

# 対象物からの反力を考慮した マルチエージェントシステムによる協調取り囲み

橋 義博 滑川 徹 (慶應義塾大学)

## Cooperative Capturing for Multi-Agent System with Reaction Force from Target Object

\*Y. Tachibana and T. Namerikawa (Keio University)

**Abstract**— This paper proposes a cooperative control of multi-agent system to capture the target object. When the agents capture the target object, they may be subjected to the reaction force from it. Therefore, we have to consider the physical contact between the agent and the target object. First, we introduce the second order model to consider the reaction force from the target object. Second, we show the proposed control law guarantees the agents capture the target object. Finally, simulation results show the effectiveness of the proposed control law.

**Key Words:** Multi-Agent system, Cooperative Capturing, Distributed Cooperative Control

### 1 はじめに

近年、複数の制御対象を扱ったシステムとしてマルチエージェントシステム (MAS) の研究が盛んに行われている。MAS は各エージェントが自律的に動作を行い、他のエージェントと協調行動を行うことにより目的を達成する。エージェントにはビークルや人工衛星などが用いられ、フォーメーションの形成や合意問題への応用が可能である<sup>1, 2, 3)</sup>。

MAS の合意問題を扱ったものとして文献<sup>4)</sup>では、通信などに制約があるなかでエージェントが目標の状態を達成するための制御則を提案している。また、文献<sup>5)</sup>では高次のダイナミクスを持つマルチエージェントシステムに対する分散合意手法が述べられている。

この合意問題を用いた制御問題として、複数のエージェントによる対象物の取り囲みがある。文献<sup>6)</sup>では同一のダイナミクスを持つ複数エージェントによる取り囲み手法の安定性解析が行われており、文献<sup>7)</sup>では移動対象物を取り囲むためのフォーメーション制御則が提案されている。また、文献<sup>8)</sup>では対象物の速度情報を必要とせずに移動対象物を取り囲むための制御則が、文献<sup>9)</sup>ではネットワークに依存せず対象物を取り囲むことができる制御則が述べられている。このように協調取り囲みについての研究は多数あるが、対象物との力のやり取りを考慮したものはほとんどない。

そこで本研究では、対象物とエージェントの物理的な接触を考慮したマルチエージェントシステムによる協調取り囲み手法として、文献<sup>9)</sup>を発展させた制御則を提案する。エージェントが対象物と接触した際に受ける反力の影響を考慮するためにモデルを 2 次系で表現し、エージェント間のネットワークは時変・連結で、対象物の情報を少なくとも 1 台のエージェントが受け取れるものとする。グラフ理論および合意アルゴリズムを取り入れた制御則を提案し、収束性の証明を行う。最後に、提案手法を用いたシミュレーションを行うことによりその有効性を示す。

### 2 問題設定

協調取り囲みではエージェントに取り囲み位置を与え対象物を取り囲むが、エージェントの取り囲み位置によっては対象物との接触が考えられる。そのため、反力の影響を考慮したモデルを考える必要がある。まず、対象となるエージェントおよび対象物に関してだが、本研究では以下のものを想定している。

- エージェントおよび対象物は剛体である。
- エージェントおよび対象物は円形であり、各半径を  $l_i, l_t \in \mathbb{R}$  とする。
- エージェントおよび対象物は全方位に移動が可能である。
- エージェントはアームなどを持たず、直接対象物に接触する。
- 対象物への入力エージェントとの接触による力だけであり、自力では動かない。

以上のエージェント、対象物に対してモデル、ネットワークおよび制御目的を述べる。

#### 2.1 エージェントおよび対象物のモデル

二次元平面内の  $N$  台のエージェントと 1 台の対象物に対して以下のような 2 次系のモデルを考え、接触した際に生じる反力の影響を取り入れる。

$$m_i \ddot{r}_i = u_i + F_i \quad (1)$$

$$m_t \ddot{r}_t = - \sum_{j=1}^N F_j \quad (2)$$

ここで、 $i$  番目のエージェント、対象物の重心位置を  $r_i, r_t \in \mathbb{R}^2$ 、入力を  $u_i \in \mathbb{R}^2$ 、 $i$  番目のエージェントが対象物から受ける反力を  $F_i \in \mathbb{R}^2$  とする。また、 $m_i, m_t \in \mathbb{R}$  はそれぞれ  $i$  番目のエージェントと対象物の質量である。Fig. 1 にエージェント群と対象物のモデルを示す。

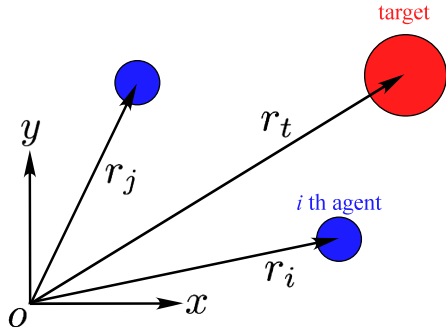


Fig. 1: Agents and the target object

次に、エージェントが対象物と接触した際に受ける反力を以下のように定義する．

$$F_i \cdot \Delta t_i = \begin{cases} -\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (1 + e) \dot{r}_{it} & (\|r_{it}\| < l_i + l_t) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$\Delta t_i \in \mathbb{R}$  は接触時間,  $e \in \mathbb{R}$  は反発係数,  $r_{it} = r_i - r_t$ ,  $\|\cdot\|$  はユークリッドノルムである．先に述べたようにエージェントおよび対象物は剛体としており, 質点モデルを用いているため, 反力を力積で表現している．式(3)から分かるように, 反力はエージェントと対象物が接触する場合のみに働くものとなっている．

## 2.2 ネットワーク

システムのネットワーク構造をグラフにより表現する．Fig. 2 に示すようにエージェントおよび対象物の重心位置間の距離が

$$\|r_i - r_j\| \leq \rho \quad (4)$$

のときのみ相手の情報を受け取れるものとし, ネットワークが互いの位置に応じて変化するものとする．ここで,  $\rho \in \mathbb{R}$  はセンサや通信範囲を想定している．したがって, エージェントおよび対象物間の隣接行列  $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{(N+1) \times (N+1)}$  は  $i, j = 1, \dots, N, N+1$  において

$$a_{ii} = 0 \quad (5)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & (\|r_i - r_j\| \leq \rho) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (6)$$

となる．なお, 対象物を  $N+1$  番目のエージェントとしており,  $a_{(N+1)j} = 0$  ( $j = 1, \dots, N$ ) である．

ここで, システムのネットワーク構造に関して以下の仮定を設ける．

仮定 1 エージェント間のネットワークは時変であるが, 常に連結である．

仮定 2 少なくとも 1 台のエージェントは対象物を認識することができる．

仮定 1 はエージェント間のネットワーク構造に関するものである．また, 仮定 2 は仮定 1 とあわせて, 対象物を根とした有向全域木が存在することを意味している．

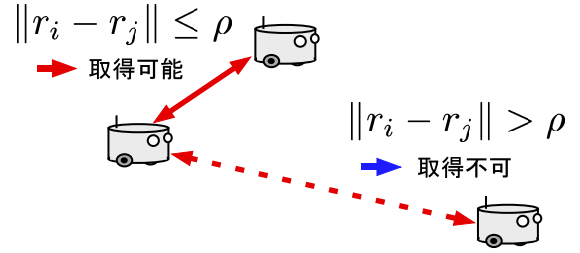


Fig. 2: Network

## 2.3 制御目的

$N$  台のエージェントによる取り囲みについて考える．取り囲みとは各エージェントが対象物周辺に配置されることであり, 本研究では以下のように定義する．

制御目的 各エージェントは対象物を中心とした位置  $R_i$  に収束する．

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|r_i(t) - (r_i(t) + R_i)\| = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

ここで,  $R_i \in \mathbb{R}^2$  は対象物を中心とした  $i$  番目のエージェントの目標位置ベクトルであり, エージェントが収束したときに力がつりあうように設定するものとする．Fig. 3 に制御目的を達成した時の様子を示す．

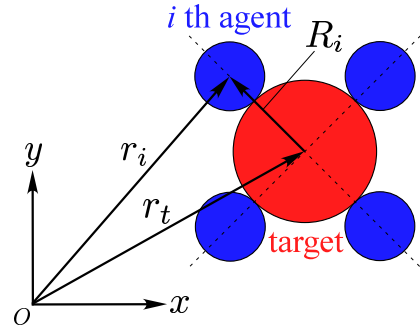


Fig. 3: Control object

## 3 提案手法

制御目的 (7) を達成するために各エージェントに与える入力として式 (8) を提案する．

$$u_i = \frac{m_i}{\kappa_i} \left[ \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \left\{ -k_1 (\hat{r}_i - \hat{r}_j) - k_2 (\dot{\hat{r}}_i - \dot{\hat{r}}_j) + \ddot{\hat{r}}_j \right\} - F_i \right] \quad (8)$$

ここで,  $k_1, k_2 \in \mathbb{R} > 0$  はゲイン,  $a_{ij}$  は隣接行列  $A$  の要素である．また,  $\kappa_i = \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}$  であり, 仮定 1 より  $\kappa_i > 0$  である．なお,  $\hat{r}_i = r_i - R_i$ ,  $R_{N+1} = 0$  とする．

以上のモデル, 制御則に対して, 次の定理が成り立つ．

定理 1 仮定 1, 2 を満たす  $N \geq 2$  体のエージェント (1) と対象物 (2) から構成されるシステムに対して制御則 (8) を用いることにより, エージェント群は制御目的 (7) を漸近的に達成する．

Proof: エージェントのモデル (1) に対して制御則 (8) を代入すると次のようになる.

$$m_i \ddot{r}_i = \frac{m_i}{\kappa_i} \left[ \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \left\{ -k_1(\hat{r}_i - \hat{r}_j) - k_2(\dot{\hat{r}}_i - \dot{\hat{r}}_j) + \ddot{\hat{r}}_j \right\} \right] \quad (9)$$

さらに展開すると次のようになる.

$$\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}(\ddot{r}_i - \ddot{r}_j) = -k_2 \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}(\dot{\hat{r}}_i - \dot{\hat{r}}_j) - k_1 \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}(\hat{r}_i - \hat{r}_j) \quad (10)$$

式 (10) をシステム全体で表すと次のようになる.

$$= -k_2 \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \cdots & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \cdots & -a_{N(N+1)} \\ 0 & 0 & \cdots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{(N+1)j} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \ddot{\hat{r}}_1 \\ \ddot{\hat{r}}_2 \\ \vdots \\ \ddot{\hat{r}}_N \\ \ddot{\hat{r}}_{N+1} \end{bmatrix} \\ -k_1 \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \cdots & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \cdots & -a_{N(N+1)} \\ 0 & 0 & \cdots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{(N+1)j} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \\ \vdots \\ \hat{r}_N \\ \hat{r}_{N+1} \end{bmatrix} \\ -k_1 \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \cdots & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \cdots & -a_{N(N+1)} \\ 0 & 0 & \cdots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{(N+1)j} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \\ \vdots \\ \hat{r}_N \\ \hat{r}_{N+1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

グラフラプラシアン  $\mathcal{L} = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{(N+1) \times (N+1)}$ ,  $l_{ij} = -a_{ij}$ ,  $l_{ii} = \sum_{j \neq i} a_{ij}$  と  $\hat{r} = [\hat{r}_1^T \hat{r}_2^T \cdots \hat{r}_N^T \hat{r}_{N+1}^T]^T$  より式 (11) は

$$(\mathcal{L} \otimes I_2) \ddot{\hat{r}} = -k_2(\mathcal{L} \otimes I_2) \dot{\hat{r}} - k_1(\mathcal{L} \otimes I_2) \hat{r} \quad (12)$$

と表すことができる. ここで,  $\hat{r}_{ei} = \hat{r}_i - \hat{r}_{N+1}$  とすることにより, 式 (12) は,

$$\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \cdots & -a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \cdots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{Nj} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \ddot{\hat{r}}_{e1} \\ \ddot{\hat{r}}_{e2} \\ \vdots \\ \ddot{\hat{r}}_{eN} \end{bmatrix}$$

$$= -k_2 \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \cdots & -a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \cdots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{Nj} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_{e1} \\ \dot{\hat{r}}_{e2} \\ \vdots \\ \dot{\hat{r}}_{eN} \end{bmatrix} \\ -k_1 \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \cdots & -a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \cdots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{Nj} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \hat{r}_{e1} \\ \hat{r}_{e2} \\ \vdots \\ \hat{r}_{eN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$\tilde{\mathcal{L}} = [\tilde{l}_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $\tilde{l}_{ij} = -a_{ij}$ ,  $\tilde{l}_{ii} = \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}$  と  $\hat{r}_e = [\hat{r}_{e1}^T \hat{r}_{e2}^T \cdots \hat{r}_{eN}^T]^T$  より式 (13) は

$$(\tilde{\mathcal{L}} \otimes I_2) \ddot{\hat{r}}_e = -k_2(\tilde{\mathcal{L}} \otimes I_2) \dot{\hat{r}}_e - k_1(\tilde{\mathcal{L}} \otimes I_2) \hat{r}_e \quad (14)$$

ここで,  $\tilde{\mathcal{L}}$  について考える. エージェント間のネットワークが連結なので,  $x_i \in \mathbb{R}^2$  とした  $x = [x_1^T, \cdots, x_N^T]^T$  と  $N$  体のエージェント間のみのグラフラプラシアン  $\mathcal{L}_N$  において,  $x^T(\mathcal{L}_N \otimes I_2)x = 0$  となる必要十分条件は  $x_i = x_j$  である. また, 少なくとも 1 体のエージェントが対象物の情報を得られるので, 少なくとも一つの  $a_{i(N+1)} = 1$  である. したがって,  $x^T(\tilde{\mathcal{L}} \otimes I_2)x = x^T(\mathcal{L}_N \otimes I_2)x + \sum_{i=1}^N a_{i(N+1)} x_i^T x_i \geq 0$  であり,  $x^T(\tilde{\mathcal{L}} \otimes I_2)x = 0$  の必要十分条件は  $x = 0$  である. よって,  $\tilde{\mathcal{L}}$  は正定である.  $\tilde{\mathcal{L}} > 0$  なので,

$$\ddot{\hat{r}}_e = -k_2 \dot{\hat{r}}_e - k_1 \hat{r}_e \quad (15)$$

$k_1, k_2 > 0$  より, ネットワークに依存せず,  $t \rightarrow \infty$  で  $\hat{r}_e \rightarrow 0$  となる. よって,  $r_i \rightarrow r_t + R_i$  となり, 各エージェントは目標位置に収束する.

#### 4 シミュレーション検証

$N = 4$  体のエージェントを用いてシミュレーションを行った. ステップサイズは  $0.1[s]$  としている. シミュレーションに用いたパラメータを Table 1 にまとめる. 各エージェントの目標位置  $R_i$  は, 対象物を中心とした距離  $\xi$  の位置に配置されるように

$$R_i = \xi \left[ \cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{n}\right) \quad \sin\left(\frac{2\pi(i-1)}{n}\right) \right]^T \quad (16)$$

とし, 隣り合うエージェントの重心位置間の距離が全て等しくなるように設定した. また, 取り囲み半径  $\xi$  はエージェントと対象物が接触するように  $\xi = 0.585[m]$  とした. なお, エージェントおよび対象物の初速度は  $0[m/s]$  とする.

結果を Fig. 4~6 に示す. Fig. 4 はエージェントと対象物の軌跡を表しており, 黒がエージェント, 赤が対象物である. Fig. 5 は対象物周辺を拡大したものであり, Fig. 6 は各エージェントの取り囲みにおける目標位置との誤差を表している. Fig. 6 から目標位置との

Table 1: Simulation parameter

mass of agent $m_i$ [kg]	1
mass of target $m_t$ [kg]	3
radius of agent $l_i$ [m]	0.085
radius of target $l_t$ [m]	0.5
Coefficient of restitution $e$	0.8
$k_1$	3
$k_2$	3
Sensor range $\rho$ [m]	3

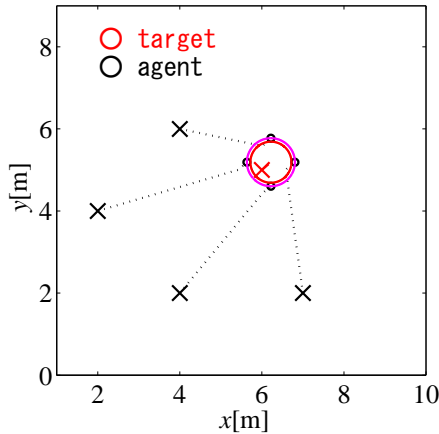


Fig. 4: Trajectory

誤差が 0 に収束し、制御目的 (7) を達成していることが確認できる。また、Fig. 4, 5 より対象物がエージェントから力を受けて動いているが、取り囲みが行われているのが分かる。したがって、エージェントと対象物の間で力のやり取りがある場合でも取り囲みを達成することができるといえる。

## 5 おわりに

本研究では、対象物との物理的な接触を考慮したマルチエージェントシステムによる協調取り囲み手法を提案した。対象物からの反力の影響を考慮するためにモデルを 2 次系にし、エージェント間のネットワークは時変・連結であり、少なくとも 1 台のエージェントは対象物を認識することができるとした。合意アルゴリズムおよびグラフ理論を用いた制御則を提案し、提案手法を用いた場合における収束性の証明を行い、取り囲みが漸近的に達成されることを示した。最後に、提案した手法のシミュレーションを行い有効性を検証した。

今後の課題として、対象物を目標位置へと運ぶ運搬行動への発展が挙げられる。また、対象物と接触した時に加える力の制御なども行えるようになっていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 滑川 徹：マルチエージェントシステムの合意問題と協調取り囲み，システム/制御/情報，53-10，443/448 (2009)
- 2) 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，44-8，663/669 (2008)

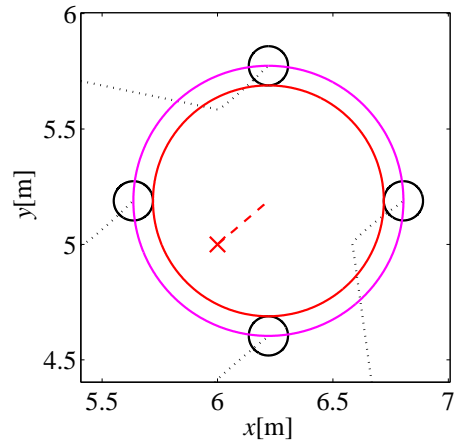


Fig. 5: Around the target object

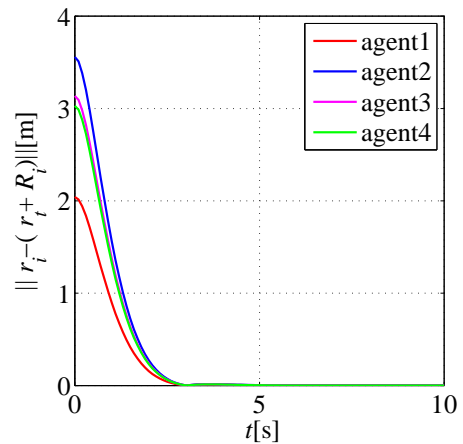


Fig. 6: Position error

- 3) R. Olfati-Saber, J. A. Fax, R. M. Murray : Consensus and cooperation in multi-agent networked systems , *Proceedings of the IEEE*, 95-1, 215/233 (2007)
- 4) P. V. Teixeira, D. V. Dimarogonas, K. H. Johansson and J. Sousa, : Multi-Agent Coordination with Event-based Communication , *Proc. of American Control Conference*, 824/829 (2010)
- 5) W. Yu, G. Chen, W. Ren, J. Kurths and W. X. Zheng : Distributed Higher Order Consensus Protocols in Multiagent Dynamical Systems , *IEEE Trans. on Circuits Syst. I*, Reg. Papers, 58-8, 1924/1932 (2011)
- 6) T. H. Kim, S. Hara and Y. Hori : Cooperative control of multi-agent dynamical systems in target-enclosing operations using cyclic pursuit strategy , *Int. J. Control*, 83-10, 2040/2052 (2010)
- 7) R. Sharma, M. Kothari, C. N. Taylor and I. Postlethwaite : Cooperative Target-Capturing with Inaccurate Target Information , *Proc. of American Control Conference*, 5520/5525, (2010)
- 8) J. Guo, G. Yan and Z. Lin : Cooperative Control Synthesis for Moving-Target-Enclosing with Changing Topologies , *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation* , 1468/1473 (2010)
- 9) 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 45-12，688/695 (2009)