_d \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & x_d \cos \theta_i - y_d \sin \theta_i \end{bmatrix}$$

$$B_\theta \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$$

である。ここで、制御入力を

$$\begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = B_i^{-1} u_i \quad (6)$$

と与えることによってフィードバック線形化することができ、仮想ビークルを線形一次システムと扱うことができる。ただし、 $x_d \neq 0$ と設定する。同様に対象物に対しても仮想対象物を定義する。

$$\begin{bmatrix} x_{vobj} \\ y_{vobj} \\ \theta_{vobj} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} x_{obj} + x_d \cos \theta_{obj} - y_d \sin \theta_{obj} \\ y_{obj} + x_d \sin \theta_{obj} + y_d \cos \theta_{obj} \\ \theta_{obj} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $r_{obj} = [x_{obj} \ y_{obj}]^T \in \mathbb{R}^2$ 、 $r_{vobj} = [x_{vobj} \ y_{vobj}]^T \in \mathbb{R}^2$ はそれぞれ実対象物と仮想対象物の重心位置、 $\theta_{obj} \in \mathbb{R}$ は x 軸からの対象物の移動角度である。ここで対象物に対して以下の仮定をおく。

[仮定 1] 対象物の速度は $v_{obj} \neq 0$, $\forall t \geq 0$ とする。

2.3 観測モデル

次に、以下に示すような観測モデルを考える。各ビークルがそれぞれ対象物情報 $r_{obj} \in \mathbb{R}^2$ をセンサなどから取得するとき、その情報に雑音 $w_i(t) \in \mathbb{R}^2$ が付加している場合を想定する。このとき、観測モデルは、以下の式で表現される。

$$\tilde{r}_{obj}^i(t) \triangleq r_{obj}(t) + w_i(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$\tilde{r}_{obj}(t) \triangleq \mathbf{1} \otimes r_{obj}(t) + w(t) \quad (9)$$

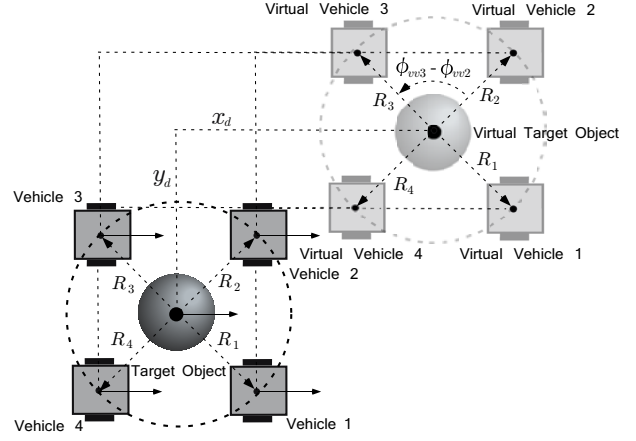


Fig. 2: Configuration of target-enclosing ($n = 4$)

ただし、 $\tilde{r}_{obj}^i \in \mathbb{R}^2$ は実際に i 番目のビークルが取得する対象物情報(雑音が付加された後)、 r_{obj} は雑音が付加される前の真の対象物情報、 $\mathbf{1} = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \in \mathbb{R}^n$ 、 $w = [w_1^T \ w_2^T \ \dots \ w_n^T]^T \in \mathbb{R}^{2n}$ 、 $\tilde{r}_{obj} = [\tilde{r}_{obj}^{1T} \ \tilde{r}_{obj}^{2T} \ \dots \ \tilde{r}_{obj}^{nT}]^T \in \mathbb{R}^{2n}$ 、 \otimes はクロネッカ積とする。

2.4 制御目的

本稿では、対象物の取り囲みを以下のように定義する。

[定義] (対象物の取り囲み) 対象物を中心とした円上に全てのビークルが存在し、隣り合うビークルとの相対距離が等しく、対象物の移動方向とビークルの姿勢が一致している状態。

上記の対象物の取り囲みは、 i 番目の仮想ビークルに対して考えると次のように表現することができる。

$$C1) \lim_{t \rightarrow \infty} \|r_{vvi}(t) - r_{vobj}(t)\| = \xi \text{ [m]},$$

$$C2) \lim_{t \rightarrow \infty} \|\phi_{i+1}(t) - \phi_i(t)\| = \frac{2\pi}{n} \text{ [rad]},$$

$$C3) \lim_{t \rightarrow \infty} \|\theta_{vvi}(t) - \theta_{vobj}(t)\| = 0 \text{ [rad]},$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n \ (i \neq j).$$

ここで、 $\xi \geq 0 \in \mathbb{R}$ は対象物を中心とした円の半径、 ϕ_i は対象物周りの i 番目のビークルの角度を表す。また、 $i = n$ のとき $i + 1 = 1$ とする。仮想ビークルにおいて上記の C1)-C3) を達成した場合、実際のビークルは Fig. 2 のような配置となるため、取り囲みが達成されることになる。

3 制御系設計

本節では、まず対象物の取り囲み問題について述べ、次に、consensus filter を用いた対象物の場合について述べる。さらに、対象物の移動速度が変化した場合に取り囲み位置を変化させることを考える。

3.1 対象物の協調取り囲み問題

ビークルと対象物の距離が大きい場合や雑音などにより通信が困難な場合、通信情報量の削減などの理由により、ビークルは対象物の情報(位置、速度など)を取得できるビークル(リーダー)と、取得できないビークル(フォロア)に分かれる。これらのビークルに対して以下の協調取り囲み制御則を提案する。

- Control law for i^{th} leader vehicle :

$$u_i \triangleq \frac{1}{1 + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} 1} \left[-k_i (\hat{r}_{vvi} - r_{vobj}) + \dot{r}_{vobj} + \dot{R}_i + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \left\{ -k_i (\hat{r}_{vvi} - \hat{r}_{vvj}) + \dot{r}_{vvj} + \dot{R}_{ij} \right\} \right] \quad (10)$$

- Control law for i^{th} follower vehicle :

$$u_i \triangleq \frac{1}{\sum_{j \in \mathcal{N}_i} 1} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \left\{ -k_i (\hat{r}_{vvi} - \hat{r}_{vvj}) + \dot{r}_{vvj} + \dot{R}_{ij} \right\} \quad (11)$$

ここで, \mathcal{N}_i はビークル間の近傍集合, $k_i > 0$ は定数ゲイン, $R_i \in \mathbb{R}^2$ は各ビークルの取り囲み位置, $R_{ij} \triangleq R_i - R_j$, $\hat{r}_{vvi} \triangleq r_{vvi} - R_i$ とする.

また, 取り囲み位置 R_i を以下のように定義する.

$$R_i \triangleq \xi \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{n}\right) & \sin\left(\frac{2\pi(i-1)}{n}\right) \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

ここで, $\xi \in \mathbb{R}$ は取り囲み半径とする. このとき, 以下の定理が成り立つ.

[定理 1] $N (\geq 1)$ 台の仮想ビークル (5)(6) から構成されるシステムと 1 台の対象物を考える. 各ビークルに対して制御則 (10)(11) を適用する. ただし, $w = 0$, 対象物を根としたネットワーク構造は広域木を有するとする. このとき, システムは制御目的 C1), C2) を漸近的に達成する.

証明: 仮想ビークル (5)(6) に対して制御則 (10)(11) を与えると閉ループ系は,

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_i \cup \text{obj}} (\hat{r}_{vvi} - \hat{r}_{vvj}) = -k_i \sum_{j \in \mathcal{N}_i \cup \text{obj}} (\hat{r}_{vvi} - \hat{r}_{vvj}) \quad (13)$$

と表現できる. ここで, $r_{vobj} \triangleq \hat{r}_{vv(j+1)}$ として表現する. 従って, $\hat{r}_{vvi} - \hat{r}_{vvj} \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$ となることから, $\hat{r}_{vvi} - r_{vobj} \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$ が漸的に達成される. □

[系 1] 対象物が直線運動する ($\dot{\theta}_{obj} = \dot{\theta}_{vobj} = 0$) とき, システムは制御目的 C3) を漸的に達成する.

証明: 仮想ビークル (5)(6) に対して制御則 (10)(11) を与えると以下を得る.

$$\dot{\theta}_{vvi} = -\frac{v_{vobj}}{x_d} \sin(\theta_{vvi} - \theta_{vobj}) \quad (14)$$

従って仮定 1 より $v_{vobj} \neq 0$ であるため, $\theta_{vvi} \rightarrow \theta_{vobj}$ as $t \rightarrow \infty$ が成り立つ. □

次に, 以下のフィルタ [6] を導入する. フィルタは合意アルゴリズムを基にした構造をしており, 各ビークルにそれぞれ存在し, ビークル間で対象物の状態とフィルタの状態をネットワークによって情報交換することによって各ビークルの取得情報を合意させる.

$$\dot{x}_i^c = k_c \sum_{j \in \mathcal{N}_i} (x_j^c - x_i^c) + k_c \sum_{j \in \mathcal{J}_i} (\tilde{r}_{obj}^j - x_i^c) \quad (15)$$

ただし, $x_i^c \in \mathbb{R}^2$ は i 番目のビークルが有するフィルタの状態, $k_c > 0 \in \mathbb{R}$ は定数ゲイン, $\mathcal{J}_i = \mathcal{N}_i \cup i$, $\tilde{r}_{obj}^i, x_i^c \in \mathbb{R}^2$ である. n 台でまとめて表現すると,

$$\dot{x}^c = -k_c (I_n + D + \mathcal{L}) \otimes I_2 x^c + k_c (I_n + A) \otimes I_2 \tilde{r}_{obj} \quad (16)$$

となる. ここで, D, A はそれぞれビークル間のネットワーク構造を表現した次数行列, 隣接行列を表す. こ

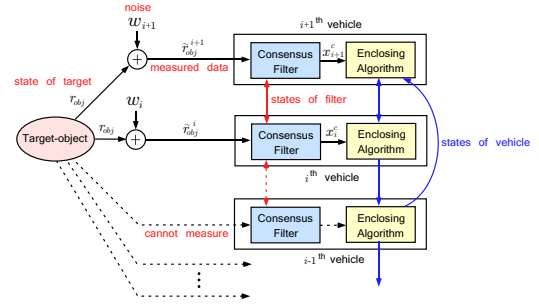


Fig. 3: Consensus Filter

のフィルタに対して以下の補題が成り立つことが知られている [6]. さらに, フィルタ (16) を伝達関数表現すると,

$$\mathcal{H}(s) = k_c [sI_{2n} + k_c (I_n + D + \mathcal{L}) \otimes I_2]^{-1} (I_n + A) \otimes I_2 \quad (17)$$

と表現できる. $\mathcal{H}(s)$ の極は Gersgorin 定理より,

$$1 + d_{\min} \leq \lambda((I_n + D + \mathcal{L}) \otimes I_2) \leq 1 + 3d_{\max} \quad (18)$$

となり, consensus filter (16) は安定なフィルタであることがわかる. ただし, λ は固有値, $d_{\min} \triangleq \min_i d_i$, $d_{\max} \triangleq \max_i d_i$ とする.

[補題 1] リーダ間のネットワーク構造が連結グラフのとき, consensus filter (16) の各状態は対象物の状態から半径 ϵ の円内に収束する.

略証: 以下のリヤプノフ関数 V を定義する.

$$V = \frac{1}{2} \gamma^T \gamma > 0 \quad (19)$$

ただし, $\gamma = x^c - \mathbf{1} \otimes r_{obj}$ とする. このとき, \dot{V} を計算することによってフィルタの状態は対象物の状態から $\epsilon = \frac{\nu \sqrt{n}}{k_c \lambda_{\min}(I_n + D + \mathcal{L})}$ の半径内に収束することを示すことができる. ここで, $|r_{obj}| \leq \nu$, λ_{\min} は最小固有値とする. □

ネットワークの密度もしくはゲイン k_c が十分大きく, 対象物の変化が十分小さい場合には, $\epsilon \approx 0$ となるため, フィルタの状態が全て等しくなることがわかる.

[補足] 上記の補題では対象物信号に雑音 w が印加されていないが, 文献 [6] では w が平均値零の白色雑音であり, リーダ間のネットワーク構造が正則である場合, w の影響を低減することができるが示されている. またフィルタ $\mathcal{H}(s)$ は LPF となっているため, 高周波雑音をより低減することが期待できる.

consensus filter の状態 $x_i^c \rightarrow r_{obj}$ として, 仮想対象物 (7) とした制御則 (10)(11) を用いて取り囲みを行うことを考える.

[定理 2] $N \geq 1$ 台の仮想ビークル (5)(6) から構成されるシステムと 1 台の対象物を考え, 各ビークルに対して制御則 (10)(11) を適用する. 対象物情報 r_{obj} には, フィルタ (16) の状態 x_i^c を用いて仮想対象物 (7) を定義する. ただし, 対象物を根としたネットワーク構造は広域木を有し, $k_i, k_c > 0$ を満たすとする. このとき, システムは制御目的 C1), C2) を漸的に達成する.

証明: 定理 2 の証明は, 定理 1 と同様の手法で行うことができる. □

また, 対象物が直線運動をするとき, 系 1 も成り立つ. そのため, 制御目的 C1)-C3) を達成することができる.

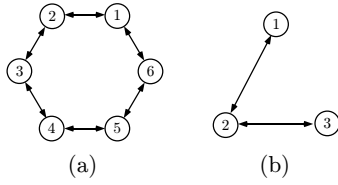


Fig. 4: Information exchange topologies

3.2 対象物の移動速度が変化する場合

実システムにおいて、必ずしも対象物周りにピークルを均等に配置することが最も望ましい形状ではなく、対象物の状態によって取り囲む位置を変化させることが考えられる。ここでは、対象物の移動速度が比較的遅い場合には、従来の取り囲み位置で、速度が速い場合には、対象物の移動方向に重点的に取り囲みを行うことを考える。そこで、取り囲み位置 R_i を以下のように設定する。

$$R_i \triangleq \chi \begin{bmatrix} \cos \left\{ \frac{2\pi(i-1)}{n} e^{-k_r \sum_{j \in \mathcal{N}_i} v_{vj}(t)} \right\} \\ \sin \left\{ \frac{2\pi(i-1)}{n} e^{-k_r \sum_{j \in \mathcal{N}_i} v_{vj}(t)} \right\} \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

$$\chi \triangleq \xi \begin{bmatrix} \cos \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \theta_{vj} & -\sin \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \theta_{vj} \\ \sin \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \theta_{vj} & \cos \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \theta_{vj} \end{bmatrix} \quad (21)$$

ここで、 $k_r > 0$ は定数ゲイン、 \mathcal{N}_i は i 番目のエージェントの近傍集合、 v_{vj} 、 θ_{vj} は j 番目のピークルの移動速度、移動方向である。上記の取り囲み位置 R_i は対象物、隣接するピークルの移動速度・方向に依存した形となっており、 $v_{obj} \approx 0$ の場合には、式 (12) に等しくなる。一方、 $v_{obj} \gg 0$ 場合には、対象物の移動方向に移動する特性を持っている。

4 数値シミュレーションによる検証

$N = 6$ として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。このとき ρ_j は十分大きいと考え、制御則に用いたネットワーク構造を Fig. 4(a) とし、 $\rho_{obj} = 2.5$ [m] とする。対象物は、 $v_{obj} = 0.06$ [m/s] の移動速度で原点から x 軸方向に移動させる。各ピークルには適当な初期状態を与え、設計パラメータは $r_d = [0.2 \ 0]^T$ [m]、 $k_i = 1.5$ 、 $k_c = 5$ 、 $\xi = 2$ [m]、各ピークルが取得する対象物信号には白色雑音 w を印加する。Fig. 7 にシミュレーション結果を示す。振動的な軌跡のあと、滑らかに取り囲みが達成されていることがわかる。次に、 R_i に式 (20) を用いた場合について検証する。設計パラメータは先ほどと等しくし、対象物の移動速度を $0 \rightarrow 0.06$ [m/s] まで変化させ、 $k_r = 10$ として行ったシミュレーション結果を Fig. 6 に示す。対象物の速度が変化するにつれ、ピークルの取り囲み位置が変化し、対象物の移動方向に集まっていることがわかる。

5 制御実験による検証

制御実験により提案制御則の有効性を検証する。ピークル (3 台)、対象物 (1 台) には同型の二輪車両を用い、ピークル同士の通信はコントローラ (dSPACE 製制御ボード DS1104) で仮想的に行う。ピークルの状態は上空に設置したカメラと画像処理によって取得し、システムのサンプリング時間は 0.2 [s] とする。 ρ_j は十分大きいと考え、制御則に用いたネットワーク構造は Fig. 4(b) とし $\rho_{obj} = 0.4$ [m] とする。対象物は、 $v_{obj} = 0.04$ [m/s]

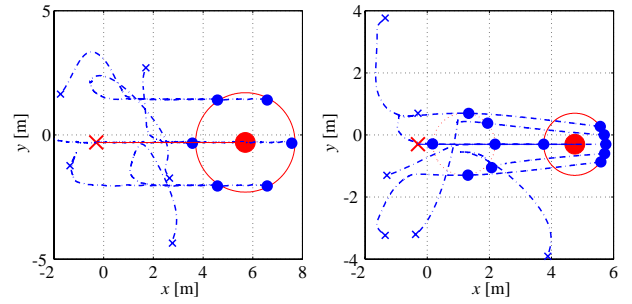


Fig. 5: Simulation result : Case of (12) Fig. 6: Simulation result : Case of (20) without noise

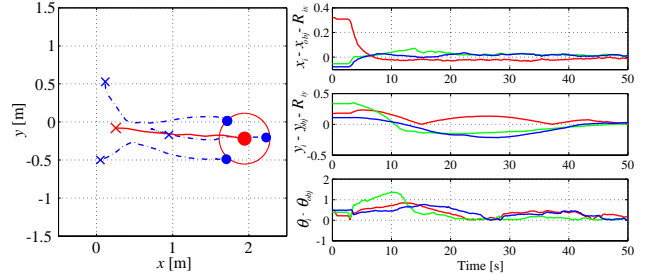


Fig. 7: Trajectories and Time responses

の移動速度で x 軸方向に移動させる。各ピークルには適当な初期状態を与え、設計パラメータは $r_d = [0.1 \ 0]^T$ [m]、 $k_i = 0.3$ 、 $k_c = 1$ 、 $\xi = 1/3$ [m]、対象物信号には白色雑音 w を印加する。 R_i は式 (12) を用いる。制御実験結果を Fig. 7 に示す。制御実験ではシミュレーション時に比べて、多少の誤差、振動はあるが取り囲みを達成していることが確認できる。

6 おわりに

本稿では、consensus filter を用いたマルチピークルシステムによる協調取り囲み行動について述べた。それぞれの仮想構造に対して合意アルゴリズムを基にした制御則を適用し、ネットワーク構造が広域木を有するとき、取り囲みが達成されることを示した。さらに、consensus filter を導入し、フィルタ状態を用いた対象物の取り囲みについて考えた。最後にシミュレーションと制御実験によって提案法の有効性を検証した。今後の課題としては、実際にピークルに搭載されたセンサを用いた分散制御の制御実験による検証が挙げられる。

参考文献

- [1] 小林 祐一, 大坪 恭士, 細江 繁幸 : 群ロボットによる協調捕獲行動の自律分散制御, 計測自動制御学会論文集, 43-8, 663/671 (2007)
- [2] 山口 博明 : 非ホロノミックな拘束を有する移動ロボット群の捕捉行動, 日本機械学会論文集 C 編, 69-688, 3285/3292 (2003)
- [3] T. H. Kim and T. Sugie : Cooperative control for target-capturing task based on a cyclic pursuit strategy, *Automatica*, 43-8, 1426/1431 (2007)
- [4] 川上 裕樹, 滑川 徹 : 仮想構造を用いた非ホロノミックエージェントによる取り囲み行動, 第 36 回 SICE 制御理論シンポジウム資料, 499/502 (2007)
- [5] W. Ren : Consensus Seeking in Multi-vehicle Systems with a Time-varying Reference State, *proc. of the 2007 ACC*, 717/722 (2007)
- [6] R. O. Saber and J. S. Shamma : Consensus Filters for Sensor Networks and Distributed Sensor Fusion, *Proc. of the 44th IEEE CDC, 2005 and 2005 ECC*, (2005)