

スケールフリー性による魚群モデルの再構築に向けて Toward the reconstruction of fish school model with the scale-free property

坂本 佑樹^{*1}
Sakamoto Yuki

高橋 達二^{*2}
Tatsuji Takahashi

^{*1} 東京電機大学大学院
Graduate School of Tokyo Denki University

^{*2} 東京電機大学
Tokyo Denki University

Since the Boids model was proposed by Reynolds, grouping behavior of animals and agents have been studied. Recent improvement in movie analysis enabled the discovery of scale-free correlation and phase transition in real flocks. However, the comparison of the existing models of flocking behavior with consideration of the newly found properties has not been comprehensively done. This is what this study does.

1. はじめに

自然界では様々な生物が群れを作り、まるで1つの意志を持った生命体のような振る舞いを見せる。この現象は人々の心を惹きつけ、群れの観察や研究が昔から行われてきた。研究の中で自然界の群れ行動は、リーダーの動きに各個体が追従するといったいわゆるトップダウン的なシステムではなく、各個体の簡単な相互作用のみで集団行動が創発されるボトムアップ的なシステムとする見方が有力とされてきた。その中でもボトムアップ的なシステムを主張する、Reynolds によって Boids モデルが提案されて以来、さらに様々な角度から群れの研究が行われてきた [Reynolds 87]。

しかし研究の拡大の一方で、計算機上に「再現」された「群れ」を自然界の生物の群れ行動と「実証的」に比較し評価することは、実測データの取得/解析の困難さから現在までほとんど研究されてこなかった。こうした比較なしでは自然界の群れ行動の原理の追求はもちろんのこと、その再現とされる群れ(群知能)シミュレーションの妥当性も実証的に確かめることはできない。これにより群れ行動の研究が各研究者の「主観」によるものに留まり、今後の応用/発展への大きな妨げとなることが危惧される。

そこで本稿では 2010 年に Cavagna ら研究グループが発表した自然界(実世界)の「ムクドリ」の群れに対する実測データと、彼らがそこから実証的に示す「群れの中の群れ」という現象に着目する。群れの中の群れとは、現実の群れの中に、群れ全体の平均的な動きとは違った、固有の動きをする箇所が存在し、それが群れ全体の大きさに対し、一定の割合の大きさで発現することをいう [Cavagna 10]。

そしてこの現象が群れモデルによって再現でき、またそれに基づいて計算されるある種の統計量が自然な群れ、群れらしい群れが形成されたことを客観的に示した上で、各モデル間の比較を行う。各モデルの検証は今までは行われていなかった。本研究では群れの中の群れに重点を置いて各モデル間で比較検証を行い、モデル間の差異、またエージェントの動きと群れの形成に必要な条件を考察した。

2. 群れ中の群れと使用モデル

群れの中の群れを図 1 から説明する。図 1 の左の図はある瞬間のムクドリの群れから、単位時間後のムクドリの群れとの差から得られる速度変異の分布である [Cavagna 10]。ここから、各個体の速度ゆらぎを割り出す。速度ゆらぎとは、群れ全体の平均速度(すべての個体の速度を足して個体数で割ったもの)と、

各個体の速度との差である。これが右の図となる。この右の図から群れの中にもう1つの群れと言うべき、速度ゆらぎが他と大きく異なる個体の集団が現れる(丸で囲んだ部分)。これが群れの中の群れなのである。群れのある領域のみが特異的に同期し、同じ向きに向かって運動している。群れは均一な存在ではなく、何らかの構造を持っているのである。またその時、群れ全体の大きさ L (群れに属する個体間の最大距離)に対して群れのなかの群れの大きさ L_c の割合 ($L:L_c$) が、群れのスケールと関係なく一定で表れる。例えば、直径 10 メートルの群れなら 1 メートル、直径 100 メートルの群れなら 10 メートル、など。このように群れのサイズと群れの中の群れのサイズが相関することをスケールフリー相関と呼ばれている。すなわち、群れはサイズに無関係に保存される部分と全体の関係を持っているのである。

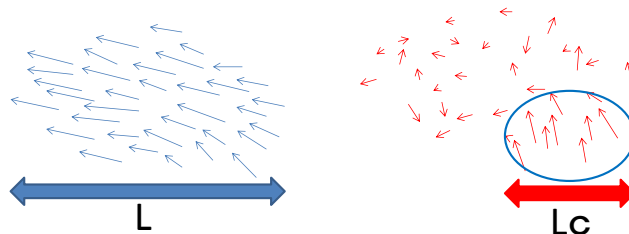


図1: 速度分布(左)と速度揺らぎ(右)の分布。どちらも同じ群れの状態の情報である。

2.1 Boids モデル

Boids モデルの特徴は分離、整列、結合の3つの単純な規則で相互作用を図る点で、他個体と方向及び速度を合わせようとする、整列規則は今日のほぼ全ての群れモデルの相互作用の基本となっている。

- 分離 (separate): 接触しない様に分離範囲内の個体から離れようとする
- 整列 (align): 近傍範囲内の個体と向きや速度を合わせようとする
- 結合 (cohere): 近傍範囲内にある他の個体の中心方向に近づこうとする

Boids モデルのアルゴリズムを以下に示す。

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \quad (1)$$

$\vec{x}_i(t)$ は時刻 t での個体 i の位置であり、 $\vec{v}_i(t+1)$ は時刻 $t+1$ での個体 i の速度ベクトルである。個体 i は自分を中心とした

3つの範囲 R_{sep} , R_{ali} , R_{coh} を持ち、それぞれの範囲内の個体と相互作用を行い、 $\vec{v}_i(t+1)$ を求める。

2.2 metric 近傍と topological 近傍

群れ個体が他個体の情報を参照し相互作用する際に用いる近傍の定義は大きく分けて2つの種類に分けられる。一つは metric 近傍と呼ばれる。これはある半径範囲内にある全個体を含むため、一つの大きな群れに集まりやすい性質を持つ。もう一つは topological 近傍と呼ばれ、近年 Ballerini らによって導入された[Ballerini 08]。これは固定された半径でなく、最も近い個体から数体目までを含むものと定義される。そのため、この近傍を相互作用の範囲とする個体は離れた他個体や群れとも相互作用する。

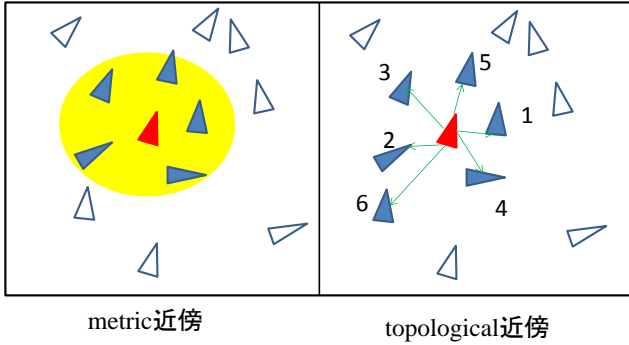


図2: metric 近傍と topological 近傍

2.3 Metric-topological interaction モデル

新里が考案した Metric-topological interaction (MTI) モデルは、metric 近傍と topological 近傍を条件式で切り替えて用いているモデルである[Niizato 11]。topological 近傍を用いる場合、近傍内のある個体の向きと近傍内の平均方向との差が閾値 a 未満ならば metric 近傍に切り替える。逆に metric 近傍を用いる場合は、近傍内の2体の個体の方向の差が、閾値 b より大きければ topological 近傍に戻る。

$$\vec{v}_k^{t+1} = \vec{v}_k^t + \langle \vec{v} \rangle_{N-TOP} \Delta\theta \quad (2).$$

$$if(\exists i \in N - TOP, |\theta_i^t - \langle \theta \rangle_{N-TOP}| < a) \quad (3).$$

$$N - TOP \equiv \{l \in N \mid rank(l) \leq 6\} \quad (4).$$

個体 k は最初 topological 近傍を用いる。この近傍は、 k から近い順に6体選び、その個体を近傍内の個体とする。 $\langle \vec{v} \rangle_{N-TOP}$ は近傍内の個体の速度ベクトルの平均を表す。数式(2.6)は次の時間ステップの速度ベクトル \vec{v}_k^{t+1} を求める式であり、現在の速度ベクトルと近傍内の個体の速度ベクトルの平均の和、つまり整列規則で求めている。数式(2.7)は topological 近傍の際の条件式で、相互作用を行った後にこの条件式を用いる。個体 k の近傍内のあるランダムに選択した個体 i の向きと近傍内の個体の平均の向きの差が閾値 a 未満である場合、次の時間ステップで使用する近傍を metric 近傍に変化させる。

$$\vec{v}_k^{t+1} = \vec{v}_k^t + \langle \vec{v} \rangle_{N-MET} \Delta\theta \quad (5).$$

$$if(\exists i, j \in N - MET, |\theta_i^t - \theta_j^t| > b) \quad (6).$$

$$N - MET \equiv \{l \in N \mid 0 < |\vec{x}_k - \vec{x}_l| \leq R\} \quad (7).$$

metric 近傍を用いる場合、個体 k を中心とした半径 R の範囲を近傍とする。 $\langle \vec{v} \rangle_{N-MET}$ は近傍内の個体の速度ベクトルの平均である。相互作用後に数式(2.11)を用いて metric 近傍から切り替えるかを決める。個体 k の近傍内の個体からランダムに選んだ2体の方向の差が閾値 b より大きいのであれば、次ステップ時間に用いる近傍を topological 近傍に変化させる。

2.4 限定された相互作用のモデル

MTI と同時期に、Bode は限定された相互作用を行う群れモデル (LI モデル) を考案した[Bode 10]。このモデルの特徴は、確率的かつ非同期的な相互作用を行うという点にある。

更新する個体 i をランダムに選ぶ

個体 i の近傍範囲内から個体 j を選択する

個体 j と整列し、個体 i を更新する

から3. までの動作を特定の回数繰り返す

更新する個体 i が選ばれる確率は全個体で等しく、また、個体 j が選ばれる確率は ij 間の距離に依存し、距離が短いほど個体 j が選ばれる確率は高くなる。更新する個体 i は毎回ランダムに選ばれるため、ある時間ステップ内で複数回更新した個体や一度も更新しなかった個体など、更新回数に個体差が発生する。

3. スケールフリー相関の実験

群れにおけるスケールフリー相関の概念は Cavagna らによって導入された[Cavagna 10]。相関関数を定義する前に、各パラメータを定義する。まずは相関関数に必要な u_i を定義する。

$$u_i = V_i - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N V_k \quad (8).$$

ここで N は群れの全匹数であり、全エージェントの数である。ここでの u_i は個々の速度ベクトル V_i (i は 1 から N) から全体の速度ベクトルの平均値を減算することで得られる。

次に、相関関数 $C(r)$ を定義する。

$$C(r) = \frac{\sum_{ij} u_i \cdot u_j \delta(r - r_{ij})}{\sum_{ij} \delta(r - r_{ij})} \quad (9).$$

各エージェント間の距離は r_{ij} で定義される。 δ 関数は $r = r_{ij}$ のとき $\delta(r - r_{ij}) = 1$ 、それ以外は $\delta(r - r_{ij}) = 0$ で定義される。Cavagna らが定義した現実の群れは、 r の増加と共に減衰する相関関数を持っている。距離が離れると値が減少していき、最終的には負の値になる。これは個体間の距離が近い時は、それらの速度が強く相関しており、個体間の距離が遠い時は相関があまり見られないことを示している。これらを相関長と呼ぶ。 $C(r)$ が0になった時の個体間の距離が相関長となる。ここで $C(r=\xi) = 0$ を満たす ξ の値を算出することにより、個体間の相関する範囲を見ることが出来る。Cavagna らはこの相関長が群れサイズに比例することを示した。群れサイズ L は群れに属する二つの鳥の間の最大距離を計算することで求める。これを L と表す。相関長と群れサイズの関係は $\xi = cL$ で表される。ここにおける c は傾きである。

現実のムクドリ群れにおける、比例定数の値は $\xi = 0.353 \pm 0.022$ であった。ここでは各モデルにおける ξ の値の違いを比較検証し、また群れと個体の両義性について考察する。

4. シミュレーション設定

フィールドの範囲は、 2000×2000 であり上端と下端、左端と右端が繋がっている。個体の速度 V は4.0に固定した。個体の初期位置及び向きはランダムである。比較対象は Boids モデル、MTI モデル、LI モデルの3種類の群れモデルを使用した。MTI モデルで用いる閾値 a と b は[新里 12]に従い、 $a = 0.05$ 、 $b = 0.10$ に設定した。他モデルと更新頻度を揃えるため、LI モデルの1ステップ時間ごとの更新回数は400回に設定した。

この論文では個体の数を $N = (30, 40, 60, 80, 100)$ とし、それぞれ100回のシミュレーションを行った。各 N を100回シミュレートし、モデルごとに500回のシミュレーションの結果を示す。

5. シミュレーション結果

図 3, 4, 5, 6 にそれぞれ MTI, Boids, LI のシミュレーション結果を示す。縦軸は相関長であり、横軸は群れのサイズである。グラフの右下に行くほど相関長が短く、群れサイズが大きくなる。図 3 より MTI では群れのサイズが大きくなるに従い、相関長が長くなるのが分かる。つまり群れの大きさに比例して、各個体が相互作用をしている距離も大きくなる。このことから MTI にスケールフリー相関は見られた。スケールフリー相関が出現する条件として、群れを維持したまま方向転換が出来ることが挙げられる。方向転換時、前方また、後方の部分にスケールフリー相関は現れるのではないかと考えられる。この点、MTI は metric 近傍と topological 近傍を切り替えて方向転換が可能になっていると考えられる。それに対し、図 6 の LI は群れのサイズが大きくならず、また相関長も群れの大きさと比例していない。これは更新する個体がランダムに選ばれるので、群れに所属する全個体が更新出来ず、群れが大きくなれないためと考える。方向転換時、全個体が向きを変えるには、全個体が更新しなければならない。LI は全個体が更新を行うには確率が関わってくる。そのため、LI ではスケールフリー相関が見られなかったと考えられる。また整列相手も確率的に選ばれるので、相関長も安定していない。次に図 4, 5 の Boids は群れの形成は確認出来たが、スケールフリー相関は metric 近傍でも topological 近傍でも見られなかった。

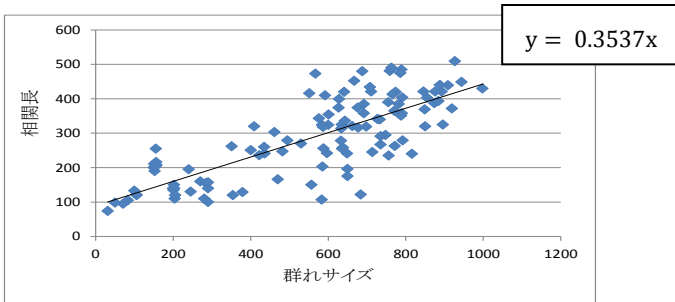


図3:MTI モデル

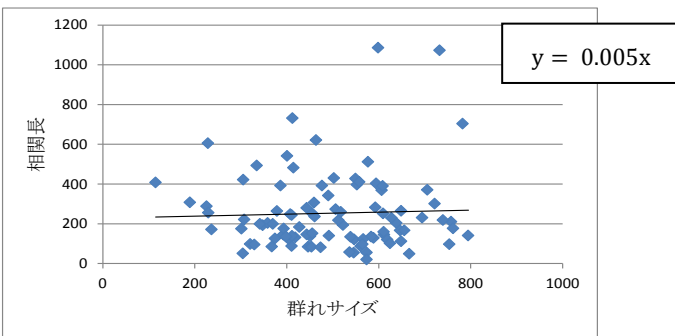


図4 Boids (metric)モデル

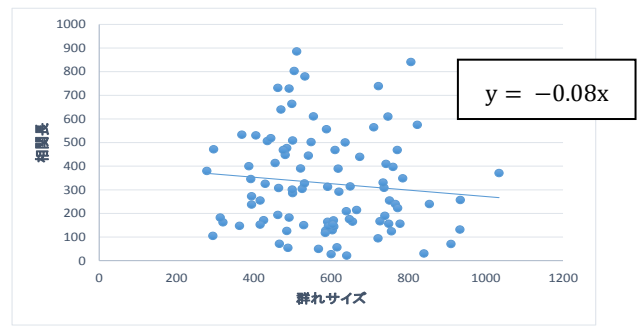


図5:Boids(topological)モデル

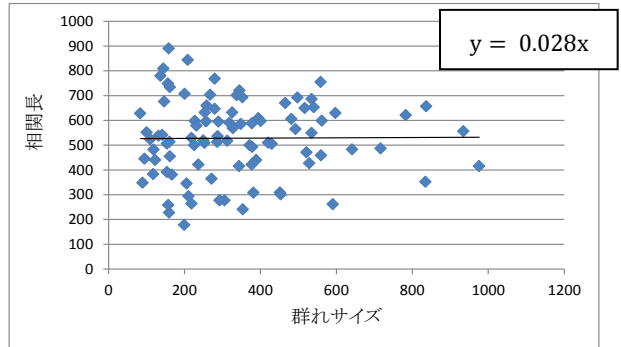


図6:LI モデル

6. おわりに

本稿ではスケールフリー相関に重点を置いて、モデルの比較を行った。その結果 LI モデルの非同期的な更新では相関長と共に群れのサイズが大きくなる。また、Boids モデルのような metric 近傍のみ、また topological 近傍のみでもスケールフリー相関は見られない。

このことから群れの形成と相関長の関係は近傍の組み合わせもしくは、同期方法が影響することが判明した。今後はどちらがより強く影響を及ぼしているのか検討したい。

参考文献

- [Reynolds 87]Reynolds, C. W. Flocks, herds, and schools: a distributed behavioral model.Computer Graphics 21, 25-33 (1987).
- [Cavagna 10]Cavagna, A et al. (2010): Scale-free correlation in the bird flocks. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A, 2010
- [Ballerini 08]Ballerini M., et al. (2008): Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: evidence from a field study, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 105, 1232–1237, 2008
- [Niizato 11]Niizato.T,Gunji.P (2011): Metric–topological interaction model of collective behavior. Ecological Modelling 222 (2011) 3041–3049.
- [Bode 10]Bode, W.F.N, et al. (2010): Limited interactions in flocks: relating model simulation to empirical data, J. R. Soc. Interface (Published Online).
- [新里 12]新里高行 (2012): タイプ・トークンの相互作用から見た集団現象の創発,神戸大学大学院理学研究科学学位論文.