

簡単な力学特性に基づく群ロボットの集団行動

Collective Behavior of Interacting Robots

谷川裕海*, 菅原研**, 小菅一弘*

Hiroumi Tanigawa*, Ken Sugawara**, Kazuhiro Kosuge*

*東北大学, **東北学院大学

*Tohoku University, **Tohoku Gakuin University

キーワード: 群れの力学モデル (collective behavior model), 群れ行動 (collective motion), 群れ構造 (collective formation), 方向依存性 (sensitivity)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01 東北大学大学院 工学研究科 バイオロボティクス専攻
小菅・王研究室 谷川裕海, Tel/Fax.: (022)795-4035, E-mail: tanigawa@irs.mech.tohoku.ac.jp

1. はじめに

現在,複数台のロボットにより作業を実現する群ロボットの研究が数多くなされており,次世代のロボットシステムの一つとして期待されている¹⁾. 群れロボットシステムは,拡張性,耐故障性,柔軟性などに優れている.本研究では「ロボットの群れ行動」に焦点を当てる.ロボットの集団行動に関する研究例としては牧野らによる群れ行動に関するもの²⁾やFredslundらによる群れの構造(フォーメーション)に関するもの³⁾などがある.ロボット群の集団行動アルゴリズムの構築を行うにあたり,生物の群れに行動を学ぶという一つの方法論がある.生物の群れは,全体を統括する監督の役割を果たす個体なしに個々が局所的に相互作用することによって全体として秩序ある効率的な振る舞いを示すといった特徴がある.これを自律ロボット群の協調行動に応用することを考える.先に述べたロボットの集団行動に関する研究例を踏まえて,本研

究では,生物の群れ行動に基づく均質なロボットの集団に均一のパラメータ設定を与えることで,様々な群れ行動を与えることができ,さらに群れ構造も記述できるダイナミクスの構築を試みる.

2. 群れの力学モデル

Shimoyamaらは適切な内部変数を導入し,ノイズ項を入れずに複雑な群れ行動を表現するダイナミクスを構築した⁴⁾.本研究ではこのモデルに注目し,行動と構造を一つの枠組みで捉えるための群れモデル拡張を行う.

2.1 Shimoyamaらの群れモデル

この群れモデルは推進力と相互作用力を有した個体を仮定し,粘性抵抗と群れの重心からの引力を考慮している(図1).式(1)に運動方程式を示す.ユニットの進む方向への推進力 $a\vec{n}_i$, それと逆向きに働く粘性抵抗 $-\gamma\vec{v}_i$, 他のユニットとの間に働く相

相互作用力（近づきすぎると斥力, 遠すぎると引力）として $\sum_{i \neq j} \alpha_{ij} \vec{f}_{ij}$, 群れの重心への引力 \vec{g}_i からなる式である. 式(2)は相互作用力を受ける方向依存性を表しており, d の値により異方性の強さを変えることができる(2). 式(3)は相互作用力の大きさを表しており, 最適な距離 r_c を境に引力と斥力に分れ, ある距離を境にその大きさを減衰させている(図3). 式(4)は群れの重心方向への引力ベクトルである. 式(5)はロボットが進む方向のベクトルと速度のベクトルの関係である. 緩和時間 τ で進行方向と速度の方向を一致させる現象を表している.

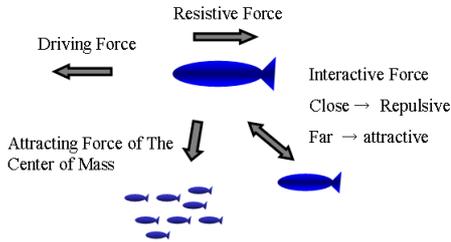


Fig. 1 Schematic of Dynamics

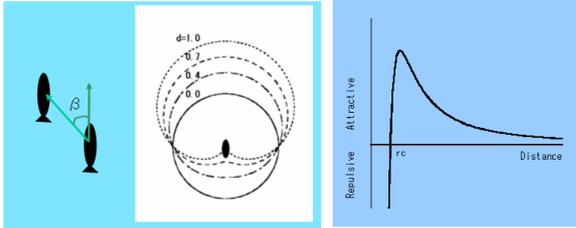


Fig. 2 Sensitivity

Fig. 3 Interactive Force

$$m \frac{d\vec{v}_i}{dt} = a\vec{n}_i - \gamma\vec{v}_i + \sum_{i \neq j} \alpha_{ij} \vec{f}_{ij} + \vec{g}_i \quad (1)$$

$$\alpha_{ij} = 1 + d \cos \beta \quad (2)$$

$$\vec{f}_{ij} = -c \left[\left(\frac{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|}{r_c} \right)^{-3} - \left(\frac{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|}{r_c} \right)^{-2} \right] \left(\frac{\vec{r}_j - \vec{r}_i}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|} \right) \quad (3)$$

$$\vec{g}_i = c_g \frac{\vec{g} - \vec{r}_i}{|\vec{g} - \vec{r}_i|} \quad (4)$$

$$\tau \frac{d\theta_i}{dt} = \sin(\phi_i - \theta_i) \quad (5)$$

この群れモデルはパラメータを変えることにより, 行進(図4), 振動(図5), 迷走(図6), 蚊柱(図7)などの振る舞いを示す.

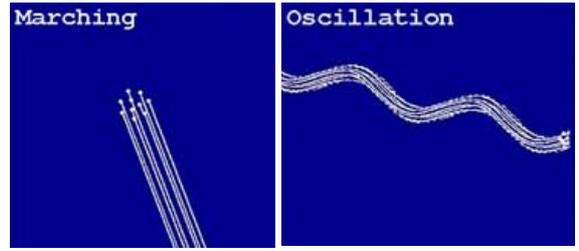


Fig. 4 Marching

Fig. 5 Oscillation

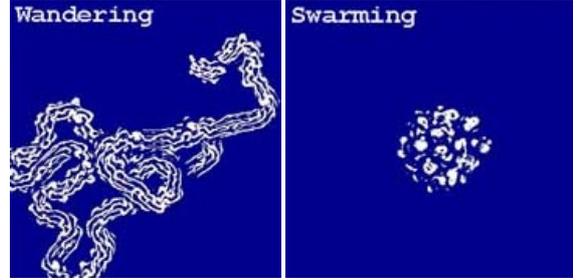


Fig. 6 Wandering

Fig. 7 Swarming

2.2 群れ構造

次に群れの構造について述べる. 既存の群れモデルは個体が集合した円形のクラスター構造をとる(図8). 本研究では, シミュレーションで観察されたような群れ行動とさらに群れの構造(フォーメーション)を同じダイナミクス内で記述することを目的としている. ここで対象とする群れの構造は単純な幾何学構造(直線や円, 三角形や四角形など)とする. 必要とされる構造は群れロボットに適用するアプリケーションにより異なるが, 複雑なフォーメーションは基本的に単純な構造の組合せと表現できる. そこでまずは直線構造を考えた. 群れの構造を考えるにあたって, 各個体の指向性に注目した. 指向性として最適個体間距離 r_c と相互作用力の方向依存性 α_{ij} を取り上げる. 円形のクラスター構造では, 各個体は等方的な指向性を持っており, どの位置に対しても安定な状態を保っている. このとき異方的な指向性を考え, 前後の関係が最も安定な状態を保つように指向性を調節した. そこで式(6)に示す様に, 最適個体間距離 r_c に方向依存性を導入して群れ構造を変化させた, 図9にそのイメージを示す. その結果クラスター構造

から2列縦隊構造へとフォーメーションを変化させる事ができた．図10に2列縦隊構造の例を示す．

$$r_c = \alpha_{ij} \times r_c \quad (6)$$

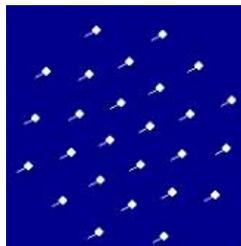


Fig. 8 Cluster formation

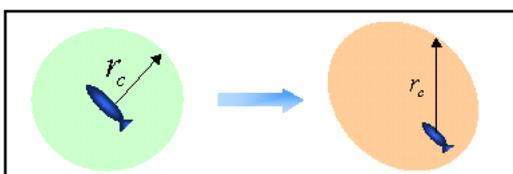


Fig. 9 sensitive r_c

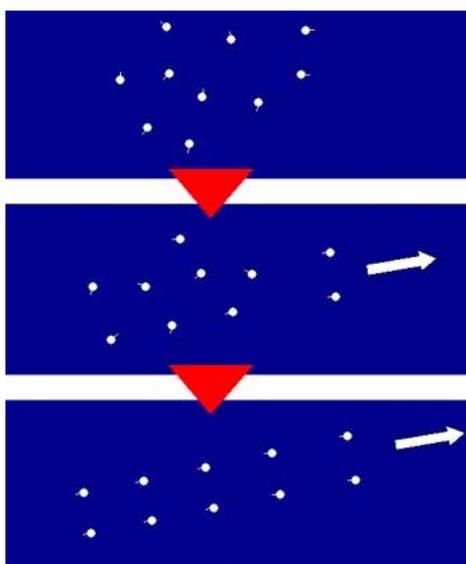


Fig. 10 double line formation

2.3 2列縦隊構造の特性

最適個体間距離 r_c に方向依存性を導入した事で得られた2列縦隊構造の特性を調べた．その項目を以下に示す．

- 1) 収束時間
- 2) 構造の安定性
- 3) 軌道追従性
- 4) 構造の遷移

2.3.1 収束時間

ランダムな初期配置から2列縦隊構造に移行するまでの時間とし、全個体の頭軸が一致した状態を収束状態とした．図11に2列構造状態の収束時間を示す．台数の増加に伴い収束時間も長くなっていることが分かる．

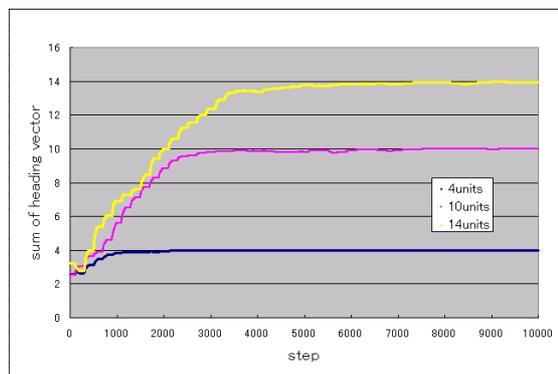


Fig. 11 convergence of 2lines

2.3.2 構造の安定性

2列縦隊構造の個体数に対する安定性と摂動に対する安定性を調べた．図11から分かるように個体数を変化させても2列構造を保つ．図12にある個体に対してy方向の位置に関する摂動を40%与えたときの群れの軌跡を示す．一定の大きさの摂動以上になると群れ内部の個体の配置に変化が起きることが分かった．

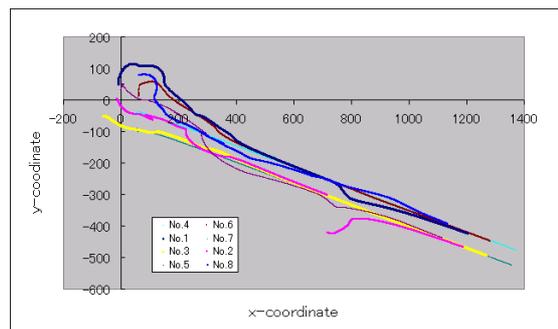


Fig. 12 y-coordinate perturbation by 40%

2.3.3 軌道追従性

先頭の個体に円軌道を進ませた場合の群れの軌道追従性を調べた．図13に円軌道を追従する群れの軌跡を示す．この図から先頭の個体の軌道を完全に追従するわけではなく、個体の相互作用力に

よりショートカットしながら前方の個体を追従することが分かる。

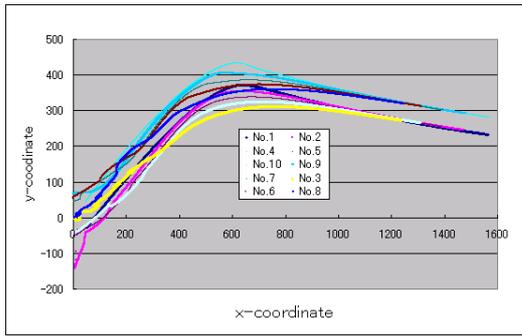


Fig. 13 trajectory tracking

2.3.4 構造の遷移

群れのフォーメーションをクラスター構造から2列縦隊構造へ移行した時の群れの軌跡を図14に示す。この図から本拡張モデルでは構造を切り換えることが可能であることがわかる。

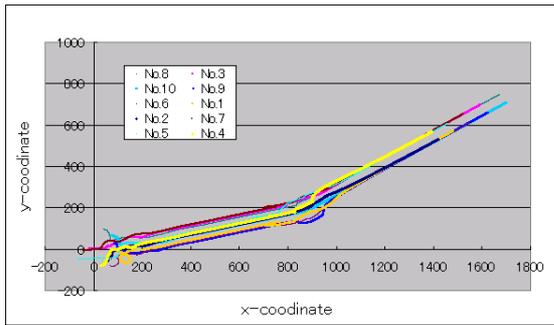


Fig. 14 formation transition

2.3.5 2列構造の拡張

最適個体間距離 r_c に方向依存性を導入した事で進行方向に対して2列縦隊構造を形成したが、直線構造を自由に記述するための拡張を行った。先ほどは個体の前後の関係が最も安定になる状態になるように指向性を調整した、ここでは、特定の方向に対しての個体同士の繋がりが最も安定な状態を保つための指向性を考える。式(7)のように最適個体間距離 r_c に導入した方向依存性 α_{ij} を進行方向に対して非対称化した。図15にそのイメージを示す。そして、非対称化した方向依存性を導入した場合の群れの構造を図16に示す。

$$\alpha_{ij} = 1 + d\cos(\beta + \delta) \quad (7)$$

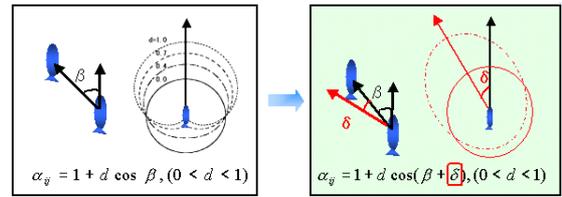


Fig. 15 asymmetric sensitivity

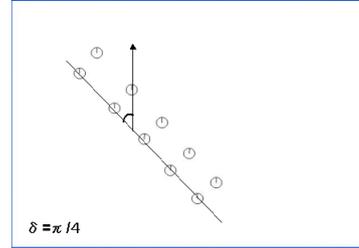


Fig. 16 gradient 2lines

3. おわりに

本研究では、Shimoyamaらの群れモデルをベースとして拡張を行い、均一のパラメータ設定を与える事で様々な群れ行動を与えることができるダイナミクスを変えずに、その内部パラメータを調整する事で群れのフォーメーションをクラスター構造から2列縦隊構造へと変化できることを示した。さらに観察された2列縦隊構造の特性を述べた。今後は、他の単純幾何学構造を記述すること、この群れモデルを実際の移動ロボットに搭載することを目指す。

参考文献

- 1) 太田 順, 新井民夫: 群知能ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, 20-5, 487/490 (2002)
- 2) 牧野, 松野: 個体への単純な仮想作用力による自律移動ロボットの群挙動の制御, 日本ロボット学会誌, 22-8, 1031/1042 (2004)
- 3) Jakob Fredslund, Maja J Mataric: A General Local Algorithm for Robot Formations, IEEE Transactions on Robotics and Automation, special issue on Multi Robot Systems, 837/846 (2002)
- 4) N. Shimoyama, K. Sugawara, et al.: Collective Motion in a System of Motile Elements, Phys.Rev.Lett., 76-20, 3870/3873 (1996)