

Inverse Kinematics を用いた ビークル群による対象物の協調取り囲み行動

Inverse Kinematics based Cooperative Target-enclosing Behavior for Swarms of Vehicles

上坂 洋介 (金沢大学), 正 滑川 徹 (慶応義塾大学)

Yosuke UESAKA, Kanazawa University, Kakumamachi, Kanazawa, Ishikawa, 920-1192
Toru NAMERIKAWA, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Yokohama, Kanagawa, 223-8521

Abstract: This paper deals with cooperative Target-enclosing problem by swarms of vehicles. First, we introduce Closed-Loop Inverse Kinematics (CLIK) which is utilized for control law. Second, we define two control objectives. One is to enclose a target in regular polygon and the other is to close up the traveling direction of a moving target. To achieve control objectives, we design several tasks and they are connected by Null-Space-based Behavioral (NSB) control. Then, we analyze the convergence of Target-enclosing behavior by Lyapunov Stability Theorem. Finally, simulation and experimental results show our effectiveness of the proposed method.

Key Words: Swarms of Vehicles, Inverse Kinematics, Target-enclosing behavior, NSB control

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、ビークル群を協調させて動作させる研究が盛んに行われており、文献^(1,2)で最近の動向などが詳しく報告されている。ビークル群の協調制御に関する研究は、とても広く、制御に限らず様々な分野で行われている。このように、ビークル群の協調制御が盛んに研究される大きな理由として、システム全体の高機能化と適応性の向上が挙げられる。通常、単体のビークルよりも、複数のビークルが協調して行動したほうが、与えられたタスクをより短時間で、より効率良く達成することができ、また、単体のビークルでは達成不可能なタスクも達成できる場合がある。さらに、あるビークルが故障などにより機能しなくなっても、システム全体としてタスクを達成することができるため、耐故障性に優れているという利点を有している。これらの利点から、応用例としては、人間が立ち入ることが困難で危険な場所の探索、人工衛星のフォーメーション制御、建物内などの警備システムなど多岐にわたる。本稿では特に、ビークル群の協調制御による対象物の取り囲み行動に関して焦点を絞り議論する。

対象物の取り囲みに関する従来研究としては文献^(3,4,5,6,7)が挙げられる。文献⁽³⁾では、非ホロノミック拘束を有する二輪ビークルに対して、時変の制御入力を与えて、車軸方向への移動を可能にし、取り囲みを行っている。しかし、移動する対象物に対しての取り囲みが保証されていない点や、取り囲みを達成した後も、時変の制御入力の影響によりビークルが動いてしまうという問題点が挙げられる。

文献⁽⁴⁾では、対象物座標系を極座標として捉えて、接近と取り囲みのプロセスを独立に考えている。取り囲みの際には、あるビークルは隣接する2台のビークルの情報を用いてビークル間の間隔を制御している。一方文献⁽⁵⁾では、文献⁽⁴⁾と同じアプローチだが、あるビークルが取得する情報は隣接する1台のビークルのみである。さらに、三次元空間中に存在しているビークルによる取り囲みの有効性も示している。

文献⁽⁶⁾では、合意アルゴリズムの概念を用いており、少なくとも1台のビークルが対象物の情報を取得できれば取り囲みを達成することができることを示している。さらに、ビークルが対象物の情報を取得する際に、センサ雑音等による性能劣化問題に対して Consensus Filter を導入し、各ビークルによって取得した対象物の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っている。しかし、対象物の姿勢角に対してビークルの配置される位置が固定される問題点が挙げられる。

一方、文献⁽⁷⁾では、Inverse Kinematics を導入し、制御則に Closed-Loop Inverse Kinematics (CLIK) を適用している。取り囲みを達成するために、ビークル群の振る舞いを決定するタスクを複数設計し、Null-Space-based Behavioral (NSB) 制御を用いて設計したタスクを結合している。さらに、取り囲み問題の収束性解析を文献⁽⁸⁾にて行っている。しかし、レギュレーション問題のみを扱っており、取り囲みの達成の証明が不十分である。

そこで本稿では、Inverse Kinematics を導入し、取り囲みを達成するために新規のタスクを提案し、取り囲みの達成の証明を行う。その際、ビークル群が対象物を中心とした正多角形を形成するように配置する場合と、移動する対象物の進行方向を塞ぐように配置する場合の二通りを達成するタスクをそれぞれ設計する。そして、NSB 制御を用いて設計したタスクを結合した制御則を適用する。さらに、取り囲み問題の収束性解析を追従問題として扱い、取り囲みが漸近的に達成されることを示す。最後に、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。

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。

$$\dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{v}_{di}, \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{p} = [x_i \ y_i]^T \in \mathbb{R}^2$ は i 番目のビークルの重心位置、 $\mathbf{v}_{di} \in \mathbb{R}^2$ は i 番目のビークルに与えられる制御入力を表す。また、 N 台のビークルの位置 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^{2N}$ および制御入力 $\mathbf{v}_d \in \mathbb{R}^{2N}$ は次式で表わされる。

$$\mathbf{p} = [\mathbf{p}_1^T \ \dots \ \mathbf{p}_N^T]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_d = [\mathbf{v}_{d1}^T \ \dots \ \mathbf{v}_{dN}^T]^T \quad (3)$$

広く一般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できることが知られている⁽⁹⁾。

次に、取り囲む対象物は以下のようなダイナミクスを有するものとする。

$$\dot{\mathbf{p}}_{obj} = \mathbf{f}(t, \mathbf{p}_{obj}) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{obj} = [x_{obj} \ y_{obj}]^T \in \mathbb{R}^2$ は対象物の重心位置を表す。

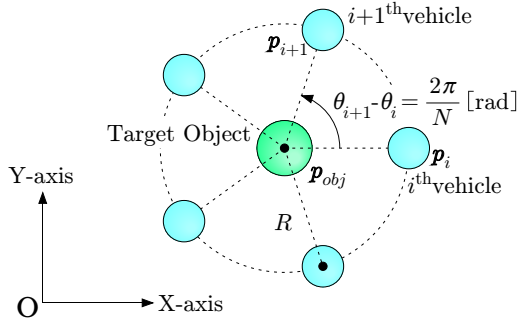


Fig. 1 Enclosing in regular polygon (Case 1)

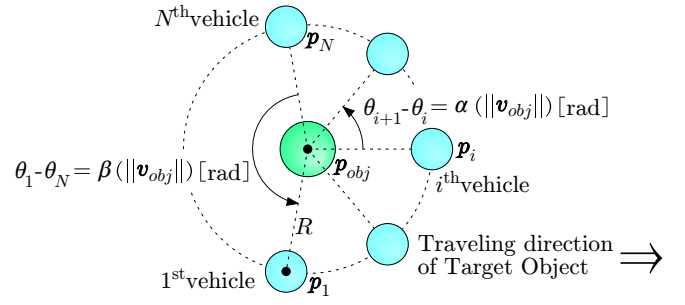


Fig. 2 Closing up of traveling direction (Case 2)

2-2. Inverse Kinematics 本稿では、移動する対象物を取り囲むために Inverse Kinematics を導入する。まず、ビークルの位置に依存する変数 (以降、タスクと呼ぶ) を以下のように定義する。

$$\sigma_T = f_T(p_1, \dots, p_N) = f_T(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^{m_T} \quad (5)$$

ここで、添え字 T は次節で述べるタスクの種類を表す。ビークルがどのような振る舞いをするかはタスクの設計によって異なるため、目的に応じてタスクを設計する必要がある。式 (5) のタスクを時間微分すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_T &= \frac{\partial f_T(\mathbf{p})}{\partial t} = \frac{\partial f_T(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} \frac{d\mathbf{p}}{dt} \\ &= \mathbf{J}_T(\mathbf{p}) \mathbf{v}_T \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{J}_T(\mathbf{p}) \in \mathbb{R}^{m_T \times 2N}$ はタスクのヤコビ行列、 $\mathbf{v}_T \in \mathbb{R}^{2N}$ はタスク速度を表す。式 (6) からタスク速度を得るためには、ヤコビ行列の逆行列を求める必要がある。しかし、通常 $m_T \leq N$ となるようなタスクを設計するため、ヤコビ行列は非正方行列となり逆行列が存在しない。そこで、ヤコビ行列が次の仮定 1 を満たす場合、次式で得られる擬似逆行列 $\mathbf{J}_T^\dagger \in \mathbb{R}^{2N \times m_T}$ が存在する。

仮定 1 ヤコビ行列 \mathbf{J}_T は行フルランクである。

$$\mathbf{J}_T^\dagger = \mathbf{J}_T^T (\mathbf{J}_T \mathbf{J}_T^T)^{-1} \quad (7)$$

上式からわかるように、仮定 1 は $\mathbf{J}_T \mathbf{J}_T^T$ の逆行列が存在するための条件である。この擬似逆行列を用いてタスク速度は次式となる。

$$\mathbf{v}_T = \mathbf{J}_T^\dagger \dot{\sigma}_T \quad (8)$$

次に、タスク σ_T の目標値を $\sigma_{Td} \in \mathbb{R}^{m_T}$ 、目標値との偏差を $\tilde{\sigma}_T = \sigma_{Td} - \sigma_T$ と定義する。また、ゲイン $\Lambda_T \in \mathbb{R}^{m_T \times m_T}$ を正定対角な行列とすると、タスクが達成されるためのタスク速度は次式で表わされる。

$$\mathbf{v}_{Td} = \mathbf{J}_T^\dagger (\dot{\sigma}_{Td} + \Lambda_T \tilde{\sigma}_T) \quad (9)$$

上式を Closed-Loop Inverse Kinematics (CLIK) と呼ぶ。

2-3. 制御目的 本稿の制御目的を以下のように二つの場合 (Case 1, Case 2) に分けて設定する。

● 制御目的 1 (Case 1)

1.a i 番目のビークルは対象物の重心位置から距離 R の位置に配置される。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{obj}\| = R, \quad i = 1, \dots, N$$

1.b 対象物を中心とした隣り合うビークル間の偏角の差 $(\theta_{i+1} - \theta_i)$ [rad] が全て $\frac{2\pi}{N}$ [rad] となる。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_{i+1} - \theta_i) = \frac{2\pi}{N} \text{ [rad]}, \quad i = 1, \dots, N$$

● 制御目的 2 (Case 2)

2.a i 番目のビークルは対象物の重心位置から距離 R の位置に配置される。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{obj}\| = R, \quad i = 1, \dots, N$$

2.b 対象物を中心とした隣り合うビークル間の偏角の差 $(\theta_{i+1} - \theta_i)$ [rad] が対象物の速度の大きさ $\|v_{obj}\|$ によって変化する。

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_{i+1} - \theta_i) &= \alpha(\|v_{obj}\|) \text{ [rad]}, \quad i = 1, \dots, N-1 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_1 - \theta_N) &= \beta(\|v_{obj}\|) \text{ [rad]} \end{aligned}$$

2.c 対象物を中心としたビークル群の平均位置の偏角 $\bar{\theta}$ [rad] が対象物の進行方向 (偏角) φ [rad] となる。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\bar{\theta} - \varphi) = 0 \text{ [rad]}$$

ただし、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルム、 $R \in \mathbb{R}_+$ は取り囲み半径、 $\theta_i \in [0, 2\pi)$ [rad] は対象物の重心位置を中心とした i 番目のビークルの偏角とする。これらの制御目的が達成されるようなタスクを次節で設計する。

Case 1 は、Fig. 1 のようにビークル群が対象物を中心とした正多角形を形成するように配置される。Case 2 は、Fig. 2 のように対象物の速度の大きさによってビークル群の形態が変化する。具体的には、対象物が停止しているときは対象物を中心とした正多角形を、対象物が移動しているときは対象物の進行方向を塞ぐようにビークル群が配置される。

3. 制御系設計

本節では、前節で述べた制御目的を達成するためのタスクを設計し、その目標値を設定する。

3-1. 制御目的 1 (Case 1) を達成するためのタスク まずは、制御目的 1 を達成するための 3 つのタスクを設計し、その目標値を設定する。

● ビークル群の平均位置を目標値に一致させるタスク

このタスクはまず、各ビークルの位置を統計してその平均位置をビークル群の中心位置と定義する (以降、平均位置と呼ぶ)。そして、タスクの目標値としてある位置を与えると、平均位置が目標値と一致する。したがって、Case 1 を満たすようなこのタスクの目標値は、対象物の重心位置とするのが望ましい。このタスク $\sigma_c \in \mathbb{R}^2$ およびその目標値 $\sigma_{cd} \in \mathbb{R}^2$ を次式で定義する。

$$\sigma_c = \bar{\mathbf{p}} = \frac{1}{N} (\mathbf{p}_1 + \dots + \mathbf{p}_N) \quad (10)$$

$$\sigma_{cd} = \mathbf{p}_{obj} \quad (11)$$

さらに、このタスクのヤコビ行列 $J_c \in \mathbb{R}^{2 \times 2N}$ および擬似逆行列 $J_c^\dagger \in \mathbb{R}^{2N \times 2}$ は次式となる。

$$J_c = \begin{bmatrix} \cdots & 1 & 0 & \cdots \\ \cdots & 0 & 1 & \cdots \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$J_c^\dagger = N J_c^T \quad (13)$$

- ビークルと平均位置との距離を目標値に保つタスク

このタスクは、ビークルと平均位置との距離をある目標値に保つタスクである。したがって、このタスクの目標値は取り囲み半径とする。このタスク $\sigma_s \in \mathbb{R}^N$ およびその目標値 $\sigma_{sd} \in \mathbb{R}^N$ を次式で定義する。

$$\sigma_s = \begin{bmatrix} \vdots \\ \frac{1}{2}(\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})^T(\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}}) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\sigma_{sd} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \frac{1}{2}R^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (15)$$

さらに、このタスクのヤコビ行列 $J_s \in \mathbb{R}^{N \times 2N}$ は、 J_s の ij 要素のブロックを $J_s^{ij} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ と定義すると次式となる。

$$J_s = \begin{bmatrix} J_s^{11} & J_s^{12} & \cdots & J_s^{1N} \\ J_s^{21} & J_s^{22} & \cdots & J_s^{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_s^{N1} & J_s^{N2} & \cdots & J_s^{NN} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$J_s^{ij} = \begin{cases} (1 - \frac{1}{N})(\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})^T & (i = j) \\ -\frac{1}{N}(\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})^T & (i \neq j) \end{cases} \quad (17)$$

- 隣り合うビークル間距離を目標値に保つタスク

このタスクは、隣り合うビークル間 (i 番目と $i+1$ 番目) の距離をある目標値に保つタスクである。Case 1 の場合、全てのビークルが取り囲み半径上に配置していれば、ビークルがその半径上に存在しつつ隣り合うビークル間の距離を等しくすることによって、正多角形を形成できる。つまり、隣り合うビークル間距離の目標値は、目標とする取り囲み半径と、ビークルの台数 N によって必然的に決定される。その隣り合うビークル間距離を l とし、このタスク $\sigma_e \in \mathbb{R}^N$ およびその目標値 $\sigma_{ed} \in \mathbb{R}^N$ を次式で定義する。

$$\sigma_e = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^T(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) \\ \vdots \\ \frac{1}{2}(\mathbf{p}_N - \mathbf{p}_1)^T(\mathbf{p}_N - \mathbf{p}_1) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\sigma_{ed} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \frac{1}{2}l^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (19)$$

ここで、式 (19) 中のビークル間距離 l は、取り囲み半径 R とビークルの台数 N を用いて次式で表わされる。

$$l = 2R \sin \frac{\pi}{N} \quad (20)$$

さらに、このタスクのヤコビ行列 $J_e \in \mathbb{R}^{N \times 2N}$ は、 J_e の ij 要素のブロックを $J_e^{ij} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ と定義すると次式となる。

$$J_e = \begin{bmatrix} J_e^{11} & J_e^{12} & \cdots & J_e^{1N} \\ J_e^{21} & J_e^{22} & \cdots & J_e^{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J_e^{N1} & J_e^{N2} & \cdots & J_e^{NN} \end{bmatrix} \quad (21)$$

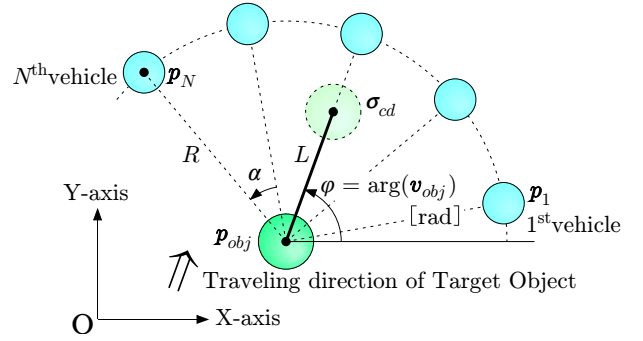


Fig. 3 Design parameters of Case 2

$$J_e^{ij} = \begin{cases} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i+1})^T & (i = j) \\ -(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_{i+1})^T & (i + 1 = j) \\ \mathbf{0} & (\text{その他}) \end{cases} \quad (22)$$

$$\because N + 1 = 1, \mathbf{p}_{N+1} = \mathbf{p}_1$$

しかし $N = 2$, つまりビークルの台数が2台のとき、ヤコビ行列 J_e は次式となる。

$$J_e = \begin{bmatrix} (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^T & -(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^T \\ -(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1)^T & (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1)^T \end{bmatrix} \quad (23)$$

上式は行フルランクではなく (rank=1) 仮定 1 を満たさない。つまり、擬似逆行列を生成することができなくなってしまうために、これ以降はビークルの台数 N を $N \geq 3$ として考える。

本節で述べた3つのタスクが全て目標値に収束することで、制御目的 1 を達成することができる。

3-2. 制御目的 2(Case 2) を達成するためのタスク 次に、制御目的 2 を達成するためのタスクを設計し、その目標値を設定する。基本的に、タスクは 3-1節で設計したものをを用いて、必要であればタスクおよびその目標値を変更することで達成する。

Case 2 では、対象物の速度の大きさ $\|\mathbf{v}_{obj}\|$ によって $\alpha(\|\mathbf{v}_{obj}\|)$ を以下のように変化させるものと定義する。

$$\alpha(\|\mathbf{v}_{obj}\|) = \frac{2\pi}{N} e^{-\kappa \|\mathbf{v}_{obj}\|} \quad (24)$$

ここで、 $\kappa \in \mathbb{R}_+$ はゲインである。 $\alpha(\|\mathbf{v}_{obj}\|)$ を式 (24) のように定義すると、 $\beta(\|\mathbf{v}_{obj}\|)$ は次式となる。

$$\beta(\|\mathbf{v}_{obj}\|) = 2\pi - (N - 1)\alpha \quad (25)$$

式 (24), (25) を考慮した上で、制御目的 2 を達成するためのタスクを設計する。

- ビークル群の平均位置を目標値に一致させるタスク

まず、式 (10) と同様のタスク σ_c を設計する。

$$\sigma_c = \frac{1}{N}(\mathbf{p}_1 + \cdots + \mathbf{p}_N) \quad (26)$$

Case 1 の場合は、目標値 σ_{cd} を対象物の重心位置 \mathbf{p}_{obj} としたが、Case 2 の場合は、Fig. 3 のようにビークル群が対象物の進行方向に集中するため、平均位置の目標値を対象物の重心位置とするのは不適切である。そこで目標値は、平均位置と対象物の重心位置のずれを修正する補正項 $\tilde{\mathbf{c}} \in \mathbb{R}^2$ を加えた次式とする。

$$\sigma_{cd} = \mathbf{p}_{obj} + \tilde{\mathbf{c}} \quad (27)$$

$$\tilde{\mathbf{c}} = \begin{bmatrix} L \cos \varphi \\ L \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (28)$$

ここで、 $L \in \mathbb{R}_+$ はピークル群が対象物の進行方向に集中することによる、ピークル群の平均位置の対象物位置からのずれの大きさ、 $\varphi \in [0, 2\pi][\text{rad}]$ は対象物が進行する方向 (偏角) である。 L は次のように求められる。

$$L = \begin{cases} \frac{R}{N} + \frac{2R}{N} \sum_{m=1}^{\frac{N-1}{2}} \cos(m\alpha) & (N \text{ が奇数}) \\ \frac{2R}{N} \sum_{m=1}^{\frac{N}{2}} \cos\left(\frac{2m-1}{2}\alpha\right) & (N \text{ が偶数}) \end{cases} \quad (29)$$

- タスク σ_s に補正項を加えたタスク

Case 1 の場合のタスク σ_s は、ピークルと平均位置との距離を目標値に保つためのタスクであったが、Case 2 の場合はその平均位置に補正項を加える必要がある。このタスク $\sigma_o \in \mathbb{R}^N$ およびその目標値 $\sigma_{od} \in \mathbb{R}^N$ を次式で定義する。

$$\sigma_o = \begin{bmatrix} \vdots \\ \frac{1}{2} \{ \mathbf{p}_i - (\bar{\mathbf{p}} - \bar{\mathbf{c}}) \}^T \{ \mathbf{p}_i - (\bar{\mathbf{p}} - \bar{\mathbf{c}}) \} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\sigma_{od} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \frac{1}{2} R^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (31)$$

さらに、このタスクのヤコビ行列 $\mathbf{J}_o \in \mathbb{R}^{N \times 2N}$ は、 \mathbf{J}_o の ij 要素のブロックを $\mathbf{J}_o^{ij} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ と定義すると次式となる。

$$\mathbf{J}_o = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_o^{11} & \mathbf{J}_o^{12} & \dots & \mathbf{J}_o^{1N} \\ \mathbf{J}_o^{21} & \mathbf{J}_o^{22} & \dots & \mathbf{J}_o^{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{J}_o^{N1} & \mathbf{J}_o^{N2} & \dots & \mathbf{J}_o^{NN} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{J}_o^{ij} = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{N}\right) (\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}} + \bar{\mathbf{c}})^T & (i = j) \\ -\frac{1}{N} (\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})^T & (i \neq j) \end{cases} \quad (33)$$

- 隣り合うピークル間距離を目標値に保つタスク

まず、式 (18) と同様のタスク σ_e を設計する。

$$\sigma_e = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2)^T (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) \\ \vdots \\ \frac{1}{2} (\mathbf{p}_N - \mathbf{p}_1)^T (\mathbf{p}_N - \mathbf{p}_1) \end{bmatrix} \quad (34)$$

Case 1 では、ピークル群を正多角形に配置させるためにこのタスクの目標値を全て等しい一定値 l と設定した。しかし Case 2 では、対象物の速度の大きさによって隣り合うピークル間距離を変化させる必要があるため、次のような目標値を設定する。

$$\sigma_{ed} = \left[\frac{1}{2} l^2(\alpha) \quad \dots \quad \frac{1}{2} l^2(\alpha) \quad \frac{1}{2} l^2(\beta) \right]^T \quad (35)$$

ここで、 $l(\alpha)$ 、 $l(\beta)$ は次式となる。

$$\begin{cases} l(\alpha) = 2R \sin \frac{\alpha}{2} \\ l(\beta) = 2R \sin \frac{\beta}{2} \end{cases} \quad (36)$$

本節で述べた 3 つのタスクが全て目標値に収束することで、制御目的 2 を達成することができる。ただし、Case 2 を厳密に達成するためには、対象物に関して以下の仮定が必要である。

仮定 2 対象物は直線的に移動する。

3-3. タスクの結合 ここまでは、制御目的を達成するために複数のタスクを設計した。設計したタスクを全て達成することによって、それぞれの制御目的を達成することができる。複数のタスクを設計した理由は、単一のタスクでは取り囲みを達成することができないためである。しかし、複数のタスクを設計しても、制御則 (9) でピークルに適用できるタスクは一つだけである。そこで本稿では、ピークルに複数のタスクを適用するために NSB 制御を導入する。NSB 制御を用いるために、設計したタスクに優先順位を設定する。本稿では、タスクの優先順位を以下のように設定する。

$$\begin{aligned} (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) &= (\sigma_e, \sigma_c, \sigma_s) & (\text{Case 1}) \\ (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) &= (\sigma_e, \sigma_c, \sigma_o) & (\text{Case 2}) \end{aligned}$$

また、各パラメータは Table 1 のように変更される。

Table 1 Changing parameters

$\sigma_T, \sigma_{Td}, \bar{\sigma}_T$	\rightarrow	$\sigma_k, \sigma_{kd}, \bar{\sigma}_k$
$\mathbf{J}_T, \mathbf{J}_T^\dagger$	\rightarrow	$\mathbf{J}_k, \mathbf{J}_k^\dagger$
Λ_T	\rightarrow	Λ_k
\mathbf{v}_{Td}	\rightarrow	\mathbf{v}_k
m_T	\rightarrow	m_k
<hr/>		
T : Kind of Task	\rightarrow	$k = 1, \dots, k_T$

これらを用いて、3 つのタスクを設計し、それらのタスクを NSB 制御により結合した場合の制御則は次式で与えられる ⁽⁷⁾。

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_1 + \left(\mathbf{I} - \mathbf{J}_1^\dagger \mathbf{J}_1 \right) \left\{ \mathbf{v}_2 + \left(\mathbf{I} - \mathbf{J}_2^\dagger \mathbf{J}_2 \right) \mathbf{v}_3 \right\} \quad (37)$$

上式の $(\mathbf{I} - \mathbf{J}_k^\dagger \mathbf{J}_k)$ は、ヤコビ行列 \mathbf{J}_k の零空間表現のことであり、優先度の低いタスクは優先度の高いタスクの零空間に属する。

4. 収束性解析

ここで、提案手法に関して以下の定理が成り立つ。

定理 1 $N \geq 3$ 台のピークル (1) と対象物 (4) を考える (Case 2 の場合は仮定 2 を満たす)。各ピークルに対して、制御則 (37) を適用する。このとき $\mathbf{J}_2 \mathbf{J}_1^\dagger = \mathbf{J}_3 \mathbf{J}_1^\dagger = \mathbf{J}_3 \mathbf{J}_2^\dagger = \mathbf{0}$ が成立すれば、3 つのタスクはすべて目標値に漸近的に収束し、制御目的は達成される。

[証明]

まず、3 つのタスクをまとめて表した $\tilde{\sigma} \in \mathbb{R}^{m_1+m_2+m_3}$ を以下のように定義する。

$$\tilde{\sigma} = \left[\tilde{\sigma}_1^T \quad \tilde{\sigma}_2^T \quad \tilde{\sigma}_3^T \right]^T \quad (38)$$

次に、式 (38) を用いてリアプノフ関数候補を、

$$V(\tilde{\sigma}) = \frac{1}{2} \tilde{\sigma}^T \tilde{\sigma} \quad (39)$$

とする。上式をシステムの解軌道に沿って時間微分すると、

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{\sigma}) &= \tilde{\sigma}^T \dot{\tilde{\sigma}} \\ &= \tilde{\sigma}^T \left[\dot{\tilde{\sigma}}_1^T \quad \dot{\tilde{\sigma}}_2^T \quad \dot{\tilde{\sigma}}_3^T \right]^T \end{aligned} \quad (40)$$

となる。ここで、式 (37) を次式のように書き直す。

$$\mathbf{v}_d = \mathbf{v}_1 + \mathbf{N}_1 \mathbf{v}_2 + \mathbf{N}_1 \mathbf{N}_2 \mathbf{v}_3 \quad (41)$$

上式の N_1, N_2 は、タスク 1, 2 のヤコビ行列の零空間表現のことで、次式で表される。

$$\begin{cases} N_1 = (I - J_1^\dagger J_1) \\ N_2 = (I - J_2^\dagger J_2) \end{cases} \quad (42)$$

タスク 1 に関して、式 (41) の両辺に左から J_1 を掛けると、 $J_1 N_1 = 0$ であることから、

$$\begin{aligned} J_1 v_d &= J_1 v_1 + J_1 N_1 v_2 + J_1 N_1 N_2 v_3 \\ \dot{\sigma}_1 &= \dot{\sigma}_{1d} + \Lambda_1 \tilde{\sigma}_1 \\ \dot{\tilde{\sigma}}_1 &= -\Lambda_1 \tilde{\sigma}_1 \end{aligned} \quad (43)$$

を得る。タスク 2 に関して、 $J_2 J_1^\dagger = 0$ が成り立つとし、式 (41) の両辺に左から J_2 を掛けると、 $J_2 N_2 = 0$ であることから、

$$\begin{aligned} J_2 v_d &= J_2 v_1 + J_2 N_1 v_2 + J_2 N_1 N_2 v_3 \\ \dot{\sigma}_2 &= \dot{\sigma}_{2d} + \Lambda_2 \tilde{\sigma}_2 \\ \dot{\tilde{\sigma}}_2 &= -\Lambda_2 \tilde{\sigma}_2 \end{aligned} \quad (44)$$

を得る。タスク 3 に関して、 $J_3 J_1^\dagger = J_3 J_2^\dagger = 0$ が成り立つとし、式 (41) の両辺に左から J_3 を掛けると、 $J_3 N_3 = 0$ であることから、

$$\begin{aligned} J_3 v_d &= J_3 v_1 + J_3 N_1 v_2 + J_3 N_1 N_2 v_3 \\ \dot{\sigma}_3 &= \dot{\sigma}_{3d} + \Lambda_3 \tilde{\sigma}_3 \\ \dot{\tilde{\sigma}}_3 &= -\Lambda_3 \tilde{\sigma}_3 \end{aligned} \quad (45)$$

を得る。式 (43)-(45) より、式 (40) は次式となる。

$$\dot{V}(\tilde{\sigma}) = -\tilde{\sigma}^T M \tilde{\sigma} \quad (46)$$

$$M = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda_3 \end{bmatrix} > 0 \quad (47)$$

式 (39) は正定、式 (46) は負定となり、リアプノフの安定定理より、

$$\tilde{\sigma} \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (48)$$

$$\tilde{\sigma}_1 \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (49)$$

$$\tilde{\sigma}_2 \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (50)$$

$$\tilde{\sigma}_3 \rightarrow 0 \quad \text{as } t \rightarrow \infty \quad (51)$$

が成り立つ。したがって、3 つのタスクは全て目標値に漸近的に収束し、制御目的は達成される。□

ただし、本稿で設計したタスクおよびその優先順位に関して以下の注意が必要である。

注意 1 $J_2 J_1^\dagger = J_3 J_2^\dagger = 0$ は常に成り立つが、 $J_3 J_1^\dagger = 0$ の成立は必ずしも保証されていない。

そこで、以下のような方法で $J_3 J_1^\dagger \approx 0$ となるゲイン $\gamma_T \in \mathbb{R}_+$ を導入する。

まず、式 (5) を以下のように書き直す。

$$\sigma_T = \gamma_T f_T(p) \quad (52)$$

式 (52) を時間微分すると次式を得る。

$$\dot{\sigma}_T = \gamma_T J_T v_T = J_{T\gamma_T} v_T \quad (53)$$

したがって、CLIK を用いてタスク速度は次式となる。

$$v_{Td} = J_{T\gamma_T}^\dagger (\dot{\sigma}_{Td} + \Lambda_T \tilde{\sigma}_T) \quad (54)$$

ただし γ_T を小さく設計することによって、逆に $J_{T\gamma_T}^\dagger$ の各要素が大きくなってしまふ。式 (54) 右辺第 2 項に関しては、 Λ_T を小さ

くすることで γ_T による影響を無視できるが、右辺第 1 項に関しては影響がでてしまふ。したがって、 $\dot{\sigma}_{Td} \neq 0$ のとき $\gamma_T = 1$ とし、 $\dot{\sigma}_{Td} = 0$ のとき γ_T を十分小さい値とする。このことにより、 $J_3 J_1^\dagger \approx 0$ とすることができる。

5. シミュレーションと制御実験による検証

本節では、ビークル群が対象物を正多角形に取り囲む場合 (Case 1) と、対象物の速度の大きさによってビークル群の配置を変化させる場合 (Case 2) についてシミュレーションと制御実験によってその有効性を検証する。

5-1. シミュレーションによる検証

5-1-1 Case 1

ビークル群が、移動する対象物を中心とした正多角形で対象物を取り囲む場合を考える。各パラメータは、 $N = 3, R = 0.4, \gamma_e = 1, \gamma_c = 1, \gamma_s = 10^{-5}, \Lambda_e = 0.4I_3, \Lambda_c = 0.4I_2, \Lambda_s = 0.4 \times 10^{-5}I_3$ とする。対象物の速度 v_{obj} は、 $t \in [0, 40]$ [s] のとき $v_{obj} = [0.04 \sin(\frac{\pi}{80}t) - 0.02 \cos(\frac{\pi}{80}t)]^T, t \in [40, 60]$ [s] のとき $v_{obj} = [0 \ 0]^T$ とする。

シミュレーション結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a) はトラジェクトリ、Fig. 4(b) は各ビークルと対象物との距離と、対象物を中心とした隣り合うビークル間の偏角の差の時間応答を示している。図中の \circ はビークルの初期位置、 \times は最終位置、 \times は対象物を表す。Fig. 4(a) から、対象物が移動してもビークル群が正多角形を形成し取り囲んでいることがわかる。さらに、Fig. 4(b) から、シミュレーション結果から、制御目的 1 を漸近的に達成していることが分かる。

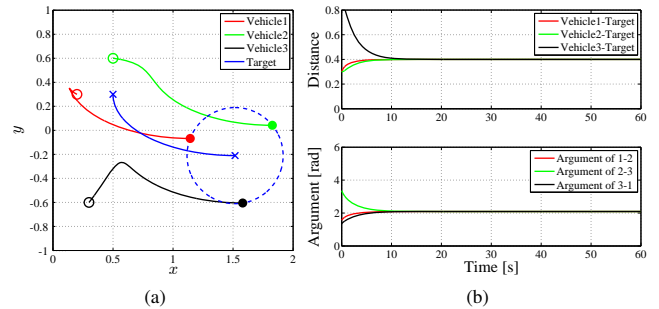


Fig. 4 Simulation results of Case 1

5-1-2 Case 2

仮定 2 を満たす移動する対象物の速度の大きさによって、ビークル群の配置する位置を変化させる場合を考える。各パラメータは、 $N = 3, R = 0.4, \gamma_e = 1, \gamma_c = 1, \gamma_o = 10^{-5}, \Lambda_e = 0.4I_3, \Lambda_c = 0.4I_2, \Lambda_o = 0.4 \times 10^{-5}I_3, \kappa = 15$ とする。対象物の速度 v_{obj} は、 $t \in [0, 40]$ [s] のとき $v_{obj} = [0.05 \sin(\frac{\pi}{40}t) \ 0]^T, t \in [40, 60]$ [s] のとき $v_{obj} = [0 \ 0]^T$ とする。つまり、対象物は x 軸方向に移動する。

シミュレーション結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a) は $t \in [0, 20]$ [s] のトラジェクトリ、Fig. 5(b) は $t \in [0, 60]$ [s] のトラジェクトリ、Fig. 5(c) は各ビークルと対象物との距離、対象物を中心とした隣り合うビークル間の偏角の差、対象物を中心としたビークル群の平均位置の偏角と対象物の進行方向の差の時間応答を示している。Fig. 5(a) から、対象物は x 軸方向に移動していることから、対象物の進行方向を塞ぐようにビークル群が配置していることがわかる。また、Fig. 5(b) および Fig. 5(c) から対象物が停止すると、対象物を中心とした正多角形を形成するようにビークル群が配置されていることが確認できる。シミュレーション結果から、制御目的 2 を漸近的に達成していることが分かる。

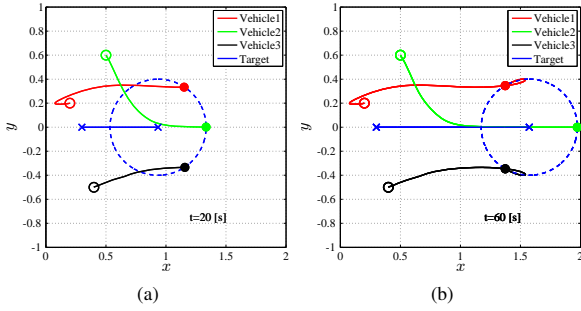


Fig. 5 Simulation results of Case 2

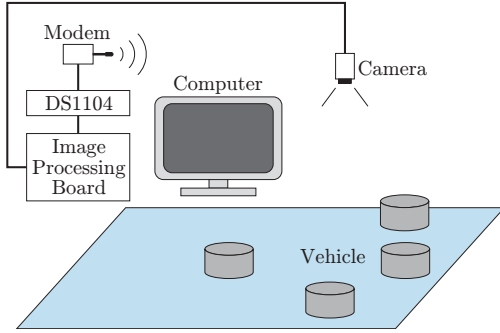


Fig. 6 Configuration of experimental setup

5-2. 制御実験による検証 実験装置は Fig. 6 に示すような構成をしている。ビークルには Ftech 社製の独立駆動二輪ビークルを用いる。上空に設置したカメラを用いてビークルの位置を取得し、PC を用いて制御入力を算出する。そして無線機によって各ビークルに制御入力を与えている。実験装置のサンプリング時間は 0.2 [s] である。

制御実験は Case 1 に関してのみ行い、各パラメータは、ビークルの台数 $N = 3$ 、取り囲み半径 $R = 0.4$ [m]、各ゲイン $\gamma_c = 1$ 、 $\gamma_s = 10^{-5}$ 、 $\mathbf{A}_e = 0.4\mathbf{I}_3$ 、 $\mathbf{A}_c = 0.4\mathbf{I}_2$ 、 $\mathbf{A}_s = 0.4 \times 10^{-5}\mathbf{I}_3$ とする。対象物の速度 \mathbf{v}_{obj} は、 $t \in [0, 40)$ [s] のとき $\mathbf{v}_{obj} = [0.04 \sin(\frac{\pi}{80}t) \quad -0.02 \cos(\frac{\pi}{80}t)]^T$ [m/s]、 $t \in [40, 60)$ [s] のとき $\mathbf{v}_{obj} = [0 \ 0]^T$ [m/s] とする。

実験結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) はトラジェクトリ、Fig. 7(b) は各ビークルと対象物との距離と、対象物を中心とした隣り合うビークル間の偏角の差の時間応答を示している。実験結果からも、ビークル群が正多角形を形成し対象物を取り囲んでいることから、制御目的 1 を漸近的に達成していることが分かり、提案手法の有効性が確認された。

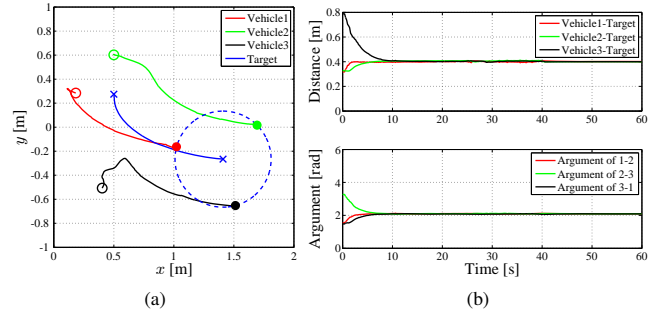


Fig. 7 Experimental results of Case 1

6. おわりに

本稿では、Inverse Kinematics 導入し、ビークル群によって移動する対象物を取り囲む制御問題を扱った。その際、二通りの取り囲み方法を考え、取り囲みを達成するためのタスクを複数設計した。そして、それらのタスクを NSB 制御によって結合し、得られる制御則をビークルに適用することで取り囲みが漸的に達成されることを示した。最後に、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確認した。今後の課題としては、ビークルの台数の増減に対する安定性や、Inverse Kinematics を用いた物体強調把持などが挙げられる。

参考文献

- (1) R. M. Murray, "Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 129, No. 5, pp. 571-583, 2007.
- (2) W. Ren, R. W. Beard and E. M. Atkins, "A Survey Consensus Problems in Multi-agent Coordination," *Proc. of the 2005 ACC*, pp. 1859-1864, 2005.
- (3) H. Yamaguchi, "A distributed motion coordination strategy for multiple nonholonomic mobile robots in cooperative hunting operations," *Robot. and Autom. Systems*, Vol. 43, No. 4, pp. 257-282, 2003.
- (4) 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.
- (5) T. H. Kim and T. Sugie, "Cooperative control for target-capturing task based on a cyclic pursuit strategy," *Automatica*, Vol 43, No. 8, pp. 1426-1431, 2007.
- (6) H. Kawakami and T. Namerikawa, "Consensus Filter Based Target-enclosing Strategies for Multiple Nonholonomic Vehicles," *Proc. of the 47th IEEE CDC*, pp. 2282-2487, 2008.
- (7) G. Antonelli and S. Chiaverini, "Kinematic Control of Platoons Autonomous Vehicles," *IEEE Trans. on Robot.*, Vol. 22, No. 6, pp. 1285-1292, 2006.
- (8) G. Antonelli, F. Arrichiello and S. Chiaverini, "Stability analysis for Null-Space-based Behavioral control for multi-robot systems," *Proc. of the 47th IEEE CDC*, pp. 2463-2468, 2008.
- (9) 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," 計測自動制御学会第 7 回制御部門大会資料, 2007.