

移動ロボットのフォーメーション制御

Formation Control of Mobile Robots

○奥山慎之介*, 村松鋭一*

○ Shinnosuke Okuyama *, Eiichi Muramatsu*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード: フォーメーション制御 (Formation control), 移動ロボット (Mobile robots)

連絡先: 〒992-0037 米沢市城南 4-3-16 山形大学工学部応用生命システム工学科
村松研究室

TEL 0238-26-3327, E-mail : muramatu@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

1.1 研究背景・目的

近年, 様々な形の自律移動型ロボットの研究が進められてきている. その中でも複数の移動ロボットによる協調作業は, 物体の搬送, 監視, 救助などへの応用もあり期待を集めている. そのための, 複数のロボットのフォーメーションの形成や群行動の発現に関する原理の解明が求められている.

現在, 群・フォーメーションを形成し移動させる制御の研究はさまざまなアプローチで行われている[1]~[4]. しかし, それらには事前情報や計算量に問題があり, リアルタイムに状況に応じた群・フォーメーションを形成し移動するためには課題が残っている. そこで, リアルタイムに状況に応じた構造の群れになりながら移動するフォーメーション制御が必要になってきた.

本研究ではフォーメーション形成のための個々のロボットの行動原理を探ることを目的とし, 環境に応じたフォーメーションを発生することと, 障害物や移動ロボットに対する衝突回避行動を動的, 自律的に行わせるアルゴリズムの構築を目標とする. 本研究では, 2 輪駆動型移動ロボットを用いる. このロボットは横滑りができないという非ホロノミック拘束を有する. またフォーメーション形成においては, リーダー追従型の制御方法を取る. これは 1 台の高機能なロボット(リーダー)と多数の安価なロボット(フォロワ)による協調作業をさせ, 低コストで良いシステムの構成を考えているためである.

2. 制御対象

2.1 群行動・フォーメーション制御

本研究では「群れ」を「一定範囲内の相対位置を保とうとする集団」とし, 「フォーメーション」を「個々の配置によって群れが形成する陣形」と考える. 本研究では, 1 体の

リーダーと複数のフォロワによって群を形成する。個々の自律回避行動システムと追従システム、リーダーによるフォーメーション指定によってフォーメーションを維持しながら、1台のリーダーが他のフォロワを目的地まで連れて行くという作業目標の達成について考察する。

2.2 制御対象の概略

本研究では、自律移動ロボットからなる群を以下のように仮定する。

- ・群は1台のリーダーと多数のフォロワから構成される。
- ・リーダーのみに移動目標点が与えられる。
- ・ロボットは二輪駆動型とし、横滑りはできないという拘束を持つ。
- ・ロボットはそれぞれ自己の車体を中心とした座標系を持ち、自群の他のロボット、他群のロボット、障害物までの相対距離、角度を計測することが可能である。
- ・ロボットは自群、他群、リーダー、フォロワ、障害物の弁別が可能。

車体の半径を L_r とし、車体の質量を M 、車輪の半径を r と定義する。各パラメータの値をTable.1に示す。

Table.1: Definition of Parameter

L_r	Radius of body	0.1[m]
M	Weight of body	0.5[kg]
r	Radius of wheel	0.05[m]

2.3 基本制御方法

距離、角度の情報から追従走行、回避行動を実現させたいと考えた。そこで長さによって引力、斥力を発生できるばねの力を利用して走行制御を行うことにした。

本研究では、ロボット間・障害物間の距離に基づく仮想ばねの力を求め、その力が働いたとしたら車体がどう動くかを計算し、その動きを実現する左右の車輪の速度の制御を行いロボットの移動速度を決定する。その計算式をつぎに示す。

ばねが1本つながれた状態での仮想的な力 F を次の式で求める。

$$F = k * (d - L)[N] \quad (1)$$

ただし、 k はばね定数[N/m]、 d は対象物までの距離、 L はばねの自然長である。

F から進行方向の加速度を与える力 F_v と回転角速度を与える垂直方向の力 F_r を求める。 θ は自己を中心とする座標の中の対象物の角度である。

$$F_v = F \cos \theta \quad (3)$$

$$F_r = F \sin \theta \quad (4)$$

複数のばねがつながっている場合にはそれらの総和を求め F_v 、 F_r とする。

加速度 a と回転角速度 ω_b をつぎの式で求める。

$$a = \frac{1}{M}(F_v - cv) \quad (5)$$

$$\omega_b = \frac{1}{I}(F_r * L - \tilde{c}w) \quad (6)$$

ただし、 c は速度に比例する抵抗力(粘性摩擦係数)で、 \tilde{c} は回転角速度に比例する抵抗力である。これらに基づき、車体の速度 v と角速度 w をつぎのように求める。

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a * \Delta t \quad (7)$$

$$w(t + \Delta t) = w(t) + \omega_b * \Delta t \quad (8)$$

求めた速度 v と角速度 w により、左右の車輪の角速度 ω_r 、 ω_l を次の式によって算出する。

$$\begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{R}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{R}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \quad (9)$$

このように、基本制御方法に仮想ばねの力を用いる効果は以下の通りである。

- ・車体の先頭に力を加えることにより二輪駆動特有の切り返し動作の自然な発生が可能
- ・引力、斥力を発生できる。これにより対象物との距離を保つことができる。
- ・仮想ばねの自然長とばね定数が、設計パラメータあるいは動作中に可変なパラメータ

となり得る。

3. フォーメーション構造の環境適応

3.1 基本的なフォーメーション

衝突回避行動と個々のロボットが一定の距離を保てる自由空間の環境下では、群としてのまとまりを持ちロボットが群から逸脱しないようなフォーメーション形成が望ましい。そこで、先ほどの仮想ばねを用いて基本的なフォーメーションを定義する。

リーダーは基本的に移動目標点に向かって走行するので、フォロワはリーダーと仮想的なばねを結合し追従を行う。そして、フォロワ同士が1番近い車体と2番目に近い車体と仮想ばねを結合させ距離を保つ。この制御を保つことによって **Fig.1** のようなフォーメーションを形成することができる。

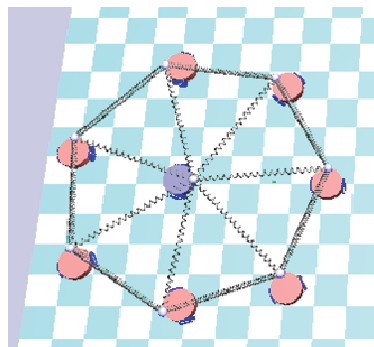


Fig.1 Basic formation

3.2 回避行動

基本的なフォーメーションを維持したまま、衝突回避行動を起こすことができる制御が望ましい。この衝突回避行動も先ほど述べた仮想ばねの制御測を用いる。車体が障害物に近づき距離が一定範囲内 S より近くなるとそれぞれが障害物に仮想ばねを伸ばし回避行動を起こす。 S より遠い障害物は無視し、伸ばす仮想ばねの長さと同じ長さにするこゝでばねの斥力だけを使うことができる。

3.3 環境に応じたフォーメーション変化

基本的なフォーメーションは、ある程度の

移動空間が保障された自由空間では効果を発揮する。しかし、細い路地などの狭い空間ではフォロワ同士や他群ロボットとの衝突の危険性が高まってしまう。そこで、周囲の環境に対応してフォーメーション構造を変化させることが必要になる。このことをフォーメーション変化と呼ぶ。フォーメーション変化はリーダーが環境とフォロワの位置を把握しそれに基づき接続関係を表す行列を書き換えることによって、フォーメーション構造を指示し行う。

4. 提案手法の検証

4.1 基本的なフォーメーションの形成のシミュレーション

提案手法による基本的なフォーメーション形成と障害物回避行動のシミュレーションを行う。各パラメータの値をTable.2に示す

Table.2: Definition of Parameter

N	The number of robots	7
L	The length of the virtual spring	0.7[m]
$L1$	The length of the virtual spring to the obstacle	0.5[m]
K	spring constant	3.0[N/m]
C	Coefficient of viscosity	2.0[N/m/sec]
D	Coefficient of viscosity of the turn	0.05[Nm/rad/sec]

Fig.2 に基本的なフォーメーションを維持しながら障害物回避を行うシミュレーション結果を示す。適当な初期状態に配置されたフォロワは、自律的に安定なフォーメーションを形成する。群が障害物に近づき距離が $L1$ より近くなるとそれぞれが障害物に仮想ばねを伸ばし回避行動を起こす。 $L1$ より遠い障害物は無視する。回避行動を起こしている間も互いのロボットとの距離を保つように移動するため、**Fig.2** のような走行をする。

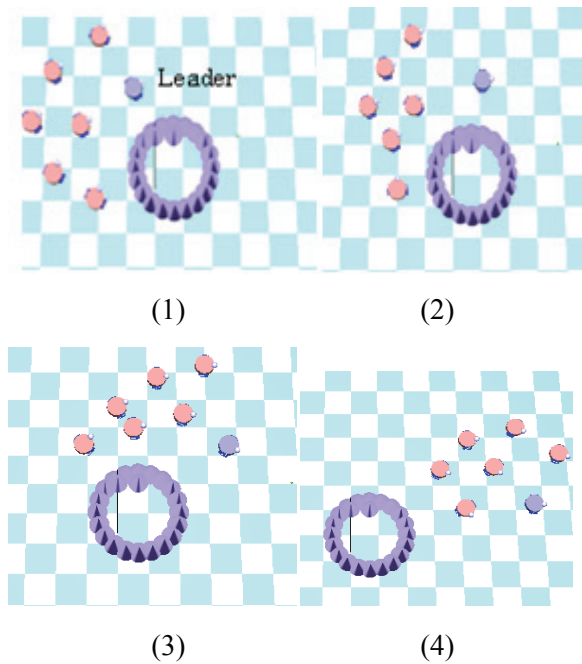


Fig.2 The simulation of collision avoidance

以上のシミュレーションにより，基本的なフォーメーション形成を行いながらの障害物回避行動が可能であるということが示された。

4.2 2つの群による衝突回避

Table.2 のパラメータを持った二つの群を左右の位置に設置し同時に中央に向かって走行させる．自群のロボットが他群のロボットに近づき距離が $L1$ より近くなるとそれぞれが他群ロボットに仮想ばねを伸ばし回避行動を起こす． $L1$ より遠い他群のロボットは無視する．Fig.3 に基本的なフォーメーションを維持しながら群同士の回避行動のシミュレーション結果を示す。

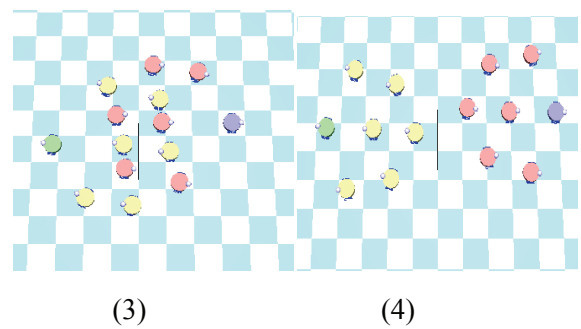
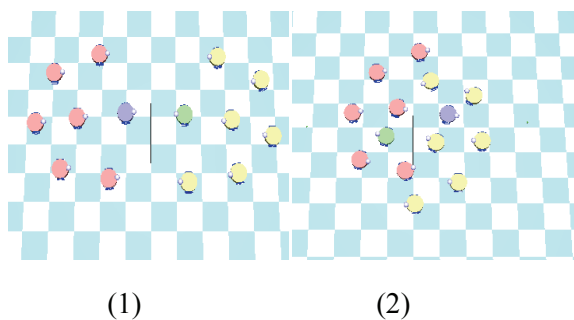


Fig3 Collision avoidance between crowds

4.3 フォーメーション変化

自由空間でのフォーメーションから狭い空間へ進入する．狭い空間の入口に入ったとリーダーが判断した場合，リーダーロボットが他のロボットとの距離が近い順番を把握する．順番に応じてフォーメーション変化を指示する．ロボット同士，障害物に衝突せずに一列のフォーメーションに変化する．以下にフォーメーション制御変化の流れを示す。

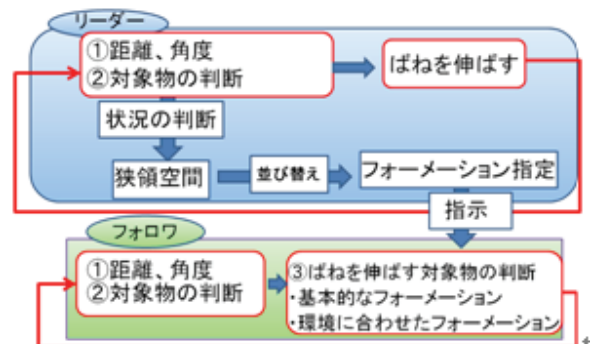
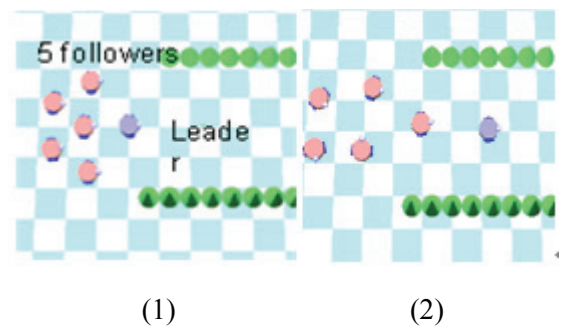


Fig.4 Flow chart of formation change

フォーメーション変化のシミュレーション結果を以下に示す



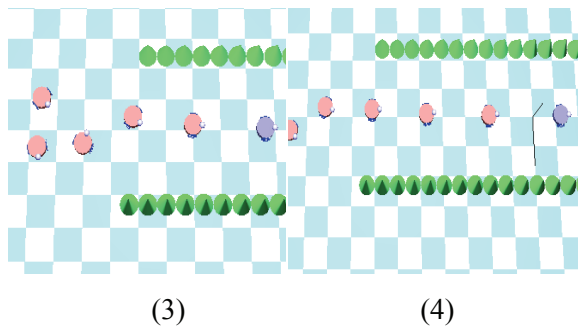


Fig.5 The simulation of the formation change
フォーメーション変化のシミュレーション
でロボットが描いた軌跡を以下に示す

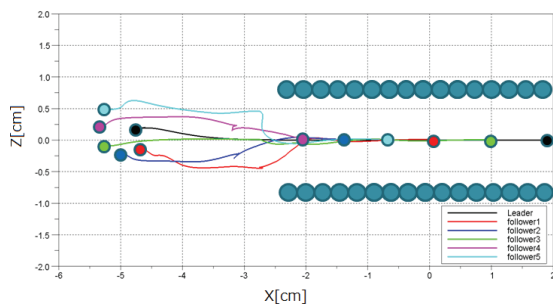


Fig.6 Mobile robots trajectory

5.まとめ

仮想バネを用いた制御則を提案し、フォーメーションの形成と衝突回避行動、およびフォーメーションの切り替えが可能であることを確認した。

二つの群の衝突回避という複雑な走行制御に対しても、仮想ばねを用いた制御測の有効性を確認することができた。

また、環境の変化への適応の例として、狭い領域の通過を取り上げ、リーダーによる指示に基づくフォーメーションの切替えのシミュレーションを行った。状況に応じたフォーメーション規則を設け、それに基づき目標とする隊列を形成する手法の有効性が確認できた。

今後の課題としては、さまざまな環境に対応させたフォーメーション変化を想定した場合においてリーダーが自律的に最適なフォーメーションを選択する方法の検討や、フォーメーション切り替え時の応答を考慮した制御系の設計問題などがあげられる。

参考文献

- [1]新井 民夫, 太田 順:「仮想的なインピーダンスを用いた複数移動ロボット系の動作計画」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7, pp.1039-1046, (1993)
- [2]湯浅 秀男:「相転移現象を応用した群ロボット系の創発的制御の試み」, 計測と制御, Vol.38, No.10, pp.646-649, (1999)
- [3]倉林 大輔, 長川 研太:「幾何条件による自律移動ロボット群の編隊構造遷移」, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.3, pp376-382, (2005)
- [4]清水, 川勝, 石黒:「多粒子径の動力学解析手法を応用した群ロボットの自律分散的形態制御」計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.2, 126/134, (2005)