

# 非ホロノミック 2 輪車両系に対するカスケードフォーメーション制御

日高 康展・吉川 隼斗\*・脇山 正博

## Cascade Formation Control for Multiple Nonholonomic Mobile Robots

Yasunobu HITAKA, Hayato YOSHIKAWA\* and Masahiro WAKIYAMA

### Abstract

For the problem of multiple mobile robots formation control, a control strategy which consists of three methods, namely Virtual Robot tracking,  $l-\psi$  and  $l-l$  control is proposed. By this method, collision avoidance and formation are achieved. However, depending on the initial distribution of robots, multiple collision detections are occurred and it turns out non-smooth convergence. In this paper, we propose a new control design which organizes some platoons of robots and leads platoons to formation goal without any collision. Then, formation with smooth motion can be established. Our technique is demonstrated in Numerical simulation.

Key words : nonholonomic constraint, feedback, collision, virtual robot tracking control

### 1. 緒言

本論文では2輪車両ロボット群のフォーメーション制御問題に焦点を当て、スムーズなフォーメーション形成を実現するための制御則設計を行う。2輪車両系は劣駆動システムの1つであり、車輪が横滑りしないという速度拘束を受ける。このため、全方向移動ロボットに比べ制御問題は複雑になるが、実社会に存在する移動ロボットはこれと同じ速度拘束を受ける機構を有するものが多いため、実用面を考慮し2輪車両モデルを扱う。

移動ロボットのフォーメーション形成は、目標ロボットに追従する子ロボットそれぞれに一定の間隔をおいた仮想ロボットを想定し、その仮想ロボットを目標軌道ロボットに一致させる制御によって実現することができる。ただし、各子ロボットの初期状態によっては、フォーメーション形成に至る過渡状態においてロボット同士の衝突が発生するため、その回避が大きな問題となる。衝突回避アルゴリズムとしては、 $l-\psi$  制御、 $l-l$  制御などが提案されている。これは、2台または3台間のロボット同士が衝突可能性を検知した際に、あらかじめ定められたロボットの優先順位に従って、優先度の低いロボットが優先度の高いロボットに対して回避動作をとるよう、優先度の低いロボットの制御則を切り替えるものである。3台以上のロボットのフォーメーション制御については、 $l-\psi$  制御、 $l-l$  制御を状況に応じて切り替える方法が提案されているが、ロボットの数が多くなるほど衝突リスクが増し、隊列形成までに時間がかかるといった問題を有している。

このような問題に対し、本論文では新たな制御戦略として Cascade formation control method を提案する。これは、各ロボットを一斉に目標隊列を形成するよう誘導するのではなく、目標とする隊列をいくつかのパーツに分割し（これを小隊と呼ぶ）、小隊同士が衝突しないように適度に離れた場所へ各小隊のメンバとなるロボットを誘導して小隊を形成させ、その後各小隊を誘導して目標隊列を形成させるものである。この手法では、ロボット群の収束位置を一旦分散させるため、ロボット同士の衝突可能性が大幅に減少し、目標隊列形成がより効率よく行なわれることが期待できる。ただし、追従ロボットの数、隊列の形状を一般化して議論を行なうと問題が

非常に煩雑になるため、本論文では目標ロボット一台、追従ロボット4台とし、目標隊列もある形状に特化させて考える。

### II. 問題設定

#### 2.1 2輪車両モデル

本論文では、Fig.1のような2輪車両ロボット複数台を制御対象とする。この車両ロボットの一般化座標は車体の平面位置  $(x, y)$  と車体の姿勢角  $\theta_i$  の3つからなり、制御入力は車輪方向の速度  $v$  とハンドル操作による操舵角速度  $\omega$  の2つで与えられる。

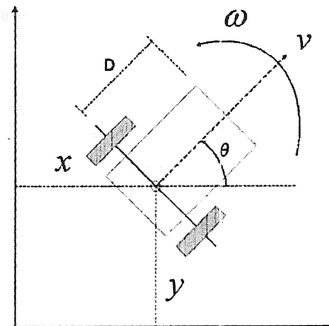


Fig.1 Unicycle robot

このロボットの運動学方程式は

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

となり、入力より多い数の一般化座標を制御するため、このシステムは劣駆動システムである。また、車両が横滑りしないという仮定より、拘束式

$$x \sin \theta - y \cos \theta = 0 \quad (2)$$

が与えられる。この3変数に関する速度拘束は積分不可能であ

\* 専攻科 制御工学専攻2年

るため、非ホロノミック拘束として与えられる。

## 2.2 仮定

本研究では車両ロボット複数台の2次元平面上での動作を考える。車両ロボットのうち、1台を目標ロボット、その他を追従ロボットとする。各ロボットには以下の仮定を与える。

- I. ロボットは全て同一モデルであり、速度拘束を有する。
- II. ロボットが動作する環境は路面がフラットであり、障害物はない。
- III. 目標ロボットの走行軌道は滑らかなもので与えられている。
- IV. 各追従ロボットは優先順位が付けられている。
- V. 追従ロボットは常に必要な情報（全ロボットの位置、姿勢、入力など）を取得できる。

## 2.3 制御目的

前節の仮定のもと、各ロボットの初期値、および親ロボットの走行軌道が与えられた際に、時刻  $t \rightarrow \infty$  において、以下の条件を満足することを目的とする。

- I. 目標フォーメーションが確立される。
- II. ロボット同士の衝突は回避されている。

### III. カスケードフォーメーション制御

前章で示した仮定と制御目的に対し、文献[4]では目標ロボットの追従にはVR制御、ロボット同士の衝突回避には  $l-\psi$  制御および  $l-l$  制御といった、3種類の制御則による切り替え制御手法を提案している。

VR制御は目標ロボットに追従する子ロボットそれぞれに一定の間隔をおいた仮想ロボットを想定し、その仮想ロボットを目標軌道ロボットに一致させることで隊列を形成させる制御則である。VR制御による隊列を形成する過渡状態において、ロボット同士の衝突危険性を検出した際、優先度の低いロボットが  $l-\psi$  制御もしくは  $l-l$  制御に制御則を切り替えて衝突を回避する。 $l-\psi$  制御は2台間のロボットの衝突回避制御則で、優先度の低いロボットが優先度の高いロボットに対し回り込むような回避動作を実現する。 $l-l$  制御は3台間のロボットの衝突回避制御則で、優先度の一番低いロボットが他の2台に対し常に一定の間隔を確保する。

文献[4]では、これら3種類の制御則を用いた切り替え制御手法により、1台の目標ロボットと4台の追従ロボットの制御問題に対し、制御目的を達成している。ただし、VR制御で隊列を形成させるため、Fig. 2のように、隊列形成直前に全てのロボットが集中し、衝突危険性が発生しやすくなる。さらに、回避動作中のロボットが集まってきた他のロボットと再び衝突危険性を検知するといったように、衝突危険性が多重に発生する場合も起こりうる。ここで、Fig. 2にある各ロボットを被う円周は衝突までの余裕距離を意味しており、ロボッ

ト間の円周の接触によって衝突危険性を検知し、制御則を切り替える。

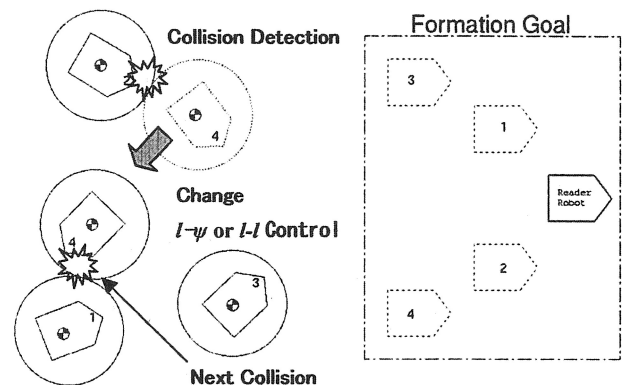


Fig.2 Multiple collision detection

このような問題に対し、本論文では新たな制御戦略としてCカスケードフォーメーション制御を提案する。これは、各ロボットを一斉に目標隊列を形成するよう誘導するのではなく、目標とする隊列をいくつかのパーツに分割し（これを小隊と呼ぶ）、小隊同士が衝突しないように適度に離れた場所へ各小隊のメンバーとなるロボットを誘導して小隊を形成させ、その後各小隊を誘導して目標隊列を形成させるものである。この手法では、ロボット群の収束位置を一旦分散させるため衝突可能性が大幅に減少し、隊列形成がより効率よく行なわれることが期待できる。Fig. 3は提案した制御戦略の概念図である。

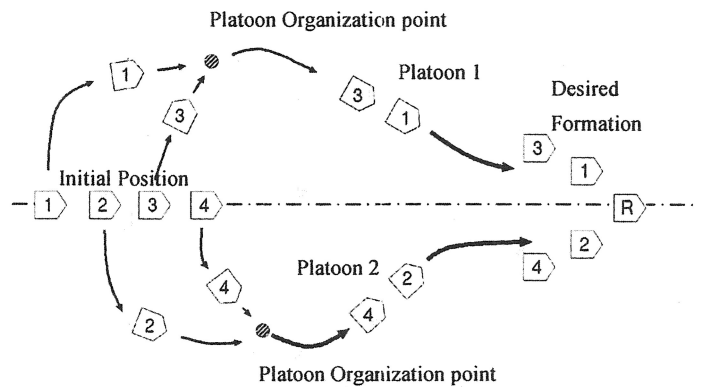


Fig.3 Cascade Formation Control

**Remark:** 問題の簡略化のため、本論文ではこれ以降1台の目標ロボットと4台の追従ロボットのフォーメーション制御問題を扱う。

### 3.1 小隊数とメンバーの決定

小隊の形成にあたり、目標隊列における各追従ロボットの配置関係から小隊の数および各小隊のメンバーを決定する。例えば、Fig. 3にあるような目標隊列を形成させたい場合、目標ロボットの進行方向を境界軸にとり、1番と3番のロボットで小隊1を、2番と4番のロボットで小隊2を境界軸と対称の領域

で形成させ、各小隊を目標ロボットへ追従させれば、小隊同士は衝突することなく目標隊列が形成される。

### 3.2 小隊の形成

小隊を形成させる地点は、小隊の形成から隊列形成までなるべく小隊同士の衝突可能性が発生しないように決めなければならない。この決定法については小隊の数や目標隊列の形などによって様々な方法が考えられるが、本論文ではメンバー2台の2つの小隊を制御するため、前節で述べたように小隊形成地点を設ければ小隊同士の衝突は回避することができる。

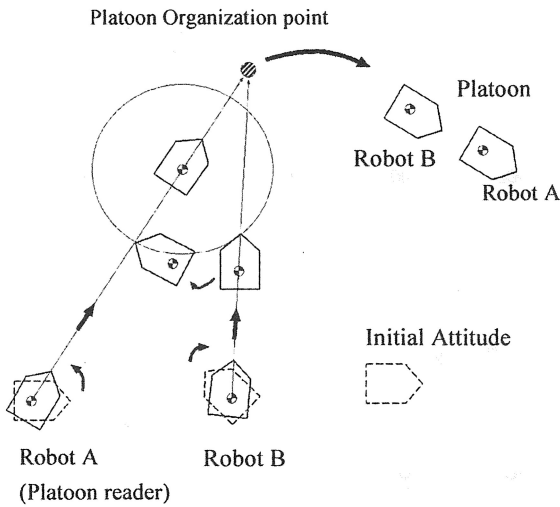


Fig.4 Platoon organization

Fig.4は2台のメンバーロボットによる小隊形成の概念図である。ロボットAは小隊を誘導する小隊長ロボットである。小隊形成までの手順を以下に示す。

- I. 小隊のメンバーロボットは、初期位置で小隊形成位置方向へ旋回する
- II. メンバロボットは小隊形成位置へ移動開始
- III. ロボットBがロボットAの円領域 (Fig.4) に接触すると、ロボットBはロボットAを目標ロボットとするVR制御に切り替え、小隊を形成する

手順II.にある各ロボットの移動は、文献[1]にある軌道追従制御則を適用する。この方法は、目標軌道を姿勢も含めた他の車両の軌で与えるものである。すなわち、目標軌道はロボットと同じ運動学モデル(1)を有する。したがって、目標軌道  $[x_r, y_r, \theta_r]^T$  は任意の入力 (目標入力)  $[v_r, \omega_r]^T$  から一意に定まり、この軌道に対する追従制御は誤差システム

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_r y_e \\ v_r \sin \theta_e - \omega_r x_e \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -y_e \\ 0 & x_e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

を安定化することで達成される。ここで、 $x_e, y_e, \theta_e$  は次式

$$\begin{aligned} x_e &= (x_r - x) \cos \theta + (y_r - y) \sin \theta \\ y_e &= -(x_r - x) \sin \theta + (y_r - y) \cos \theta \\ \theta_e &= \theta_r - \theta \end{aligned} \quad (4)$$

で与えられる。入力  $\mu_1, \mu_2$  はリアプノフの安定化理論に基づいて設計する。誤差システム(3)は、 $[v_r, \omega_r]^T$  が一定、もしくは十分ゆっくり変化するときは安定化が可能であるので、手順Iであらかじめ小隊形成地点にロボットを向けてやれば、目標軌道は直線となるため、軌道生成のための入力  $v_r$  の設計が容易となる。

手順IIでロボットを分散させた後、手順IIIでVR制御により小隊を形成させる。VR制御は、Fig.5にあるように追従ロボットと一定距離離れた所 (進行方向に距離  $l$ 、車体横方向に  $r$ ) に仮想ロボットを想定し、それを目標ロボットの状態と一致させる制御によって隊列を形成させる。

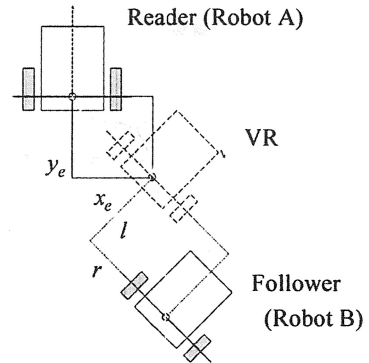


Fig.5 VR tracking model

VRロボットと追従ロボットBとの位置関係は、

$$\begin{bmatrix} x_{vB} \\ y_{vB} \\ z_{vB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_B - r \sin \theta_B + l \cos \theta_B \\ y_B + r \cos \theta_B + l \sin \theta_B \\ \theta_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

で表され、VRロボットの運動学方程式は

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{vB} \\ \dot{y}_{vB} \\ \dot{z}_{vB} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_B & -r \cos \theta_B - l \sin \theta_B \\ \sin \theta_B & -r \sin \theta_B + l \cos \theta_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_B \\ \omega_B \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{vB} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u}_B \end{aligned} \quad (6)$$

となる。式(6)を安定化するコントローラは次のように設計する。

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_B &= \mathbf{B}_{vB}^{-1} (\mathbf{b}_r v_r - \lambda_B \mathbf{z}_{eB}) \\ \mathbf{z}_{eB} &= \begin{bmatrix} x_{eB} \\ y_{eB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{vB} \\ y_{vB} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_r = \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \sin \theta_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

VR制御では目標ロボットと追従ロボットの初期位置について、次の関係が成り立つ場合、目標ロボットと追従ロボット

との衝突は自動的に回避される<sup>[2]</sup>.

$$\rho(t_0) \geq \sqrt{r^2 + l^2} > 2D \quad (8)$$

$\rho$  は目標ロボットと追従ロボット間の距離であり,  $D$  は衝突余裕距離 (Fig.2にあるロボットの外周円) である. したがって, Fig.4にあるロボットAの円領域の半径  $R_p$  が

$$R_p \geq \sqrt{r^2 + l^2} > 2D \quad (9)$$

を満足すれば, 小隊メンバ同士の衝突は回避される.

### 3.3 隊列の形成

各小隊の隊列が確立し, 小隊形成位置に到達した時点で, 各小隊長のロボットは本来の目標ロボットに対するVR制御に切り替え, 目標フォーメーションを確立させる.

## IV. 数値シミュレーション

Fig. 6に数値シミュレーションの様子を示す. 図中のF1~F4は追従ロボットを示し, その番号は各ロボットの優先順位を示している. 各ロボットの初期位置と目標フォーメーションはFig. 3に示すものと同等のものとしている. したがって, ロボットF1とF3が小隊Aを, ロボットF2とF4が小隊Bを形成する. Fig. 6の2番目の図では各ロボットがその場旋回を行なった後, 小隊形成位置へ向けて直進を開始した様子を表している. その後, ロボットF3, F4がVR制御へ切り替えて小隊を形成し (3番目の図), 小隊長F1, F2が小隊形成位置を通過した時点で目標ロボットRに対するVR制御へ切り替え (4番目の図), 目標フォーメーションを達成している (5番目の図).

同一条件下で従来法を用いてシミュレーションをおこなった場合, 追従ロボット同士の衝突が発生するが, 提案した方法ではシミュレーション開始から隊列形成に至るまでロボット同士の衝突は全く発生せず, スムーズな隊列形成を実現することができた.

## V. 結言

本論文では, 非ホロノミック特性を有する2輪車両ロボットに対する衝突回避を考慮したフォーメーション制御の新しい制御戦略を提案した. 数値シミュレーションの結果, 本手法の有効性を確認することができた.

## VI. 参考文献

- [1] Y. Kanayama, Y. Kimura, F. Miyazaki et al (1990), Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot, IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp.384-389
- [2] J. Jongusuk and T. Mita (2001), Tracking Control of Multiple Mobile Robots: A Case Study of Inter-Robot Collision-Free Problem, Proceedings of 2001 IEEE Intl. Conf on Robotics & Automation, pp.2885-2890

- [3] J. P. Densai, J. Ostrowski, V. Kurma (1998), Controlling Formations of Multiple Mobile Robots, IEEE Proceeding of Intl. Conf. Robotics and Automations, pp.2864-2869

- [4] T. Ikeda, J. Jongusuk, T. Ikeda, et al (2004), Formation Control of Multiple Nonholonomic Mobile Robots (in Japanese), IEEEJ Trans. IA, Vol.124, No8, pp.814-819

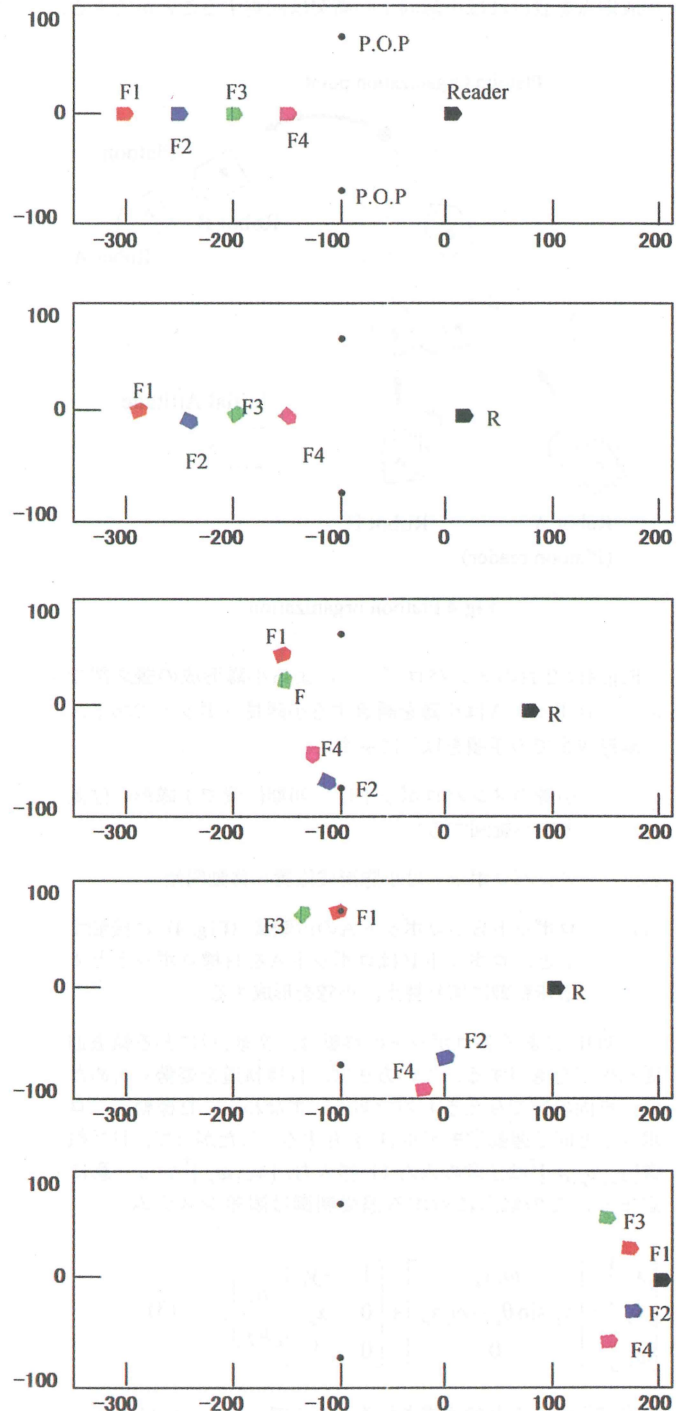


Fig.6 Simulation result

(2008年10月10日 受理)