

ネットワーク構造に依存しないマルチビークルシステムによる 物体協調把持

石村晃士 滑川徹 (慶應義塾大学)

Cooperative Grasping by Vehicle Swarms with Dynamic Network Topology

*K. Ishimura and T. Namerikawa (Keio Univ.)

Abstract— This paper deals with cooperative grasping by vehicle swarms with dynamic network topology. First, we introduce a dynamic network topology that depends on relative distance between the vehicles. Secondly, we propose a novel grasping strategy based on consensus seeking with dynamic network topology. The proposed strategy needs at least one vehicle which can acquire the information of the target-object and network topology among vehicles is time-varying but always connected. To analyze the convergence of grasping with dynamic network topology, algebraic graph theory and matrix theory are utilized. Finally, numerical simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key Words: Multi-vehicle Systems, Cooperative Grasping, Second Order Model, Dynamic Network-Topology

1 はじめに

近年, マルチビークルシステムのように複数台のエージェントを協調させることによって単体では実行できないタスクを達成させる研究が数多く行われている。マルチビークルシステムとは, 情報交換可能な複数台の車両で構成されたシステムであり, システムの規模の大きさや情報交換を活かし, 合意問題などの分野で応用されている。このシステムのメリットとしては, ビークル間の情報交換を用いた協調行動により与えられたタスクを短時間でより効率的に達成できる事, 非常に高価で高性能な単体のビークルを作成するより安価な複数のビークルを作る方が低コストで柔軟性のあるシステムを作ることができるということが考えられる。さらに一台のビークルが故障などにより機能しなくなっても全体としてタスクを達成することができるため, 耐故障性が優れているというメリットも有している。実際の応用例としては, 協調行動を活かした自然界に見られる群れ行動や無人戦闘機のフォーメーション制御等が考えられる。本研究では応用例の中でも特に物体の取囲みや把持に焦点を当てている。

取囲みや把持に関する文献には以下のようなものがある。小林ら¹⁾は, 群ロボットによる対象物の協調捕獲問題について考えており, ビークル間の通信無しでの局所的な観測のみから全体としてのタスクを達成している。そのために極座標系の利用, force-closure の概念に基づいた局所評価関数の導入, 未知形状対象物の局所的な形状推定を取り入れ, 取囲みと把持を行っている。文献²⁾では障害物が存在する環境でのビークル群による対象物の取囲み・運搬を行っており, 同時に衝突回避も達成している。その際に, object-closure の概念を用いることで, 局所的な情報のみで取囲みの判定を可能としている。このためビークル間での情報交換をほぼ行うことなくタスクを達成できる。ただし常に全てのビークルが対象物の位置を認識している必要がある。櫻井らは文献⁴⁾において, ある戦略をとって逃げるターゲットを複数のエージェントが協調的に捕獲する際の捕獲可能条件について述べている。ターゲット

とエージェントのダイナミクスを考慮し, ただし, エージェント間の情報交換については考慮されていない。また,⁵⁾では移動する対象物に対する取囲みを達成するために Dynamic Object Closure の概念を設け, 取囲みを達成していない状態から一定時間後の捕獲行動の達成を保証している。⁶⁾では object closure を用いた対象物の取囲みと運搬について述べている。⁷⁾では, ターゲットの情報が一部しかわからない状況での取囲み行動について述べている。エージェントのモデルとしては無人飛行機を用い, 逃げ回る対象物を取囲んだ後の目的地への誘導やターゲットの動きを制限し捕獲し続ける事を可能としている。文献⁸⁾では対象物に対する環状の協調分散取囲みに関する安定解析手法を提案している。⁹⁾ではビークル間のネットワーク構造が変化する状況での移動対象物に対する取囲み行動を取り扱っている。ビークル群に対する制御則はターゲットとの距離誤差を埋める項と取囲みの際のフォーメーションを行う項の二つで構成され, その収束性の証明を行っている。文献¹⁰⁾では, 少なくとも一台のビークルが対象物を認識し, ビークル間のネットワークが連結であればネットワークの変化に依存せず対象物の取囲みを達成する制御則を提案している。

本論文では文献¹⁰⁾を土台として, マルチビークルシステムを用いた協調把持行動を行っている。ビークルのモデルとして二次系を選び, 物体を把持する際にビークルに加わる反力を扱うことができるようになっている。提案する制御則にはグラフ理論を取り入れることでビークル間の情報交換を表現し, 協調的な行動を可能としている。そして少なくとも一台のビークルが対象物を認識し, ビークル間のネットワークが連結であれば, ビークル群はそれらのネットワーク構造に関係なく把持行動を達成することが可能となっている。

本稿の流れは以下のようになっている。まずはじめに問題設定としてビークルのモデル, ネットワーク構造, 制御目的を述べる。次に, 合意アルゴリズムを元にした制御則を示し, 制御則に関する定理の証明を行う。最後に, シミュレーションによる有効性の検証を行っている。

2 問題設定

2.1 ビークルのモデル

まずビークルのモデルに関して述べる. 本稿では, 各エージェントを粒子とみなした N 個の質点系とし, 次の運動方程式で表されるマルチエージェントシステムビークルのモデルとしては式 (1) のような二次系のモデルを用いる.

$$\begin{aligned} \dot{r}_i(t) &= v_i(t), & r_i(t) &= r_{i0}, & t &\geq 0 \\ \dot{v}_i(t) &= u_i(t), & v_i(t) &= v_{i0} \end{aligned} \quad (1)$$

を考える. ここで $i = 1, \dots, N$, $r_i \in \mathbb{R}^2$, $v_i \in \mathbb{R}^2$, $u_i \in \mathbb{R}^2$ はそれぞれ i 番目のビークルの重心位置, 速度, 制御入力を表している. 本稿ではビークル群を用いて物体把持を行っているため, ビークル群が物体に接触する際に受ける反力を扱う必要がある. そのためにビークルのモデルとして二次系を用いている. また, ビークルは円形としその半径を l_i とする. 質量は全ビークルで同じとし, m_i としている. Fig.1 にビークルと対象物のモデルを示す.

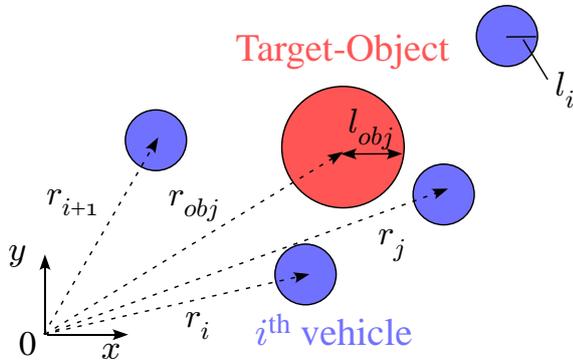


Fig. 1: ビークル, 対象物のモデル

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.

$$\mathcal{N}(t) = \{j \mid \|r_{ij}(t)\| \leq \rho\} \subseteq \{1, \dots, N\} \quad (2)$$

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.

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ど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.

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.

$$a_{ij} = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \|r_i - r_j\| \leq \rho \quad (j \in N) \\ 0, & \|r_i - r_j\| > \rho \quad (j \notin N) \end{cases} \quad (4)$$

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.

$$\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A} \quad (5)$$

上記のように定義されたグラフラプラシアンには以下のような性質があることが一般的に知られている.

(1) 無向グラフの場合, 以下の SOS 特性を満たす.

$$x^T \mathcal{L} x = \frac{1}{2} \sum_i \sum_j a_{ij} (x_i - x_j)^2 \quad (6)$$

ここで, $x = [x_1 \dots x_N]^T \in \mathbb{R}^N$ となるベクトルである.

(2) 零固有値を有し, $\mathcal{L} \mathbf{1} = 0$ が成り立つ. (ただし, $\mathbf{1} = [1 \dots 1] \in \mathbb{R}^N$)

(3) 連結グラフの場合, 唯一零固有値を有し, 準正定行列となる.

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. また, ビークル・対象物間におけるグラフ構造に関して以下の仮定を設ける.

仮定 1 ビークル間のネットワークは常に連結であり, 最低でも一台が対象物の位置を認識しているとする.

2.3 制御目的

次に把持の定義について述べる. 本稿における把持を以下のように定義する.

定義 1 以下の事を同時に達成した状態を把持を達成した状態とする.

- 各ビークルが対象物の重心を中心とする同心円上に等間隔で配置される.
- 各ビークルが対象物に接触し, その際に受ける反力がその目標値と一致する.

以上の定義に基づき, 本稿での制御目的を以下のように設定する.

[制御目的]

- (1) 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.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \| r_i(t) - r_{obj}(t) \| = \xi$$

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

- (2) 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.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \| \phi_{i+1}(t) - \phi_i(t) \| = \frac{2\pi}{N}$$

- (3) 各ビークルに加わる対象物からの反力が全て等しくなり、一定値に収束する.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \| F_{i+1}(t) - F_i(t) \| = F_d$$

ただし, $\|\cdot\|$ はユークリッドノルム, $\xi \in \mathbb{R}_+$ は把持する際の円の半径, $\phi_i = \angle(e_x, r_i - r_{obj}) \in [0, 2\pi)$ 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, F はビークル群で対象物を把持した際に各ビークルに加わる反力, F_d は反力の目標値とする.

上記の把持を達成したときのビークル・物体の様子を Fig.2 に示す.

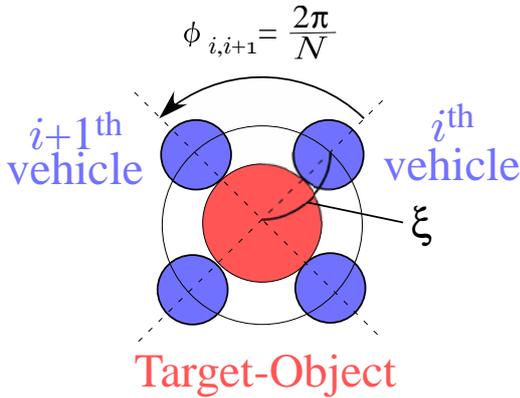


Fig. 2: 把持達成時の様子

さらに対象物に関して以下の仮定を設ける.

仮定 2 対象物は常に静止し、ビークル群からの力を受けても移動しないとす。

3 提案手法

$$u_i = \frac{\kappa_i}{m} \left[\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \left\{ -k_1(\hat{r}_i - \hat{r}_j) - k_2(\dot{\hat{r}}_i - \dot{\hat{r}}_j) + \ddot{\hat{r}}_j - (\hat{F}_i - \hat{F}_j) \right\} \right] \quad (7)$$

$$\kappa_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij}} \quad (8)$$

$$R_i = \xi \left[\cos\left(\frac{2\pi(i-1)}{N}\right) \quad \sin\left(\frac{2\pi(i-1)}{N}\right) \right]^T \quad (9)$$

$$\hat{F}_i = k_e \{(l_i + l_{obj}) - |\hat{r}_i|\} \hat{r}_i + d_e \dot{\hat{r}}_i \quad (10)$$

ここで $\hat{r}_i = r_i - r_{obj} - R_i$, $\hat{r}_{obj} = 0$ とする. 把持の際に発生する反力 F はバネとダンパーによって表しており, k_e , d_e はそれぞればね係数, ダンパー係数を表している. また k_1 と k_2 はゲインである. 式 (7) において対象物は $N+1$ 台目のビークルとして表現されている.

ビークルと対象物の関係を Fig.3 に示す. また, F に関する変数 \hat{F} は F を目標値 F_d へと収束させるための変数である.

$\hat{F}_i - \hat{F}_j$ を計算すると以下ようになる.

$$\hat{F}_i - \hat{F}_j = k_e \{(l_i + l_{obj}) - |\hat{r}_i|\} \hat{r}_i + d_e \dot{\hat{r}}_i - k_e \{(l_j + l_{obj}) - |\hat{r}_j|\} \hat{r}_j - d_e \dot{\hat{r}}_j \quad (11)$$

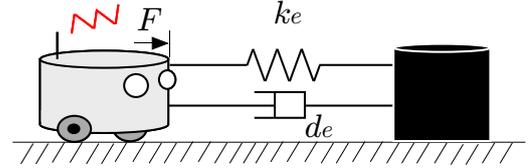


Fig. 3: ビークル・対象物の反力に関するモデル

式 (10) のように R_i を設定することで制御目的 (1) は以下のように考えることができる.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \| r_i(t) - r_{obj}(t) \| = \| R_i \| = \xi$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\hat{r}_i - \hat{r}_{obj}) = \lim_{t \rightarrow \infty} (r_i - R_i - r_{obj}) = 0$$

また制御目的 (2) は

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

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. したがって, 制御目的 (1), (2) は以下のように置き換えることができる.

(1)'

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \| \hat{r}_i(t) - \hat{r}_j(t) \| = 0,$$

for $i, j (i \neq j) = 1 \dots N, N+1 = obj, R_{obj} = 0$.

ここで次の仮定を設ける.

仮定 3 対象物は全てのビークルから等距離の位置に配置する

仮定 4 ビークルの半径 l_i は全てのビークルにおいて同じ長さとする.

仮定 5 $|R_i|$ は全てのビークルにおいて同じとする.

これらの仮定により $(l_i + l_{obj}) - |\hat{r}_i| = (l_j + l_{obj}) - |\hat{r}_j|$ が成り立ち, 式 (11) は次のように変形できる.

$$\hat{F}_i - \hat{F}_j = k_e \{(l_i + l_{obj}) - |\hat{r}_i|\} (\hat{r}_i - \hat{r}_j) + d_e (\dot{\hat{r}}_i - \dot{\hat{r}}_j) \quad (13)$$

制御則 (7)-(10) に対して次の定理が成り立つ。

定理 1 $N \geq 1$ 台のビークル (1) と対象物を考え、各ビークルに対して制御則 (7)-(10) を与える。このとき各ビークルは目標とする取囲み位置に収束し、目標とする力による対象物への把持を達成する。

Proof: i 台目のビークルのモデル (1) に対して式 (7)-(10) を代入すると以下のようになる。

$$\ddot{\hat{r}}_i = \frac{k_i}{m} \left[\sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \left\{ -k_1(\hat{r}_i - \hat{r}_j) - k_2(\dot{\hat{r}}_i - \dot{\hat{r}}_j) + \ddot{\hat{r}}_j - (\hat{F}_i - \hat{F}_j) \right\} \right] \quad (14)$$

上式を变形することによって以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} m \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} (\ddot{\hat{r}}_i - \ddot{\hat{r}}_j) \\ = \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \{ -k_1 k_e \{ (l_i + l_{obj}) - |\hat{x}_i| \} (\hat{r}_i - \hat{r}_j) \\ - k_2 d_e (\dot{\hat{r}}_i - \dot{\hat{r}}_j) \} \end{aligned} \quad (15)$$

ここで $k_1 k_e \{ (l_i + l_{obj}) - |\hat{x}_i| \} (\hat{r}_i - \hat{r}_j)$ をまとめて k' とする。このとき式 (15) をシステム全体 ($i = 1, \dots, N+1$) で表現すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} m \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \dots & \dots & -a_{N(N+1)} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \ddot{\hat{r}}_1 \\ \ddot{\hat{r}}_2 \\ \vdots \\ \ddot{\hat{r}}_{N+1} \end{bmatrix} \\ = -k' \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \dots & \dots & -a_{N(N+1)} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_1 \\ \dot{\hat{r}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\hat{r}}_{N+1} \end{bmatrix} \\ -k_2 d_e \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & -a_{1(N+1)} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & -a_{2(N+1)} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \dots & \dots & -a_{N(N+1)} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_1 \\ \dot{\hat{r}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\hat{r}}_{N+1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

グラフラプラシアンを用いると上式は以下のように表すことができる。

$$(\mathcal{L} \otimes I_2) \ddot{\hat{r}} = -k' (\mathcal{L} \otimes I_2) \hat{r} - k_2 d_e (\mathcal{L} \otimes I_2) \dot{\hat{r}} \quad (16)$$

ここで \mathcal{L} はグラフラプラシアン、 \otimes はクロネッカ積を表す。

このとき $\hat{r}_{e_i} = \hat{r}_i - \hat{r}_{N+1}$ とすることで上式を次のように書きかえることができる。

$$\begin{aligned} m \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & -a_{2N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \dots & -a_{N(N-1)} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \ddot{\hat{r}}_{e1} \\ \ddot{\hat{r}}_{e2} \\ \vdots \\ \ddot{\hat{r}}_{eN} \end{bmatrix} \\ = -k' \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & -a_{2N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \dots & -a_{N(N-1)} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_{e1} \\ \dot{\hat{r}}_{e2} \\ \vdots \\ \dot{\hat{r}}_{eN} \end{bmatrix} \\ -k_2 d_e \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & -a_{2N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \dots & -a_{N(N-1)} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} \end{bmatrix} \otimes I_2 \begin{bmatrix} \dot{\hat{r}}_{e1} \\ \dot{\hat{r}}_{e2} \\ \vdots \\ \dot{\hat{r}}_{eN} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

上式はベクトル $\hat{r}_e = [(\hat{r}_1 - \hat{r}_{N+1})^T \dots (\hat{r}_N - \hat{r}_{N+1})^T]^T \in \mathbb{R}^{2N}$ とグラフ構造を表す新たな行列 \mathcal{M} を用いることで以下のように表現できる。

$$(\mathcal{M} \otimes I_2) \ddot{\hat{r}}_e = -k' (\mathcal{M} \otimes I_2) \dot{\hat{r}}_e - k_2 d_e (\mathcal{M} \otimes I_2) \dot{\hat{r}}_e \quad (17)$$

ここで \mathcal{M} が正則行列であることを示すために \mathcal{M} が正定行列であることを示す。そのために任意の非零ベクトル $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N] \in \mathbb{R}^N$ を用いて $x^T \mathcal{M} x$ の計算を行う。

$$\begin{aligned} x^T \mathcal{M} x = \\ \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & -a_{2N} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & \dots & -a_{N(N-1)} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \end{aligned}$$

上式は以下のように展開できる。

$$\begin{aligned} &= (a_{1N+1} x_1^2 + a_{2N+1} x_2^2 + \dots + a_{NN+1} x_N^2) \\ &+ \sum_{j=1}^N a_{1j} x_1^2 + \sum_{j=1}^N a_{2j} x_2^2 + \dots + \sum_{j=1}^N a_{Nj} x_N^2 \\ &- a_{21} x_1 x_2 - a_{31} x_1 x_3 - \dots - a_{N1} x_1 x_N \\ &- a_{12} x_1 x_2 - a_{32} x_2 x_3 - \dots - a_{N1} x_2 x_N \\ &- \dots - a_{1N} x_1 x_N - a_{2N} x_2 x_N - a_{3N} x_3 x_N - \dots \end{aligned}$$

グラフ構造は連結であるため $a_{ij} = a_{ji}$ となり、上式は以下のようにまとめることができる。

$$x^T \mathcal{M} x = \sum_{l=1}^N a_{lN+1} x_l^2 + \sum_{j=1}^N a_{ij} (x_i - x_j)^2 \quad (18)$$

ここで少なくとも一台のビークルが対象物を認識していればいずれかのビークルで $a_{iN+1} = 1$ となるため

$$\sum_{l=1}^N a_{lN+1} x_l^2 > 0, \quad x_l \neq 0 \quad (19)$$

が成り立つ。さらにグラフラプラシアンの性質から

$$\sum_{j=1}^N a_{ij}(x_i - x_j) = x^T \mathcal{L}x \geq 0 \quad (20)$$

となる。グラフラプラシアン \mathcal{L} の固有値が 0 になるのは、固有ベクトルが $\mathbf{1} = [1 \ 1 \dots 1]^T$ に線形従属となる場合のみである。このとき、第一項は必ず正となり、第一項が零となるときは第二項は常に正となるため

$$x^T \mathcal{M}x = \sum_{l=1}^N a_{lN+1}x_l^2 + \sum_{j=1}^N a_{ij}(x_i - x_j)^2 > 0 \quad (21)$$

が成り立つことが分かる。これより \mathcal{M} はどのようなサイズであっても正定行列であり、その正則性が保たれることが分かる。よって $(\mathcal{M} \otimes I_2)^{-1}$ が存在することが分かり、これを式 (17) の両辺に左側から掛けることで以下が成り立つ。

$$m\ddot{\hat{r}}_e = -k'\hat{r}_e - k_2d_e\dot{\hat{r}}_e \quad (22)$$

ここで式 (22) に関するリアプノフ関数として次の式を設ける。

$$V = \frac{1}{2} \{ \dot{\hat{r}}_e^T \dot{\hat{r}}_e + (k_1 + k_e k_l) \hat{r}_e^T \hat{r}_e \} \quad (23)$$

ここでリアプノフ関数 V は $r_e \neq 0$ のとき明らかに正定である。さらにリアプノフ関数の時間微分は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\hat{r}}_e^T \ddot{\hat{r}}_e + \frac{k_1 + k_e k_l}{m} \dot{\hat{r}}_e^T \dot{\hat{r}}_e \\ &= \dot{\hat{r}}_e^T \left\{ \frac{1}{m} (-k'\hat{r}_e - k_2d_e\dot{\hat{r}}_e) \right\} + \frac{k_1 + k_e k_l}{m} \dot{\hat{r}}_e^T \dot{\hat{r}}_e \\ &= \left\{ \frac{1}{m} (-k'\dot{\hat{r}}_e^T \hat{r}_e - k_2d_e\dot{\hat{r}}_e^T \dot{\hat{r}}_e) \right\} + \frac{k_1 + k_e k_l}{m} \dot{\hat{r}}_e^T \dot{\hat{r}}_e \\ &= -\frac{k_2d_e}{m} \dot{\hat{r}}_e^T \dot{\hat{r}}_e < 0, \quad r_e \neq 0 \end{aligned} \quad (24)$$

よってリアプノフの定理より式 (22) において r_e は漸近的に 0 に収束し、さらにその収束性がゲインにのみ依存し、ネットワークの構造には依存していないことが分かる。したがって

$$\hat{r}_e \rightarrow 0 \text{ as } t \rightarrow \infty, \hat{r} \rightarrow \mathbf{1} \otimes \hat{r}_{N+1} \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (25)$$

$$\hat{r} \rightarrow \mathbf{1} \otimes \hat{r}_{obj} \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (26)$$

が成り立つ。ここで $\mathbf{1} = [1 \dots 1]^T$ とする。よってネットワークの変化に依存せず、制御目的を達成することが出来る。

4 シミュレーション検証

本稿では、ビークル間のネットワーク構造を (1) 完全グラフにした場合 (Case 1)、(2) 一部のビークル間のネットワークが途中で途切れる場合 (Case 2) の二つの条件でシミュレーションを行い、有効性の検証を確認した。

4.1 Case1

Case1 では、ネットワーク構造を完全グラフとしターゲットへの把持を行った。また、パラメータは $N = 4, k_1 = k_2 = 1, d_e = 1, k_e = 1$ とした。そのシミュレーション結果を Fig.4 から Fig.6 に示す。Fig.4 では各ビークルのトラジェクトリ、Fig.5 では各ビークルの位置の推移、Fig.6 では各ビークルに加わる反力の大きさの推移を示している。これらの結果からビークルの位置、加わる反力の値が一定値に収束し、把持を達成している事が分かる。

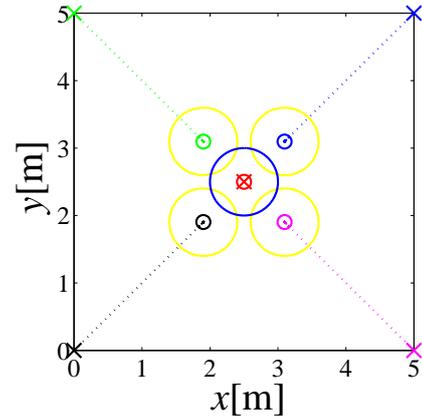


Fig. 4: トラジェクトリ

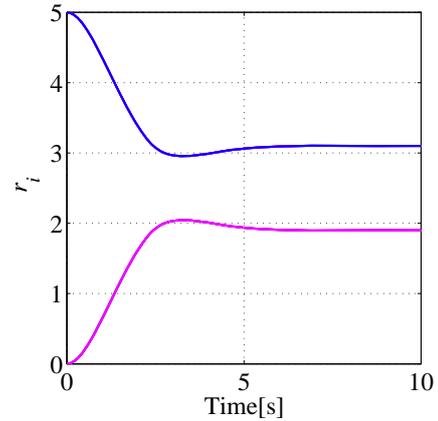


Fig. 5: ビークル i の位置

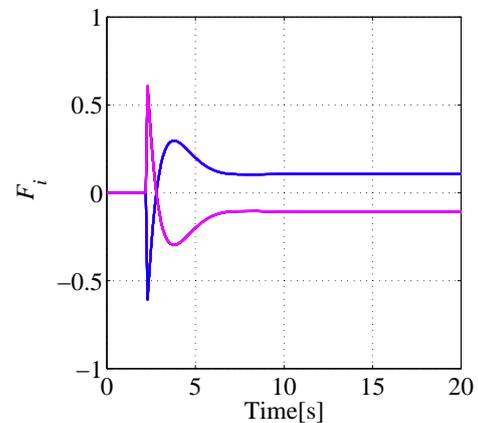


Fig. 6: ビークル i に加わる反力

4.2 Case2

Case2では、Case1と初期位置を変化させ、シミュレーション開始時にはネットワークを完全グラフとした。グラフ内のピークルを表している緑、青、黒、紫を順にピークル1, 2, 3, 4とし、シミュレーション開始2[s]後にピークル1, 2間とピークル3, 4間のネットワークを切るという条件でシミュレーションを行った。パラメータはCase1と同じとした。シミュレーション結果をFig.7からFig.9に示す。この結果から、ネットワーク構造が途中で変化した場合でも把持を達成できることが確認できる。

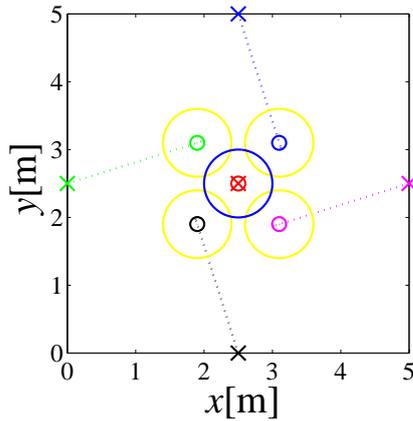


Fig. 7: トラジェクトリ

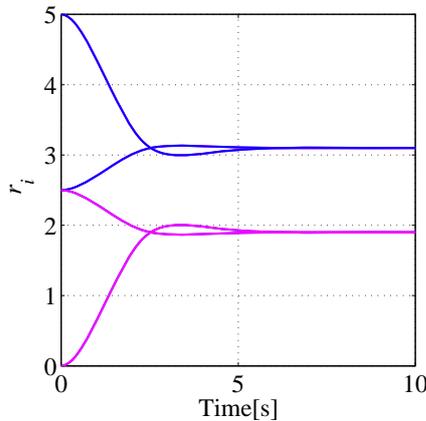


Fig. 8: ピークル i の位置

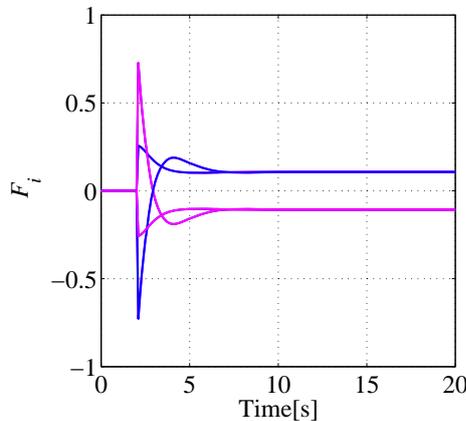


Fig. 9: ピークル i に加わる反力

5 おわりに

本稿では、文献¹⁰⁾で提案されている制御側を元に物体に対する協調的な把持が達成する制御則を提案した。そして、ピークル間のネットワークが連結であり、少なくとも一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は把持が達成されることを示した。

シミュレーションでは、完全グラフとそうでない場合の二つのケースで提案制御則の有効性の確認を行った。

今後は対象物の把持だけでなく、把持した状態からゴールまで運搬することを目指し発展させようと考えている。

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 Vol.43, No.8, pp.663-671, 2007.
- 2) J. Fink, M. Ani Hsieh, and V. Kumar "Multi-Robot Manipulation via caging in Environments with Obstacles," 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation May 19-23, 1471-1476, 2008.
- 3) 早川朋久, 藤田政之, "マルチエージェントシステムとピークルフォーメーション", 計測と制御 Vol.46, No.11, pp.823-828, 2007.
- 4) 櫻井慶一, 津村幸治, 金泰亨, "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.
- 5) Z. Wang, H. Matsumoto, Y. Hirata and K. Kosuge "A Path Planning Method for Dynamic Object Closure by Using Random Caging Formation Testing" The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems pp.5923 - 5929, 2009.
- 6) Z. Wang and V. Kumar "Object Closure and Manipulation by Multiple Cooperating Mobile Robots" *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* pp.394 - 399, 2002.
- 7) R. Sharma, M. Kothari, C. N. Taylor and I. Postlethwaite "Cooperative Target-capturing with Inaccurate Target Information" 2010 American Control Conference pp.5520-5525, 2010.
- 8) T. Kim, S. Hara and Y. Hori "Cooperative control of multi-agent dynamical systems in target-enclosing operations using cyclic pursuit strateg" *International Journal of Control* Vol. 83, No. 10, pp.2040 - 2052, 2010.
- 9) J. Guo, G. Yan and Z. Lin, "Cooperative Control Synthesis for Moving-Target-Enclosing with Changing Topologies" 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District May 3-8, pp.1468-1473, 2010.
- 10) 川上裕樹, 滑川徹, "ピ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 Vol.45, No.12, pp.688-695, 2009.