

群れ行動の創発と自己制御性

青柳 優¹, 生天目 章²

防衛大学校¹ 理工学研究科 電子情報工学系専攻,² 情報工学科

概要

3次元空間を自由に運動するエージェントどうしの局所的な相互作用により, 集団として自己組織化された群れ行動が創発される. その群れ行動を再構成するための自律的な制御問題を扱う. まず, Reynolds が提案した群れ行動のモデル (Boids モデル) を用いて, 群れの内部の状態が時間的に一定なるような状態を保ちながら, 群れ全体として運動している定常状態に注目し, エージェント間の相互作用から群れ行動が創発されるメカニズムを理論的な側面から分析する. 群れ行動をするエージェントに, 段階的に, 新たな行動ルールを追加しながら, 障害物を回避したり, 目的地に指向するなど, 知的な群れ行動 (群知能) として発達させることを試みる.

Emergence and Self Regulating Characteristics of Flocking Behavior

Masaru Aoyagi¹, Akira Namatame²

¹ Department of Electronics, Information and Engineering Graduate School of Science and Engineering, ²
Department of Computer Science, National Defense Academy

Abstract

Flocking behavior is the phenomenon in which self-driven individuals, using limited information and simple rules, organize into an ordered motion. This ordering occurs at the dynamic level where ordering is not possible at static equilibrium of systems. This paper explores the computational and theoretical efforts undertaken to explain this flocking phenomenon. We investigate a class of local control laws for a group of mobile agents that result in global alignment their velocity vectors in convergence of their speeds to a common with collision avoidance.

1 まえがき

鳥や魚等の生物の世界においては, 様々な群れ行動が観察される. そのような群れは, リーダーのトップダウン的な指示により生まれるのではないことはよく知られている. 群れの中の個々の構成員は自律的に行動し, その行動を他の構成員が観測して自らの行動を調整する. そうした行動における相互作用の多重フィードバックによって, 集団としての群れ行動が創発される. Reynolds は, このような生物の群れ行動を模擬した "Boids" モデル [2][3] を提案した. Boids モデルは, 現在, 映画やゲーム等におけるコンピュータ・グラフィックスの群れ行動の映像表現などに広く利用されている. しかし, Boids モデルの群れ行動の創発プロセスについては, これまで, 理論的に明らかにされておらず, その制御の方法についても, 明確な提案がされていない.

群れ行動のような多重相互作用のフィードバックループから生まれる自己組織化や創発現象について理解を深め, それを工学的に応用する上で, エージェントベースシミュレーションは重要である. これは, 独自の行動ルールをもたせて自律的に行動するエージェント同士を相互作用

させて, そこから生まれる集団的な様相をシミュレーションするアプローチである. 更に, シミュレーションにて部分的に判明したことがらに基づいて, 理論的に解析し, 再度モデルを修正してシミュレーションを実施するといったスパイラルアップのアプローチが重要となる [4]. そうすることで, 自己組織化や創発プロセスを解明する上での偶発的要素を減らし, また制御の精度を向上させ, より工学的に有用性の高いモデル化が期待できる.

本研究では, 3次元空間を行動する多数のエージェントの集団による群れ行動を工学的に制御するための方法論についてマルチエージェントシミュレーションにより, 明らかにする. 特に, 後述する「群れ行動の定常状態」に注目し, 群れ行動を制御するための理論的背景について検討する.

2 Boids モデルの概要

2.1 エージェント間の相互作用

図 1 に示すように, Boids モデルの個々のエージェントは, 自分のエージェントの視界内に位置するエージェン

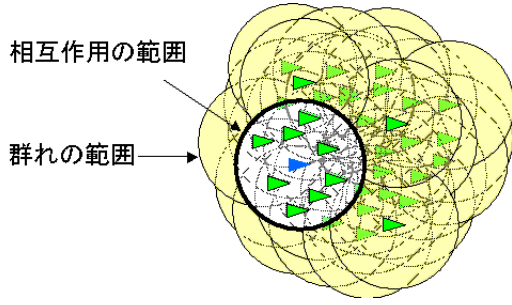


図 1: 群れの範囲と相互作用の範囲

ト (以下, 近傍のエージェント という) と局所的な相互作用をする。

そして, 近傍のエージェントとの協調や連帯意識を反映した Cohesion (結集), Separation (分離), Alignment (整列) の3つの行動ルール (以下, これらの頭文字をとって, CSA という.) をもって行動する. 集団全体における群れ行動は, 個々のエージェントの CSA による局所的な相互作用の中から, 創発される. CSA は, 力学的側面からみると, 個々のエージェントの推進力であり, それぞれ次のような働きをする.

1. Cohesion (結集) は, 周囲の他のエージェントの中心位置への引力であり, これにより, エージェントどうしは結合する.
2. Separation (分離) は, 周囲の他のエージェントから離れる斥力であり, これにより, エージェントどうしは離れる.
3. Alignment (整列) は, 周囲の他のエージェントの平均速度にあわせる向きに働く力であり, これにより, エージェントの速度が揃う.

2.2 Boids 型モデルの応用研究

多数のエージェントによる編隊行動 (群れ行動) の制御法に関して, Gage [6], Reify と Wang [7] などの研究がある. Gage は, 100 体以上のエージェントが, 目標を探索する場合の編隊行動を取上げて, Blanket Coverage, Barrier Coverage 及び Sweep Coverage の3つの隊形の制御法について報告している.

Reify と Wang は, エージェント間に「社会的ポテンシャル」と呼ばれるポテンシャル場を設け, それによる相互作用の結果, 群れ行動が創発することを示している.

Dudenhoefler ら [9] は, 社会的ポテンシャル場を拡張して, 等速度運動する多数のエージェントを等間隔に分布させることに成功している.

Olfati-Saber ら [10][11] は, 群れ行動をエージェントどうしのネットワークとしてとらえ, ネットワークトポロジーにおける, 情報伝達やロバストネスへの影響等について, 理論的に論じている.

また, われわれは, 本研究で示す成果の群れ行動の制御への応用について, マルチエージェントシミュレーションにより, その有効性を確認している [12][13]

3 定常状態にある群れ行動の解析

ある物理量について, 変化はしているが変化の様相が時間的に一定の状態を定常状態という [16]. そこで, 群れの内部状態の時間的変化をエージェントの位置の標準偏差 (回転半径) で測定し, それが一定となる状態を群れ行動の定常状態と定義する. 特に, 同種のエージェントから成る群れ行動が定常状態にあるとき, ある瞬間に群れ行動をしているすべてのエージェントに働く力の集合的な平均と, 1つのエージェントに働く時間的な平均が一致する. つまり, 群れ行動においてエルゴード性が保たれる [15].

3.1 群れ行動における力及びポテンシャル

Boids モデルにおいて, 個々のエージェントは, 近傍のエージェントの相対位置および相対速度の情報が必要であり, かつその情報に基づいて, 局所的な3つの力学的相互作用の総和として, 行動ルールが成立することを示す [14].

任意のエージェント i を基準として, 近傍のエージェント群の中心の相対位置ベクトルを \vec{D}_i , その大きさを D_i , その方向の単位ベクトルを \vec{e}_{D_i} , 平均相対速度ベクトルを \vec{V}_i , その方向の単位ベクトルを \vec{e}_{V_i} とおいて, 以下のように, 表せる.

$$\vec{F}_{ci} + \vec{F}_{si} + \vec{F}_{ai} = \left(w_c - \frac{w_s}{D_i} \right) \vec{e}_{D_i} + w_a \vec{e}_{V_i} \quad (1)$$

ただし, w_c , w_s , w_a は, CSA それぞれの力の重みであり, すべてのエージェントに共通であるとする.

式 (1) の第1項を \vec{F}_{csi} とおくと,

これは Cohesion による引力と Separation による斥力の合力であり, そのポテンシャル ϕ_{csi} は, 次式となる.

$$\phi_{csi} = w_c D_i - w_s \log(D_i) \quad (2)$$

図2に示すように, ポテンシャル ϕ_{csi} は, 最小値を1つもつ下に凸の関数となる. つまり, 近傍のエージェントとの平均距離 D_i が,

$$D_i = \frac{w_s}{w_c} \quad (3)$$

のとき, ポテンシャル ϕ_{csi} は最小となり, 安定することがわかる. この最小となる点で, ポテンシャル ϕ_{csi} は, 安定となり, 引力と斥力は釣り合う. すなわち, 定常状態の群れのエージェントの粗密は, $\frac{w_s}{w_c}$ の比で決まる.

これは, 固体物理学における結晶結合の静電エネルギーの重なりによる斥力項と, ファン・デル・ワールス力による引力項からなる原子間のポテンシャルから成る Lennard-Jones 型ポテンシャル [8] と類似するものである.

次に, 式 (1) の第2項 $= \vec{0}$, となる場合を考える. これは, エージェント i と近傍のエージェントの平均速度が一致する場合である. その1つの状態として, 全てのエージェントが等速度運動が挙げられる. また, 後述する群れ全体として円運動を示す場合のエージェントの運動もこの状態の1つである. また, 図3に示すように, w_a の値は, 式 (1) の第2項 $= \vec{0}$ に収束の速さに寄与する.

また, エージェントに, 群れ行動の相互作用ルールと同時に発火し, 競合するような, 新たな行動ルールを確率的に追加することを考える.

エージェント i には群れ行動に関する力が働いているが, それと競合する力 \vec{F}_{pi} をある確率 (以下, 想起確率という.) p_i で発火させる. この場合においても群れ行動のエルゴード性は保たれる [15].

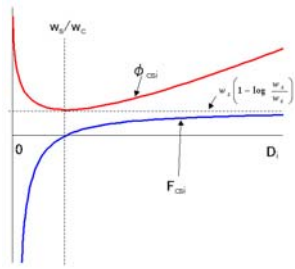


図 2: 近傍のエージェントとの平均距離 D_i に対する, Cohesion 及び Separation の合力の大きさ F_{csi} とポテンシャル ϕ_{csi} .

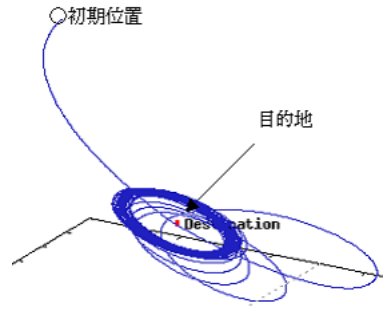


図 4: ステップ 1: 目的地を原点としたときの群れ行動の軌跡 (想起確率: $p = 0.15$) .

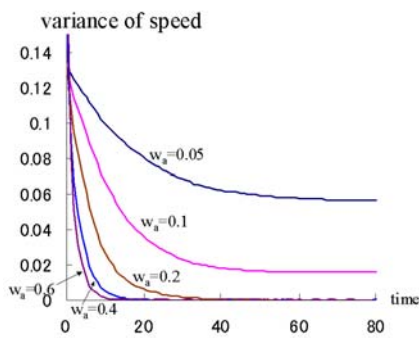


図 3: w_a を変化させたときの群れ全体の速さの分散の緩和過程の違い .

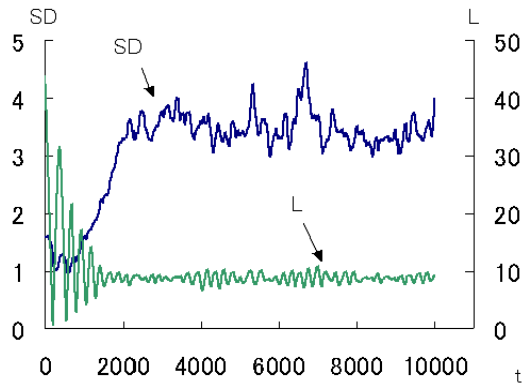


図 5: ステップ 1: エージェントの位置の標準偏差 SD 及び群れ行動の中心から目的地までの距離 L の時間的推移 (想起確率: $p = 0.15$) .

4 シミュレーション

群れ行動の定常状態の創発メカニズムの解析結果をもとにして, 3段階シミュレーションを実施している [13]. ステップ 1 では, 群れ行動の行動ルールに, すべてのエージェントがある 1 点の目的地へ指向する行動ルールを確率的に合成すると, 定常状態の円運動が創発する. ステップ 2 では, CSA の力の係数を適応的に変更することにより, 群れ行動が継続させ, 障害物回避という外部刺激に対するロバストネスを向上させる. ステップ 3 では, 図 7 に示すように, ステップ 1 の行動ルールの確率的合成による目的地への指向の占有率の軽減化と円運動の効果によって, 隘路におけるデッドロックを回避し, 更に, ステップ 2 の群れ行動の継続の効果を組み合わせて, 群れを維持しつつ, 障害物を回避して, 目的地へ向かう群れ行動を行う.

5 まとめ

エージェントどうしの局所的な相互作用の多重フィードバックにより, 群れ行動が創発する. 本研究では, Boids モデルについて, 定常状態にある群れ行動を理解し, 工学的に制御するための理論的根拠について検討した.

まず, 各エージェントは, 近傍のエージェントの相対位置及び相対速度の情報をもとにした, 局所的な相互作用に

より, 集団としての群れ行動が創発することを示した.

次に, 近傍のエージェントに対する斥力/引力の大きさの比により, 群れのエージェントの粗密が制御できることを示した. また, 群れの中心を基準としたエージェント密度分布により, 群れの内部構造や, 群れの大きさや相互作用の範囲との関係を把握できることを示した.

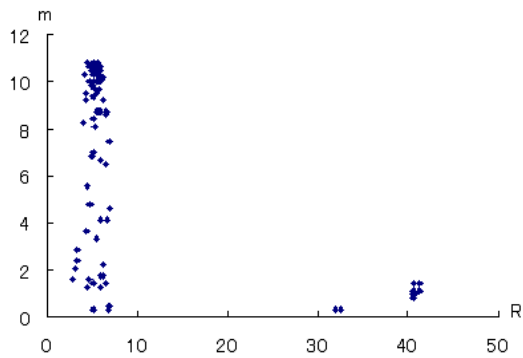
更に, 従来の Boids モデルに, 新たな行動ルールを確率的に合成することを提案し, それを目的地への指向の制御に適用すると, 群れの円運動が創発すること, 更にはデッドロックの回避への応用についてシミュレーションを実施した.

また, 行動ルールの確率的な合成は, 群れ行動のエルゴード性が保存され, 個々のエージェントを制御することにより, 定常状態にある群れ全体に働く力を制御できることを示した.

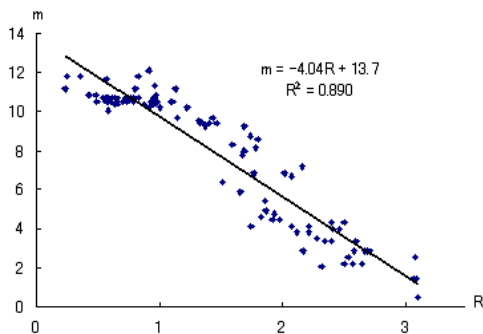
そして, 理論解析の結果を群れ行動の制御に応用し, マルチエージェントシミュレーションにてその有効性を確認した.

参考文献

- [1] 上田恵介, "鳥はなぜ集まる? —群れの行動生態学—", 東京化学同人, 1990.



(a) CSA が固定 (群れが分離)



(b) CSA を適応的に変更 (群れを維持)

図 6: ステップ 2 : エージェント密度分布 . 個々のエージェントの群れの中心からの距離 R とエージェント密度 m の関係を示す .

[2] Reynolds, C. W., "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model," in *Computer Graphics*, 21(4), SIGGRAPH '87 Conference Proceedings, pp.25-34, 1987.

[3] Reynolds, C. W., "Steering Behaviors For Autonomous Characters," in the proceedings of Game Developers Conference 1999 held in San Jose, California. Miller Freeman Game Group, San Francisco: California, pp.763-782, 1999.

[4] 金子勝, 児玉龍彦, "逆システム学," 岩波書店, 2004.

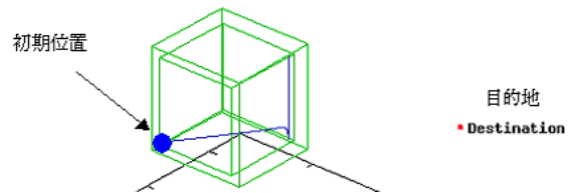
[5] 倉橋節也, 南潮, 寺野隆雄, "逆シミュレーション手法による人工社会モデルの分析," *計測自動制御学会論文*, 35-11, pp.1454-1461, 1999.

[6] Gage, D. W., "Command Control For Many-Robot Systems," *Unmanned Syst. Mag.*, vol. 10, no. 4, pp.28-34, 1992.

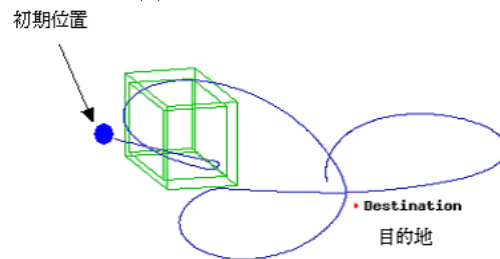
[7] Reify, J. H., H. Wang, "Social Potential Fields: A Distributed Behavioral Control for Autonomous Robots," *Robotics and Autonomous Systems* 27, pp.171-194, 1999.

[8] Lennard-Jones, J.E., *Proc. Roy. Soc.* A106, pp.463, 1924.

[9] Dudenhoefter, D. D. and M. P. Jone, "A Formation Behavior For Large-Scale Micro-Robot Force



(a) 想起確率 : $p = 1.0$



(b) 想起確率 : $p = 0.15$

図 7: ステップ 3 : 群れの軌跡 (時刻: $t = 0 \sim 1000$) . 想起確率 $p = 1.0$ のときは, 隘路の隅でデッドロックになり, 想起確率 $p = 0.15$ のときは, 隘路から抜ける .

Deployment," *Proc. of the 2000 Winter Simulation Conference*, pp.972-982, 2000.

[10] Olfati-Saber, R., J. A. Fax, and R. M. Murray. "Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems," *Proc. of the IEEE*, Jan. 2007 (to appear).

[11] Olfati-Saber, R., "Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 51(3), pp. 401-420, Mar. 2006.

[12] Aoyagi, M. and A. Namatame, "Massive Multi-Agent Simulation in 3D", *Soft Computing as Trans-disciplinary Sci. and Tec. Proc. of the 4th IEEE International Workshop*, pp.295-305, May 2005.

[13] Aoyagi, M. and A. Namatame, "Self-Guidance of Massively Flocking Behavior", *Proc. of the International Joint Workshop on Massively Multi-Agent Systems and Challenges in Large-Scale Coordination in Multi-Agent Systems*, pp.111-123, May 2006.

[14] Aoyagi, M. and A. Namatame, "Dynamics of Emergent Flocking Behavior", *Proc. of 7th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI 2006)*, pp.557-563, Sep 2006.

[15] 青柳優 and 生天目章, "相互作用ルールの適応による群れ行動の自律的制御", *Proc. of Joint Agent Workshop and Symposium (JAWS) 2006*, Oct 2006.

[16] 岡部拓也, "熱力学の基礎", 丸善, May 2002.