

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

○川上裕樹 滑川 徹 (金沢大学)

Virtual Structure Based Target-enclosing Strategies for Nonholonomic Agents

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

Abstract— In this paper, we propose target-enclosing strategies for multiple nonholonomic agents. The proposed enclosing control laws achieve enclosing configurations based on virtual structures. The task of enclosing a target object is divided into two strategies, multi-agent system approach and leader-follower approach. To analyze the enclosing problem, algebraic graph theory and Lyapunov theory are utilized. Simulations and experiments are carried out to demonstrate the effectiveness of proposed control laws.

Key Words: Target-enclosing, Nonholonomic Agent, Virtual Structure, Algebraic Graph Theory

1 はじめに

近年、複数の自律的に行動するエージェントから構成されるマルチエージェントシステムに対する分散・協調制御に関する研究が盛んに行なわれている¹⁾。現在、マルチエージェントシステムに対する分散・協調制御に関する研究の中でも、危険区域での調査、防犯システム、センサネットワークなどを目的として、対象物の捕獲行動に関する研究が注目を集めている²⁾。

捕獲行動は、把持行動と取り囲み行動に大別される。把持行動とは、複数のエージェントを対象物がどの方向にも逃れられないように対象物表面上に配置することをいう。一方、取り囲み行動とは、複数のエージェントによって対象物を包含する行動のことをいい、文献³⁾では、情報結合した複数台の全方向移動エージェントを用いた、勾配法による取り囲み行動の分散制御則が提案されている。また、取り囲み行動は、対象物回りにおける複数エージェントによるフォーメーション形成行動と考えることができる。文献⁴⁾では、循環追従 (Cyclic pursuit) によるピークルのフォーメーション問題が提案されており、文献^{5), 6)}では、Cyclic pursuit を基にしたエージェント同士が双方向の情報交換を必要としない全方向移動エージェントによる3次元空間における取り囲み制御則が提案されている。これらの方策を実システムに適用する場合、安価、単純構成などの理由から、エージェントとして二輪車両などの非ホロノミックエージェントを用いることが考えられる。しかし、文献^{3), 5), 6)}では、エージェントの物理的拘束を考慮しておらず、非ホロノミックシステムに適用することは困難である。さらに、全てのエージェントが対象物との相対的な位置・姿勢などの状態を得る必要がある。

そこで本稿では、文献⁷⁾で用いられている仮想構造を用いて、非ホロノミックエージェント・対象物にそれぞれ仮想構造を定義し、仮想エージェントが仮想対象物を取り囲むことによって、実エージェントが実対象物の取り囲みを漸近的に達成する制御則を提案する。制御則は、エージェント間の情報結合構造を有するマルチエージェントシステムと、複数エージェント内の1台をリーダーとするリーダー・フォロアシステムの場合に対して提案し、それぞれに対して取り囲みを漸近的に達成することを示す。最後に提案した制御則の有効性をシミュレーションと制御実験によって検証する。

2 準備

グラフは、いくつかの点とそれらの間につながる線分(辺)によって表される図形である⁸⁾。グラフは、無向グラフと有向グラフに大別することができる。ここで、有限非空である点集合を $\mathcal{V} = \{1, 2, 3, \dots, N\}$ 、点同士をつなぐ辺の集合を $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ とすると、グラフ \mathcal{G} は $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ と表すことができる。任意の2点 i, j が、 $i, j \in \mathcal{V}$ かつ $(i, j) \in \mathcal{E}$ の場合、点 i に対して点 j は隣接しているといい、 $i \sim j$ と表現する。ここで、点 i に対して隣接している点の集合を近傍集合 \mathcal{N}_i とし、以下のように定義する。

$$\mathcal{N}_i = \{j | i \sim j\} \subseteq \{1, \dots, N\} \setminus \{i\} \quad (1)$$

ここで、次のグラフを定義する。任意の点 i から j への道が存在する無向グラフを連結グラフとする。一方、任意の点 i から j への道が存在する有向グラフを強連結グラフとし、 $\sum_i a_{ij} = \sum_i a_{ji}$ を満たす強連結グラフを平衡グラフとする。次に以下の行列を導入する。隣接行列 $A(\mathcal{G}) = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ は $i \sim j$ の辺の本数(次数)を ij 要素に持つ行列である。次数行列 $D(\mathcal{G}) = \text{diag}[d_1, \dots, d_n] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ は点 i の次数を要素に持ち、隣接行列の要素を用いると $d_i = \sum_{j \neq i} a_{ij}$ と表現され、対角要素以外は $d_{ij} = 0$ となる行列である。ここで、行列 \mathcal{L} (グラフラプラシアン)を以下のように定義する。

$$\mathcal{L}(\mathcal{G}) = D(\mathcal{G}) - A(\mathcal{G}) = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N} \quad (2)$$

補題 1⁷⁾: N 個の点から構成される連結もしくは強連結グラフのグラフラプラシアン \mathcal{L} を考える。このとき、 $\zeta = -(\mathcal{L} \otimes I_m)\zeta$ で表されるシステムは、

$$\zeta \rightarrow (\zeta_{r1} \zeta_{l1}^T \otimes I_m)\zeta(0) = \mathbf{1} \otimes \alpha \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (3)$$

に収束する。ただし、 ζ_{r1}, ζ_{l1} は、 $\zeta_{l1}^T \zeta_{r1} = 1$, $\zeta_{l1}^T \mathbf{1} = 1$ を満たすグラフラプラシアン \mathcal{L} の零固有値に対する右、左固有ベクトルである。 \otimes はクロネッカー積、 $\zeta_i \in \mathbb{R}^m$, $\zeta = [\zeta_1^T \ \zeta_2^T \ \dots \ \zeta_N^T]^T \in \mathbb{R}^{N \times m}$, $\alpha \in \mathbb{R}^m$ は合意値とする。

補題 2¹⁾: 連結グラフ、平衡グラフのグラフラプラシアン \mathcal{L} から構成されるシステム $\zeta = -(\mathcal{L} \otimes I_m)\zeta$ は、

$$\alpha = \frac{\sum_i \zeta_i(0)}{N} = \text{Ave} \{\zeta_i(0)\} \quad (4)$$

に収束する。ただし、 $\text{Ave} \{\cdot\}$ は平均値を表す。

3 問題設定

3.1 仮想構造⁷⁾

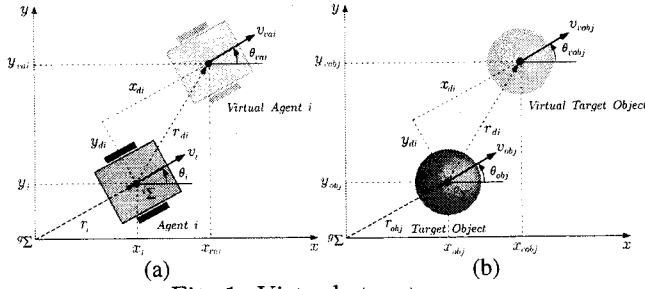


Fig. 1: Virtual structures

本稿では、以下に示すキネマティクスを有する N 台の非ホロノミックビークル (Fig. 1(a) 左下) を扱う。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & 0 \\ \sin \theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $r_i = [x_i, y_i]^T \in \mathbb{R}^2$, $\theta_i \in \mathbb{R}$, $v_i \in \mathbb{R}$, $\omega_i \in \mathbb{R}$ はそれぞれ基準座標系 ${}^g\Sigma$ におけるエージェントの位置ベクトル、姿勢角、速度、重心位置回りの角速度である。このエージェントは、車両が車軸方向に滑らないことから、

$$x_i \sin \theta_i - y_i \cos \theta_i = 0 \quad (6)$$

という速度拘束を有するため、非ホロノミックシステムとなる。式 (5) のエージェントに対して仮想エージェントを Fig. 1(a) のように定義する。このとき、エージェントと仮想エージェントの位置関係は以下のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} x_{vai} \\ y_{vai} \\ \theta_{vai} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + x_{di} \cos \theta_i - y_{di} \sin \theta_i \\ y_i + x_{di} \sin \theta_i + y_{di} \cos \theta_i \\ \theta_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $r_{vai} = [x_{vai}, y_{vai}]^T \in \mathbb{R}^2$ は基準座標系 ${}^g\Sigma$ における仮想エージェントの位置ベクトル、 $r_{di} = [x_{di}, y_{di}]^T \in \mathbb{R}^2$ はエージェント座標 ${}^i\Sigma$ における仮想エージェントの位置ベクトルである。式 (7) を一階時間微分すると、

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{vai} \\ \dot{y}_{vai} \\ \dot{\theta}_{vai} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i \\ B_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= B u_i \quad (9)$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -x_{di} \sin \theta_i - y_{di} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & x_{di} \cos \theta_i - y_{di} \sin \theta_i \end{bmatrix}$$

$$B_\theta = [0 \quad 1]$$

と表現することができ、 $x_{di} \neq 0$ とすることで B_i を正則とすることができる。次に、取り囲む対象物の仮想対象物を考える (Fig. 1(b))。エージェントの場合と同様に、対象物と仮想対象物の位置関係は以下のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} x_{vobj} \\ y_{vobj} \\ \theta_{vobj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{obj} + x_{dobj} \cos \theta_{obj} - y_{dobj} \sin \theta_{obj} \\ y_{obj} + x_{dobj} \sin \theta_{obj} + y_{dobj} \cos \theta_{obj} \\ \theta_{obj} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$r_{obj} = [x_{obj}, y_{obj}]^T \in \mathbb{R}^2$, $r_{vobj} = [x_{vobj}, y_{vobj}]^T \in \mathbb{R}^2$ は基準座標系 ${}^g\Sigma$ における対象物、仮想対象物の位置ベクトルを表す。ここで、以下の仮定をおく。

仮定 1: エージェント間の情報結合構造は、連結グラフもしくは平衡グラフで表現できる。

仮定 2: 対象物は速度 $v_{obj} \neq 0$ で移動し、対象物の位置 r_{obj} , 速度 \dot{r}_{obj} を得ることができる。

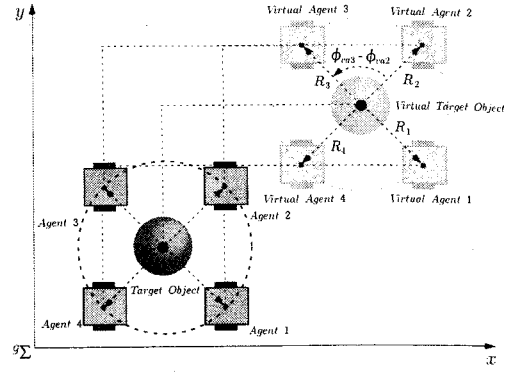


Fig. 2: Target enclosing using the virtual structures

3.2 制御目的

i 台目の仮想エージェントが仮想対象物を取り囲む位置を $R_i \in \mathbb{R}^2$ と定義する。本稿では円状に対象物を取り囲むことを考える。形状を円とすると取り囲み半径は、

$$|R_1| = |R_2| = \dots = |R_N| = \xi = const. \quad (11)$$

と表現できる。ただし、 $\xi \in \mathbb{R}$ は取り囲み半径である。さらに、仮想対象物回りの仮想エージェント i の角度を $\phi_{vai} \in \mathbb{R}$ と定義する。仮想構造を用いた取り囲み行動における制御目的を以下のように設定する。

$$1) |r_{vai} - r_{vobj}| \rightarrow \xi \quad as \quad t \rightarrow \infty,$$

$$2) \phi_{va(i+1)} - \phi_{vai} \rightarrow \frac{2\pi}{N} \text{ [rad]} \quad as \quad t \rightarrow \infty,$$

$$3) \theta_{vai} - \theta_{vobj} \rightarrow 0 \text{ [rad]} \quad as \quad t \rightarrow \infty,$$

for $i = 1, \dots, N$.

ただし、制御目的 2 は $i = N$ の場合、 $N+1$ を 1 とする。

3.3 制御則 1

制御目的 1) - 3) を達成するために、仮想エージェント (9) に対して以下の制御則 1 を提案する。

$$u_i = B_i^{-1} \left[-k \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \{(r_{vai} - R_i) - (r_{vaj} - R_j)\} + \dot{r}_{vobj} \right] \quad (12)$$

ただし、 $k \in \mathbb{R}$ は定数ゲイン、 $R_i \in \mathbb{R}^2$ は取り囲み位置、 \mathcal{N}_i はエージェント間の情報結合構造を示す近傍集合とする。この制御則では、隣接するエージェントと情報交換することによって、相対的な距離のみで制御することができる。

定理 1: N 台の仮想エージェント (9) から構成されるマルチエージェントシステムを考え、このシステムに対して制御則 1 を適用する。ただし、 $k > 0$ とし、仮定 1, 2 を満たすとする。このとき、

$$\frac{\sum_{i=1}^N r_{vai}(0)}{N} = r_{vobj}(0) \quad (13)$$

(13) 式を満たす初期値において制御目的 1) - 3) を漸近的に達成する。

証明: 新たな変数を

$$\begin{cases} r'_{va} = r_{va} - 1 \otimes r_{vobj} - R \\ \dot{r}'_{va} = \dot{r}_{va} - 1 \otimes \dot{r}_{vobj} - \dot{R} = \dot{r}_{va} - 1 \otimes \dot{r}_{vobj} \end{cases} \quad (14)$$

とおく。ただし、 $r_{va} = [r_{va1}^T \quad r_{va2}^T \quad \dots \quad r_{vaN}^T]^T$, $R = [R_1^T \quad R_2^T \quad \dots \quad R_N^T]^T$ とする。式 (14) により N 台のエージェントをまとめて表現すると、

$$u = \oplus \sum_{i=1}^N B_i^{-1} \{-k\mathcal{L}_{(2)}r'_{va} + \mathbf{1} \otimes \dot{r}_{vobj}\} \quad (15)$$

となる。ただし、 \mathcal{L} はエージェント間の情報結合構造を表現したグラフのグラフラプラシアンとし、 $\mathcal{L}_{(2)} = \mathcal{L} \otimes I_2$ とする。仮想エージェント (9) を N 台まとめて表現すると、

$$\dot{r}_{va} = \oplus \sum_{i=1}^N B_i u \quad (16)$$

となる。ここで、 $\oplus \sum_i a_i$ は対角要素に a_i を持つ正方行列を表す。上記の制御則 1 を代入すると、

$$\dot{r}'_{va} = -k\mathcal{L}_{(2)}r'_{va} \quad (17)$$

と表現できる。グラフラプラシアンの性質¹⁾より $\mathcal{L}_{(2)}\mathbf{1} = 0$ となるため、 $t \rightarrow \infty$ で $r'_{va} \rightarrow \mathbf{1} \otimes \alpha$ に漸近的に収束することがわかる。ここで、 α は定数とする。従って、

$$r_{va} - \mathbf{1} \otimes r_{vobj} \rightarrow \mathbf{1} \otimes \alpha + R \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (18)$$

となる。連結グラフもしくは平衡グラフの場合、補題 2 より初期値 $r'_{va}(0)$ の平均値に合意するため、

$$\alpha = \frac{r'_{va}(0)}{N} = \frac{\sum_i r_{va}(0) - r_{vobj}(0)N}{N} \quad (19)$$

となる。式 (13) の関係が成り立つとき、

$$r_{vai} - r_{vobj} \rightarrow R_i \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (20)$$

が漸近的に達成される。従って、取り囲み位置を

$$R_i = |\xi| e^{j\phi_i} = |\xi| e^{j \frac{2\pi(i-1)}{N}} \quad (21)$$

と設定すると、制御目的 1), 2) が成り立つ。また、式 (9)(12) より、

$$\dot{\theta}_{vai} = -\frac{v_{vobj}}{x_{di}} \sin(\theta_{vai} - \theta_{vobj}) \quad (22)$$

となることから、

$$\theta_{vai} \rightarrow \theta_{vobj} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (23)$$

となり、制御目的 3) が成り立つ。□

3.4 制御則 2 (任意の初期値に対する取り囲み)

制御則 1 では、取り囲みを達成する際に、エージェント-対象物間に初期値制約がある。そのため、任意の初期値において取り囲みを達成することが望まれる。そこで、仮想エージェント (9) に対して以下の制御則 2 を提案する。

$$u_i = B_i^{-1} \left[\begin{array}{l} -k_i \{r_{vai} - r_{vobj} - R_i\} \\ -k_a \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \{(r_{vai} - R_i) - (r_{vaj} - R_j)\} + \dot{r}_{vobj} \end{array} \right] \quad (24)$$

ただし、 $k_i, k_a \in \mathbb{R}$ は定数ゲイン、 $R_i \in \mathbb{R}^2$ は取り囲み位置、 \mathcal{N}_i は近傍集合とする。上式の第 1 項は、対象物との距離を $|R_i|$ にするための項であり、第 2 項は i 番目と j 番目のエージェントとの相対距離を $R_i - R_j$ にするための項である。

定理 2 : N 台の仮想エージェント (9) から構成されるマルチエージェントシステムを考え、このシステムに対して制御則 2 を適用する。ただし、 $k_i, k_a > 0$ と仮定 2 を満たすとする。このとき、任意の初期値において制御目的 1) - 3) を漸近的に達成する。

証明：式 (14), (16) を用いると、

$$\dot{r}'_{va} = -kr'_{va} - k_a \mathcal{L}_{(2)} r'_{va} = -\mathcal{P} r'_{va} \quad (25)$$

と表現することができる。ただし、 $k \doteq \oplus \sum_i k_i(2)$ 、 $\mathcal{P} \doteq \oplus \sum_i k_i(2) + k_a \mathcal{L}_{(2)}$ とする。ここで、以下のリアプノフ関数候補 V を定義し、

$$V(r'_{va}) = \frac{1}{2} (r'_{va})^T r'_{va} > 0 \quad (26)$$

システムの解軌道に沿って微分する。

$$\begin{aligned} \dot{V}(r'_{va}) &= (r'_{va})^T \dot{r}'_{va} \\ &= -(r'_{va})^T \mathcal{P} r'_{va} < 0 \end{aligned} \quad (27)$$

\dot{V} が負定となることから、 V はリアプノフ関数となっており、

$$r_{va} - \mathbf{1} \otimes r_{vobj} \rightarrow R \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (28)$$

となることがわかる。従って、取り囲み位置を式 (21) と設定すると、定理 1 の場合と同様に制御目的 1) - 3) が成り立つ。□

3.5 制御則 3 (リーダー・フォロアによる取り囲み)

制御目的 1)-3) を達成するために、リーダー・フォロアシステムによる制御則 3 を提案する。この制御則では、フォロア間で双方向通信する必要がなく、片方向の通信のみで取り囲みを達成することができる。また、対象物の情報はリーダーのみ必要であり、フォロアには対象物の情報が必要ない。ここで、以下の仮定をおく。

仮定 3 : リーダは、対象物の情報を得ることができ、 i 番目のフォロアは、 $i-1$ 番目のフォロアの位置 $r_{va(i-1)}$ 、速度 $\dot{r}_{va(i-1)}$ を得ることができ、ただし、 $i=1$ の場合 $i-1=l$ とする。制御則 3 を以下に定義する。リーダーに対する制御則：

$$u_l = B_l^{-1} [-k_l \{r_{val} - r_{vobj} - R_l\} + \dot{r}_{vobj}] \quad (29)$$

フォロアに対する制御則：

$$u_i = B_i^{-1} [-k_i \{(r_{vai} - R_i) - (r_{va(i-1)} - R_{(i-1)})\} + \dot{r}_{va(i-1)}] \quad (30)$$

ただし、 $k_l, k_i \in \mathbb{R}$ は定数ゲイン、 $R_l, R_i \in \mathbb{R}^2$ はそれぞれリーダー、フォロアの取り囲み位置とする。ここで、以下の定理が成り立つ。

定理 3 : N 台の仮想エージェント (9) で構成されるリーダー・フォロアシステムを考え、このシステムに対して制御則 3 を適用する。ただし、 $k_l, k_i > 0$ を満たし、仮定 3 を満たすとする。このとき、任意の初期値において制御目的 1) - 3) を漸近的に達成する。

証明：リーダーは、仮定 3 より対象物の情報を得ることができるため、 $i \rightarrow l$ とおくことでリーダーの仮想構造を表現することができ、 $R_{i(i-1)} \doteq R_i - R_{(i-1)}$ とすると、

$$\dot{r}'_{val} = -k_l r'_{val} \quad (31)$$

$$\dot{r}_{vai} - \dot{r}_{va(i-1)} = -k_i (r_{vai} - r_{va(i-1)} - R_{i(i-1)}) \quad (32)$$

と表現できる。ここで、 $k_l, k_i > 0$ とすることにより、

$$r_{val} - r_{vobj} \rightarrow R_l \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (33)$$

$$r_{vai} - r_{vaj} \rightarrow R_{i(i-1)} \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (34)$$

となる。リーダーは、 $r_{val} - r_{vobj} \rightarrow R_l$ に収束することから、フォロアの取り囲み位置は、 $r_{vai} - r_{vobj} \rightarrow R_i$ となる。ここで、取り囲み位置を式 (21) とすることによって、制御目的 1) - 3) を漸近的に達成する。□

4 シミュレーションと制御実験による検証

本節では、提案制御則による取り囲み行動をシミュレーションと制御実験にて検証する。制御則1と2の相違点は初期値の扱いのみであるため、ここでは制御則1の結果は省略する。仮想構造に関するパラメータは、シミュレーション、制御実験通して $r_{di} = (0.2 \ 0)^T$ [m] とする。また、制御実験では、 $|r'_i| \leq 0.06$ [m], $\phi_{(i+1)} - \phi_i \leq 2\pi/N \pm 0.3$ [rad], $|\theta_i - \theta_{obj}| \leq 0.3$ [rad] となった場合、取り囲み達成とする。

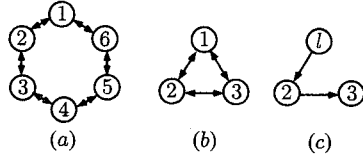


Fig. 3: Information exchange structures

4.1 制御則2のシミュレーション検証

$N = 6$, 情報結合構造は Fig. 3(a) として取り囲みを行なう。各パラメータは $R_i = 0.5 (\cos \pi i/3 \ \sin \pi i/3)^T$ [m], $\theta_{vobj} = 0$ [rad], $t: [0, 50]$ [s], $\theta_{vobj} = \pi/4$ [rad], $t: (50, 100]$ [s], $|v_{vobj}| = 0.03$ [m/s], $k_i, k_a = 0.3$ とする。シミュレーション結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) はエージェントと対象物のトラジェクトリを示し、Fig. 4(b) は対象物からの距離 $r_i - r_{obj}$, 対象物回りの角度 $\phi_{(i+1)} - \phi_i$, エージェントの姿勢 θ_i を表す。図中の \circ は実エージェントの最終値, \times は仮想エージェントの最終値を表す。これらの結果から、対象物を取り囲むことができおり、制御目的 1)-3) を達成している。

4.2 制御則2の実験検証

制御則2の実験検証は、エージェント3台と対象物1台の計4台の独立駆動型二輪車両を使用して行なう。また、システムのサンプリング時間は、画像処理時間の関係上 0.2 [s] とする。情報結合構造は、Fig. 3(b) とし、各実験パラメータは、 $R_i = 0.3 (\cos 2\pi i/3 \ \sin 2\pi i/3)^T$ [m], $k_i, k_a = 0.3$ とする。制御実験の結果を Fig. 5 に示す。これらの結果から約 18 [s] 前後に取り囲みを達成している。

4.3 制御則3の実験検証

制御則2の場合と同様の実験環境にて制御則3の実験検証を行なう。情報結合構造は、Fig. 3(c) とし、各実験パラメータは、 $R_i = 0.3 (\cos 2\pi i/3 \ \sin 2\pi i/3)^T$ [m], $k_i, k_a = 0.3$ とする。制御実験の結果を Fig. 6 に示す。これらの結果から、26 [s] 前後に取り囲みを達成している。制御則2と比較した場合、情報交換によって得られる情報が少なく、フォロアが直接対象物の状態を用いていないため、収束するまでの時間が長くなっていると考えられる。

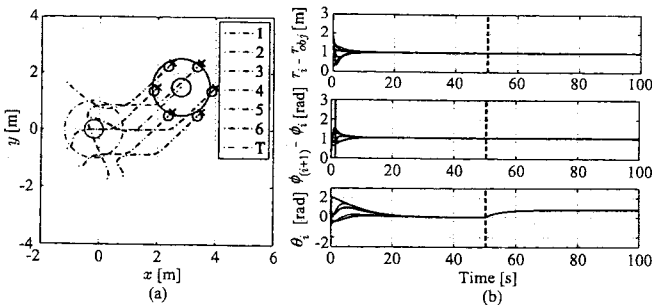


Fig. 4: Target enclosing performance (Control law 2)

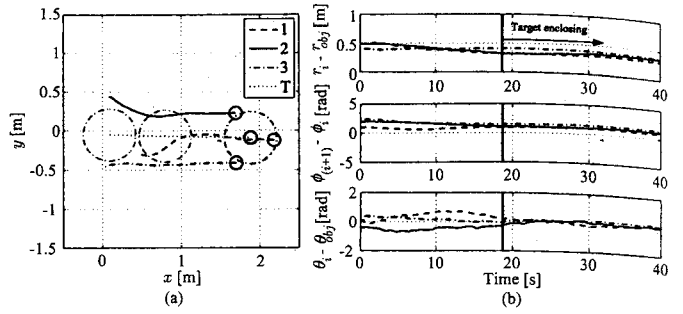


Fig. 5: Target enclosing performance (Control law 2)

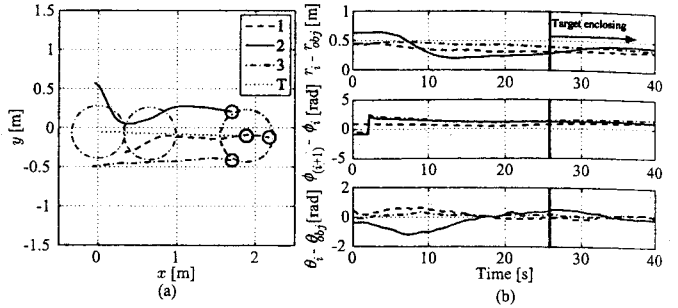


Fig. 6: Target enclosing performance (Control law 3)

5 おわりに

本稿では、仮想構造を用いて、仮想エージェントが仮想対象物を取り囲むことにより、実対象物を取り囲む制御則を、マルチエージェントシステムとリーダー・フォロアシステムの場合に対して提案し、それぞれに対して取り囲みを漸進的に達成することを示した。最後に提案制御則の有効性をシミュレーションと制御実験にて検証した。その結果、提案制御則において取り囲みを達成することができたが、制御則3は制御則2と比べ、必要な情報量が少ない反面、収束が遅くなる傾向があった。今後の課題としては、停止時の対象物の取り囲み行動、情報結合構造が変化した場合の取り囲み行動などが挙げられる。

参考文献

- 1) Reza Olfati-Sabor, J. Alex Fax and M. Murray, Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems, *Proc. of the IEEE*, pp. 215-233, 2007.
- 2) 小林 祐一, 細江 繁幸, マルチエージェントシステムの自律分散制御-群移動ロボットによる協調捕獲行動, 計測と制御, Vol 46, pp. 178-184, 2007.
- 3) 小林 祐一, 大坪 恭二, 細江 繁幸, 群移動ロボットによる協調捕獲行動の自律分散制御, 第6回計測自動制御学会部門大会資料, pp. 463-468, 2006.
- 4) Z. Lin, M. Broucke and B. Francis, Local control strategies for groups of mobile autonomous agents, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 49, Issue 4, pp. 622-629, 2004.
- 5) T. H. Kim and T. Sugie, Cooperative control for target-capturing task based on a cyclic pursuit strategy, *Automatica*, Vol. 43, Issue 8, pp. 1426-1431, 2007.
- 6) T. H. Kim, T. Sugie and T. Korogi, Distributed Coordination Strategy for Target-enclosing Operations by Particle Swarms, 第7回計測自動制御学会部門大会資料, 71-1-4, 2007.
- 7) 吉岡 愛, 滑川 徹, 仮想構造を用いたマルチビークルシステムのフォーメーション制御, 第7回計測自動制御学会制御部門大会資料, 71-1-1, 2007.
- 8) Chris Godsil and Gordon Royle, *Algebraic Graph Theory*, Springer, 2001.