

動的ネットワーク下での マルチビークルシステムによる協調取り囲み行動

川上裕樹 滑川徹 (金沢大学)

Cooperative Target-enclosing Strategy for Multi-vehicle Systems with Dynamic Topology

*H. Kawakami and T. Namerikawa (Kanazawa University)

Abstract— This paper deals with cooperative target-enclosing problem for multi-vehicle systems with dynamic network topology. Firstly, we introduce a dynamic network topology that depends on relative distance between the vehicles. Secondly, we propose the target-enclosing strategy based on consensus seeking with dynamic network topology. In proposed strategy, at least one vehicle only has to acquire the states of target-object. To analyze the convergence of target-enclosing problem with dynamic network topology, algebraic graph theory and matrix theory are utilized. Finally, numerical simulation results and experimental results are provided that demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Multi-vehicle Systems, Cooperative Target-enclosing Strategy, Dynamic Topology, Consensus Seeking

1 はじめに

近年, ビークルフォーメーションをはじめとして, エージェント群を協調させて動作させることによって単数では困難である複雑なタスクを達成する研究が盛んに行われている^{1, 2)}. これらの研究の多くは, 近傍のエージェントと情報交換を行うもしくは相対的な情報を取得することによって制御系を構成している. また, 複数のエージェントが情報交換などにより協調行動することによって, 単数もしくは情報交換を行わない場合に比べて, 一般的にシステム全体のロバスト性, 性能が向上することが知られている.

現在, 複数のエージェントが協調して移動対象物を取り囲み捕獲する制御問題が注目されている^{3, 4, 5, 6)}. 文献⁵⁾では, 仮想構造を用いることによって非ホロノミック拘束を有する車両型エージェントに対して線形合意アルゴリズムを基にした制御則が提案されている. この制御則で取り囲みを漸近的に達成するためには, エージェント間のネットワーク構造は固定の directed spanning tree を有していることが必要十分条件となる. しかし, 実際のシステム環境を考えた場合, センサ範囲によってネットワーク構造が動的に変化し, 固定のネットワークではない場合が想定される. 動的ネットワークによる合意, 群れ, フォーメーションについては, 多くの先行研究が存在する^{1, 7)}. それらの多くは, 動的ネットワークがある条件下で全てのエージェントの状態がある一定値に合意することを証明している. しかしながら, 動的に移動する目標値 (対象物など) が与えられておらず, 移動対象物の取り囲み問題にそのまま適用することは困難である.

一方, 文献⁸⁾では対象物がある戦略を持ってエージェント群から逃げる場合の協調捕獲可能な条件を導出している. しかし, エージェント同士の情報交換については考慮されておらず, 対象物の速度情報を使用していないことから, 制御則のゲインに対して制約条件が存在し, 取り囲みを達成できない場合が存在する. また, 対象物がビークルの状態に依存せず移動する場合には,

移動中に位置偏差が生じてしまう.

本稿では, 文献⁵⁾で提案している制御則を基に, ビークル間のネットワーク構造が連結であり, 少なくとも 1 台のビークルが対象物を認識できる範囲内で動的に変化する場合に協調取り囲みを漸近的に達成できることを示す. また, 対象物の速度情報を用いることによって文献⁸⁾で必要となるゲインの制約をなくし, また取り囲み時の過渡特性の改善を図る.

はじめに, 問題設定として動的ネットワーク構造, ビークルのモデル, 制御目的を述べる. 次に, 合意アルゴリズムを基にした制御則を導入し, 動的ネットワーク下で取り囲みが漸近的に達成されることを示す. 最後に, 数値シミュレーションと制御実験によって提案手法の有効性を検証する. その際に, 対象物がエージェント情報を用いた戦略によって逃げる場合の取り囲みについて扱う.

2 問題設定

2.1 ビークルと対象物のモデル

本稿では, 以下の線形一次システムで表現される N 台のビークルを扱う.

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

ここで, $r_i = [x_i \ y_i]^T \in \mathbb{R}^2$ は i 番目のビークルの重心位置, $u_i \in \mathbb{R}^2$ は制御入力を表す. 一般的に用いられる二輪車両などの非ホロノミックシステムは仮想構造を用いたフィードバック線形化によって線形一次システムとして表現することができる⁵⁾.

次に, 取り囲むべき対象物は以下のダイナミクスを有するものを想定する.

$$\dot{r}_{obj} = f(t, r_{obj}, r_1, \dots, r_N) \quad (2)$$

ここで, $r_{obj} = [x_{obj} \ y_{obj}] \in \mathbb{R}^2$ は対象物の重心位置を表す. 本稿では, 対象物は自らの状態と近傍に存在するビークルの状態を用いて行動するとする. さらに, 対象物は以下の仮定を満たすとする.

仮定 1 \dot{r}_{obj} は t において区分的に連続で, r_{obj}, r_1, \dots, r_N において局所リプシッツ連続である.

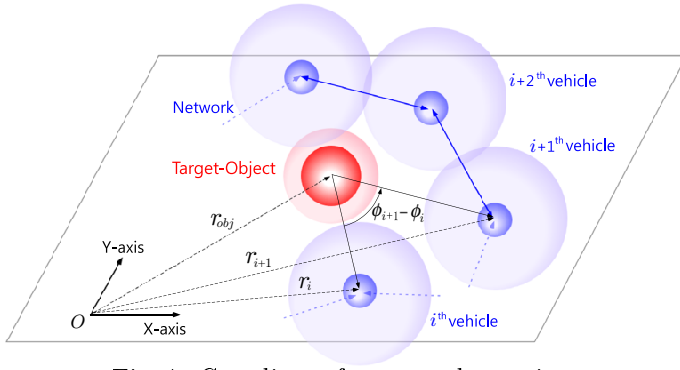


Fig. 1: Coordinate frames and notations

2.2 ネットワーク構造

システム全体のネットワーク構造を表現するためにグラフの定義を行なう。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。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。

$$\mathcal{N}_i(t) = \{j \mid \|r_{ij}(t)\| \leq \rho\} \subseteq \{1, \dots, N\}. \quad (3)$$

ここで、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルム、 $r_{ij} = r_i - r_j$, $\rho \in \mathbb{R}_+$ とする。上記の近傍集合は、ビークル間の相対距離に依存した定義であり、 ρ は実際のシステムでは各ビークルのセンサ範囲として考えることができる。

さらに、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 $\mathcal{A}(\mathcal{G}) = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 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。

$$a_{ii} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \|r_i - r_j\| \leq \rho \quad (j \in \mathcal{N}_i) \\ 0, & \|r_i - r_j\| > \rho \quad (j \notin \mathcal{N}_i) \end{cases} \quad (5)$$

次数行列 $\mathcal{D}(\mathcal{G}) = \text{diag}[d_1, \dots, d_N] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ は点の次数を要素に持ち、隣接行列の要素を用いると $d_i = \sum_{j \neq i} a_{ij}$ と表現することができる。上記の行列を基に以下のラプラシアン \mathcal{L} を定義する。

$$\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A} \quad (6)$$

グラフには、辺に方向のない (もしくは全ての辺が双方向である) 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。全ての点がお互いの点とも辺を有していない場合、このグラフは空グラフという。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、このグラフは広域木 (spanning tree) を有していると呼ぶ。また、有向グラフにおける広域木のことを有向広域木 (directed spanning tree) と呼ぶ。

ここで、ビークル間のネットワーク構造に対して以下の仮定をおく。

仮定 2 ビークル間のネットワークは連結である。

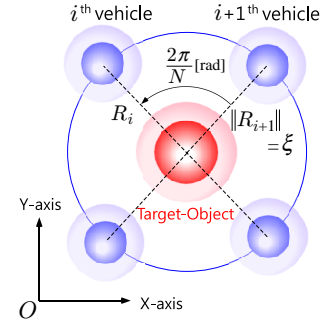


Fig. 2: Target-enclosing behavior

2.3 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 1 (対象物の取り囲み) N 台のビークルが、対象物の重心位置を中心とした同心円状に配置し、隣り合うビークル間の距離が全て等しくなること。

ここで、本稿の制御目的を以下のように設定する。

[制御目的]

C1) 各ビークルは対象物を中心として距離 ξ の位置に配置される。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|r_i(t) - r_{obj}(t)\| = \xi \text{ [m]} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (i \neq j)$$

C2) 隣り合うビークルの重心位置間の距離が全て等しくなる。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\phi_{i+1}(t) - \phi_i(t)\| = \frac{2\pi}{N} \text{ [rad]} \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (i \neq j), \quad N + 1 = 1$$

ただし、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルム、 $\xi \in \mathbb{R}_+$ は取り囲む円の半径、 $\phi_i = \angle(e_x, r_i - r_{obj}) \in [0, 2\pi)$ は対象物の位置を中心とした i 番目のエージェントの角度とする。また、取り囲む半径 ξ は本稿では原則としてセンサ範囲 ρ に比べて十分小さいとする。

3 提案手法

本稿では、ネットワークが動的に変化する場合の取り囲みについて考える。制御則を以下のように提案する。この制御則は、固定ネットワーク下での制御則⁵⁾と同じ構成となっているが、ビークルや対象物の状態によってネットワーク構造が変化するため、スイッチング制御則となっている。

$$u_i = \kappa_i [a_{iobj}(\|r_{iobj}\|) \{-k(\hat{r}_i - r_{obj}) + \dot{r}_{obj}\} + \sum_{j=1}^N a_{ij}(\|r_{ij}\|) \{-k(\hat{r}_i - \hat{r}_j) + \dot{\hat{r}}_j\}] \quad (7)$$

$$a_{iobj}(\|r_{iobj}\|) = \begin{cases} 1, & (\|r_i - r_{obj}\| \leq \rho_{obj}) \\ 0, & (\|r_i - r_{obj}\| > \rho_{obj}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\kappa_i = \frac{1}{a_{iobj}(\|r_{iobj}\|) + \sum_{j=1}^N a_{ij}(\|r_{ij}\|)} \quad (9)$$

$$R_i = \xi \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{N}\right) & \sin\left(\frac{2\pi(i-1)}{N}\right) \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

ただし、 $k > 0 \in \mathbb{R}$ は定数ゲイン、 $R_i \in \mathbb{R}^2$ は取り囲み位置、 $R_{ij} = R_i - R_j$, $\hat{r}_i = r_i - R_i$, $\rho_{obj} \in \mathbb{R}$ である。また、 a_{iobj} は、 i 台目のビークルが対象物を認識できるかを表す変数である。

(10) 式のように R_i を設定することによって制御目的 C1) は、以下のように考えることができる。

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} \|r_i - r_{obj}\| &= \|R_i\| = \xi \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{r}_i - r_{obj}) &= \lim_{t \rightarrow \infty} (r_i - R_i - r_{obj}) = 0\end{aligned}\quad (11)$$

また、制御目的 C2) は、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{r}_{i+1} - \hat{r}_i) = \lim_{t \rightarrow \infty} (r_{i+1} - R_{i+1} - r_i) = 0,$$

となる。ここで、 $R_i = \xi e^{j\frac{2\pi(i-1)}{N}} \in \mathbb{R}^2 \approx \mathbb{C}$ と表現すると R_{i+1} は、

$$R_{i+1} = e^{j\frac{2\pi}{N}} R_i \quad (12)$$

となる。従って、制御目的 C1)-C2) は C'1) に置き換えることができる。

$$\begin{aligned}C1') \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{r}_i(t) - \hat{r}_j(t)\| &= 0, \\ \text{for } i, j \ (i \neq j) &= 1, \dots, N, N+1 = obj, R_{obj} = 0.\end{aligned}$$

ここでネットワークの切り替えは、以下の区分的に定数信号 σ で t_0, t_1, \dots の有限回のタイミングで行われると考える。

$$\sigma : [0, \infty) \rightarrow \mathcal{P} \quad (13)$$

ここで、 \mathcal{P} は仮定 2 を満たし、少なくとも 1 台は対象物を認識している全てのネットワーク構造の集合とする。このとき、次の定理が成り立つ。

定理 1 $N \geq 2$ 台のピークル (1) と仮定 1 を満たす対象物 (2) を考える。対象物を含めたネットワーク構造は t_0, t_1, \dots で切り替わり、 $t \in [t_i, t_{i+1})$ の区間でピークル間のネットワーク構造は仮定 2 を満たし、少なくとも 1 台は対象物を認識できるとする。各ピークルに対して制御則 (7)-(10) を適用するとき、制御目的 C'1) は漸近的に達成される。

[証明]

i 台目のピークル (1) に制御則 (7)-(10) を代入する。

$$\begin{aligned}\dot{r}_i &= \kappa_i [a_{iobj} (\|r_{iobj}\|) \{-k(\hat{r}_i - r_{obj}) + \dot{r}_{obj}\} \\ &\quad + \sum_{j=1}^N a_{ij} (\|r_{ij}\|) \{-k(\hat{r}_i - \hat{r}_j) + \dot{\hat{r}}_j\}] \quad (14)\end{aligned}$$

ここで、対象物を $N+1$ 台目のピークルとして表現することを考える ($r_{obj} = \hat{r}_{N+1}$, $a_{iobj} = a_{iN+1}$)。システム全体 ($i = 1, \dots, N+1$) で表現すると下式を得る。

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_1 \\ \dot{\hat{r}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\hat{r}}_{N+1} \end{bmatrix} \\ &= -k \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \ddots & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \\ \vdots \\ \hat{r}_{N+1} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1(N+1)} \\ a_{21} & 0 & \ddots & a_{2(N+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_1 \\ \dot{\hat{r}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\hat{r}}_{N+1} \end{bmatrix}$$

グラフラプラシアンを用いて表現すると以下を得る。

$$(\mathcal{L}_\sigma \otimes I_2) \dot{\hat{r}} = -k(\mathcal{L}_\sigma \otimes I_2) \hat{r} \quad (15)$$

となる。ここで、 \mathcal{L}_σ は信号 σ によって切り替わるラプラシアン、 \otimes はクロネッカ積を表す。 $\hat{r} \in \mathbb{R}^{2(N+1)}$ は $\hat{r} = [\hat{r}_1^T \ \hat{r}_2^T \ \cdots \ \hat{r}_{N+1}^T (= r_{obj}^T)]^T$ である。ネットワークが固定である場合には (15) 式から、 $(\mathcal{L}_\sigma \otimes I_2) \hat{r} \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$, $\hat{r}_i - \hat{r}_j \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$ となる⁵⁾。

ここで、ネットワークは $t \in [t_i, t_{i+1})$ の区間で以下のように定数行列であるとする。

$$\mathcal{L}(t) = \mathcal{L}(t_i), \quad t \in [t_i, t_{i+1}) \quad (16)$$

次に、状態を $\hat{r}_{ei} = \hat{r}_i - \hat{r}_{N+1}$ と変換することによって以下の表現を得ることができる。

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & -a_{23} & -a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \cdots & -a_{N(N-1)} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{Nj} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_{e1} \\ \dot{\hat{r}}_{e2} \\ \vdots \\ \dot{\hat{r}}_{eN} \end{bmatrix} \\ &= -k \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & -a_{23} & -a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \cdots & -a_{N(N-1)} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{Nj} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \hat{r}_{e1} \\ \hat{r}_{e2} \\ \vdots \\ \hat{r}_{eN} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

ベクトル $\hat{r}_e = [(\hat{r}_1 - \hat{r}_{N+1})^T \ \cdots \ (\hat{r}_N - \hat{r}_{N+1})^T]^T \in \mathbb{R}^{2N}$ 、ネットワークを表現する新たな行列 $\mathcal{M}_\sigma \in \mathbb{R}^{N \times N}$ を用いて表現すると以下を得る。

$$(\mathcal{M}_\sigma \otimes I_2) \dot{\hat{r}}_e = -k(\mathcal{M}_\sigma \otimes I_2) \hat{r}_e \quad (17)$$

(15) 式と (17) 式とは等価な式となる。 \mathcal{M}_σ は、ピークル間のネットワーク構造が連結であり、対象物を認識するピークルが少なくとも 1 台は存在する場合、 $(\mathcal{M}_\sigma \otimes I_2) \hat{r}_e = 0$ は自明な解 $\hat{r}_e = 0$ を唯一持ち、正則となる。一方、どのピークルも対象物を認識できない場合は、 \mathcal{M}_σ は零固有値を有し、正則とはならない。(17) 式の両辺に $(\mathcal{M}_\sigma \otimes I_2)^{-1}$ を左側からかける。

$$\begin{aligned}\dot{\hat{r}}_e &= -k(\mathcal{M}_\sigma \otimes I_2)^{-1} (\mathcal{M}_\sigma \otimes I_2) \hat{r}_e \\ \hat{r}_e &= -k \hat{r}_e\end{aligned}\quad (18)$$

つまり、ゲイン k にのみ依存し、ネットワークに依存しないシステムとして表現することができる。従って、

$$\hat{r}_e \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty, \quad \hat{r} \rightarrow \mathbf{1} \otimes \hat{r}_{N+1} \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (19)$$

$$\hat{r} \rightarrow \mathbf{1} \otimes r_{obj} \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (20)$$

が成り立つ。ここで、 $\mathbf{1} = [1 \ \cdots \ 1]^T$ とする。よって、ネットワークの変化に依存せず、制御目的 C'1) を達成することができる。□

注意 1 対象物を含めたピークル間のネットワーク構造が、常に対象物を根とした広域木を有している場合にも \mathcal{M}_o は正則となり、取り囲みを達成することができる。

4 有効性の検証

本稿では、対象物がピークルの状態に依存せず移動する場合 (Case 1) とピークルの状態に依存して移動する場合 (Case 2) について数値シミュレーションにて提案手法の有効性を検証する。さらに、制御実験によって提案手法の有効性を確認する。

4.1 数値シミュレーションによる検証

4.1.1 Case 1

対象物がピークルの状態には依存せず移動する場合を考える。本稿では対象物はランダムに移動することとする。初期状態は適当に設定し、パラメータは、 $N = 4$, $k = 0.2$, $\rho = \rho_{obj} = 2.5$, $\xi = \sqrt{2}$ とする。シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a) はトラジェクトリ、Fig. 3(b) は $\hat{r}_i - r_{obj}$ と $\phi_{i+1} - \phi_i$ の時間応答を示す。図中の \times は初期位置、 \bullet は最終位置を表す。これらの結果から取り囲みを漸近的に達成していることがわかる。

4.1.2 Case 2

対象物がある戦略によって逃げる場合の取り囲みについてシミュレーションにて検証する。対象物は以下のような制御則によって移動する場合を想定する。

$$\dot{r}_{obj} = k_{obj} \sum_{j=1}^N a_{objj} (r_{obj} - r_j) \quad (21)$$

認識 (隣接) するピークルでは $a_{objj} = 1$ 、認識 (隣接) しないピークルでは $a_{objj} = 0$ となる。ここでは全てのピークルを認識して移動することとする ($a_{objj} = 1, \forall j$)。パラメータは、 $N = 4$, $k = 0.2$, $k_{obj} = 3$, $\rho = \rho_{obj} = 2.5$, $\xi = \sqrt{2}$ とする。シミュレーション結果を Fig. 4 に示す。この結果から対象物が戦略を持って逃げる場合も取り囲みを漸近的に達成していることが確認でき

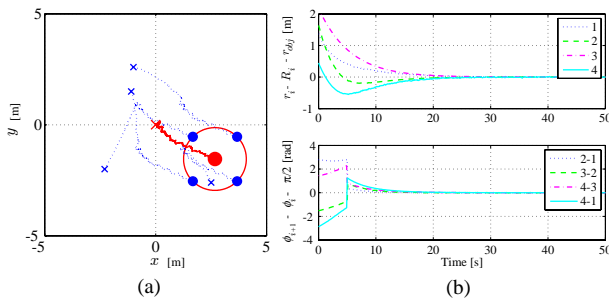


Fig. 3: Simulation results of Case 1

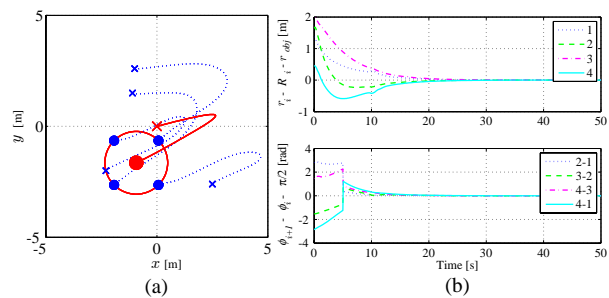


Fig. 4: Simulation results of Case 2

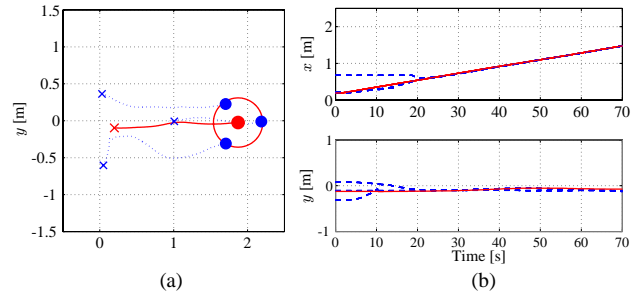


Fig. 5: Experimental results

る。さらに、対象物の速度情報を用いた制御則を用いているため、文献⁸⁾のようなゲインの制約が生じずに取り囲みを達成していることがわかる。

4.2 制御実験による検証

次に、制御実験によって提案手法の有効性を検証する。実験装置は、文献⁵⁾と同型の実験装置を用いることとする。ピークル、対象物ともに独立駆動二輪車両を用いており、文献⁵⁾と同様に仮想構造を用いたフィードバック線形化を行っている。初期状態は適当に設定し、パラメータは、 $N = 3$, $k = 0.5$, $\rho = \rho_{obj} = 0.5$ [m], $\xi = 0.33$ [m] とし、制御器のサンプリングは 0.2 [s] とする。対象物は x 軸方向に速度 0.03 [m/s] の速度で移動することとする。実験結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) にトラジェクトリ、Fig. 5(b) に x, y 方向の時間応答を示す。これらの結果から漸近的に取り囲みを達成していることが確認できる。

5 おわりに

本稿では、文献⁵⁾で提案している制御則を基に、ピークル間のネットワーク構造が連結であり、少なくとも1台のピークルが対象物を認識できる範囲内で動的に変化する場合に協調取り囲みを漸近的に達成できることを示した。最後に、実機を用いた場合にも提案手法が有効であることを制御実験によって確認した。

参考文献

- 1) A. Jadbabaie and A. S. Morse: Coordination of Groups of Mobile Autonomous Agents Using Nearest Neighbor Rules, *IEEE Trans. Autom. Contr.*, **48**-6, 988/1001 (2003)
- 2) W. Ren: Multi-vehicle Consensus with a Time-varying Reference State, *Sys. & Contr. Lett.*, **56**-7-8, 474/483 (2007)
- 3) 小林, 大坪, 細江: 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)
- 4) T. H. Kim and T. Sugie: Cooperative control for target-capturing task based on a cyclic pursuit strategy, *Automatica*, **43**-8, 1426/1431 (2007)
- 5) H. Kawakami and T. Namerikawa: Virtual Structure Based Target-enclosing Strategies for Nonholonomic Agents, *Proc. IEEE Multi-conf. Sys. & Contr.* (2008)
- 6) S. Woo and S. Jayasuriya: Cooperative Surveillance of a Moving Target using a Formation Framework, in *Proc. 17th IFAC World Congress*, 587/592 (2008)
- 7) N. Chopra, D. M. Stipanovic and M. W. Spong: On Synchronization and Collision Avoidance for Mechanical Systems, *Proc. Amer. Contr. Conf.*, 3713/3718 (2008)
- 8) 櫻井, 津村, 金: マルチエージェントシステムにおける協調捕獲可能条件, 計測自動制御学会第8回制御部門大会資料 (2008)