3T-5

群れ挙動におけるスケールフリー相関

scale − free correlation in flocking models

坂本　佑樹†　　高橋　達二‡

東京電機大学†

1. はじめに

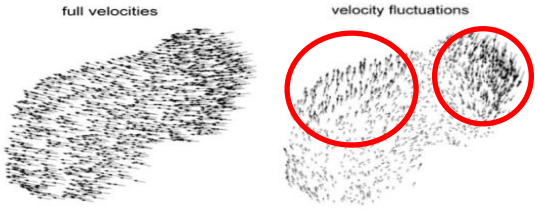
*Reynolds*による*Boids*モデルの提案以来, 様々な角度から群れモデルの研究が行われてきた.

群れとは個体の集合体である. では個体はどのように群れを形成しているのだろうか. [5]近年の研究により, 現実の動物の群れの中に, 群れ全体の動きとは違った, 固有の動きをする箇所, いわば群れの中の群れが発見された. また群れ全体の大きさに対し, 群れの中の群れの大きさが一定の割合で発現するという報告もある. これは群れの動きと個体の動きに何かしらの関係があるということである. これにより, 群れの形成に個体の動きが深く関わっていることが確認された.

今まで群れの中の群れを踏まえた上で, 各モデル間の比較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, また各モデルの問題点を考察し, エージェントの動きと群れ形成に必要な条件を考察した.

2. 群れの中の群れ

群れの中の群れを具体的に言うと, まず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を求める(これを個体のもつ速度ゆらぎという). なお, 速度とは速さと方向であり, 長さと矢印で示される. 例えば, ムクドリの群れの, 時間差をもつ [5]2枚のスナップショットから, 各個体の速度ゆらぎを割り出してみると, 群れの中にもう一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(領域)があらわれる. (図:1)その時, 群れ全体の大きさLに対する「群れのなかの群れ」の大きさLcの割合(L: Lc)が, 群れのスケールと関係なく一定で表れる. (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)そこにスケールフリー相関がある.



[5]図1: 2枚のスナップショット

左の図は、個々の個体の方向と速度をベクトルで表わしている。右は、同じ瞬間における個々の速度の変動を表している。

3. 使用するモデル

3.1 *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, 特に他個体と方向及び速度を合わせようとする, 整列規則は現在の群れモデルの相互作用の基本となっている.

3.2 *Metoric*近傍と*Topological*近傍

群れモデルが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. 1つは*Metoric*近傍と呼ばれる. これは範囲内にいる全個体と相互作用を行うというもの. *Metoric*近傍は1つの大きな群れに集まりやすい性質を持つ. [4]もう1つは*Topological*近傍と呼ばれ, 近年*Ballerini*によって発見された. これは距離に関係なく最も近い個体から数体選択して相互作用を行う. 離れた個体や群れとも相互作用を行える性質を持つ.

3.3 種の近傍の中間的な性質を持つモデル

3.3.1 *Metric* − topological interactionモデル

2010年に新里高行が考案した[1] *Metric* − topological interactionモデル(*MTI*モデル)は, *Metoric* 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. *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*Metoric*近傍に切り替える. 逆に*Metoric*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.

3.3.2 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のモデル(*LI*モデル)[4]を考案した. 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.

1. 更新する個体iをランダムに選ぶ
2. 個体iの近傍範囲内から個体jを選択する
3. 個体jと整列し, 個体iを更新する
4. 1. 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.

4. 実験

4.1 スケールフリー相関

スケールフリー相関は*Cavagna*によって [5]定義された. 相関関数を定義する前に, 各パラメータを定義する.

$$U_i = V_i - \frac{1}{N}\sum_{K=1}^{N} V_k \qquad (1).$$

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は各エージェントの番号)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. いわゆる速度ゆらぎが求まる.

Copyright ©2014 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

次に，相関関数$C_{(r)}$を定義する．

$$C_{(r)} = \frac{\sum_{ij} u_i \cdot u_j \delta(r - r_{ij})}{\sum_{ij} \delta(r - r_{ij})} \quad (2).$$

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．$Cavagna$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，大きく相関していて，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．非相関距離があるので，相関関数の値は滑らかに減少する．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．式は次のように満たされなければならない．

$$C_{(r=\xi)} = 0 \quad (3).$$

(3)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したことを示した．群れサイズ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まる．これをLと表す．次に相関長と群れサイズの関係を式で示す．

$$\xi = aL \quad (4).$$

現実の群れにおける，比例定数の値は0.353 ± 0.022である．今回は各モデルにおける違いを比較検証し，また群れと個体の両義性について考察する．

4.2 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完全にランダムである．

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は新里高行の論文に従い，$a = 0.05$，$b = 0.10$に設定した．他モデルとの更新頻度を平等にするため，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$N = (30,40,60,80,100)$に群れの数を変化させ，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

以下にシミュレーション結果を示す．縦の軸が相関長であり，横の軸が群れのサイズである．

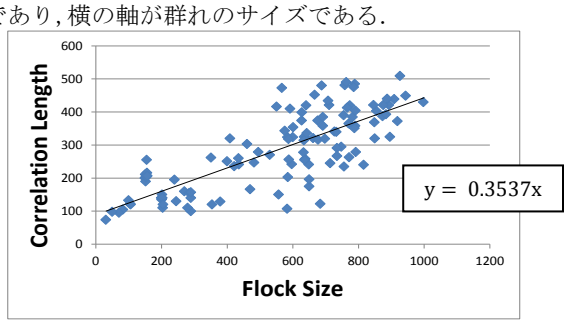


図 2: MTIモデル

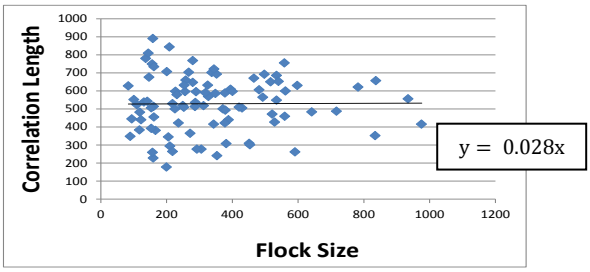


図 3: LIモデル

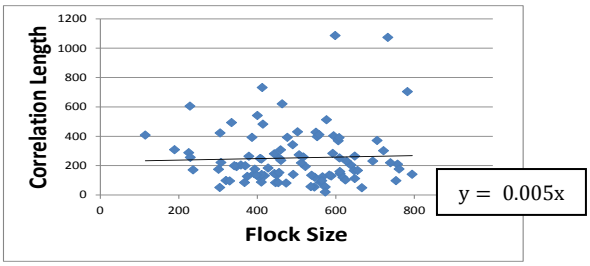


図 4: $Boids$モデル

MTIモデルは群れのサイズが大きくなるに従い，相関長が長くなることが分かる．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．これは群れ全体の動きと各個体の動きが関係を持っていることを示している．それに対し，LIモデルはさほど群れが大きくならず，また相関長も群れの大きさと比例していない．これは個体の動きが大きく，群れが形成されにくいことが分かる．だが，各個体は離れた距離でも相互作用を行っている．個体の動きは重要だが，個体の動きが大きすぎては群れの維持には繋がらない．次に$Boids$モデルは群れの形成は確認出来たが，群れと個体の関係性は見いだせなかった．

このことから群れ形成時．LIモデルは個体間の相互作用する力が強すぎる．しかし，$Boids$モデルのように個体間の相互作用する力が弱すぎると群れから個体という概念がなくなる．群れのための個体となってしまう．

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各モデルの比較を行った．これにより群れ形成に必要な近傍と群れの維持に必要な近傍は異なるということが確認された．MTIモデルはその点を的確に表現していると言えるだろう．

参考文献

1) Niizato.T,Gunji.P：Metric–topological interaction model of collective behavior. *Ecological Modelling* 222 (2011) 3041– 3049,2011
2) 新里高行：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位論文,2012
3) Bode, W.F.N, Franks D.W., Wood A.J.：Limited interactions in flocks: relating model simulation to empirical data, *J. R. Soc. Interface* (Published Online), 2010b
4) Ballerini M., Cabibbo V., Candelier R., Cisbani E., Giardina I., Lecomte V., Orlamdi A., Parisi G., Procaccini A., Viale M., Zdravkovic V. : 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, 2008a
5) Cavagna, A, Cimarelli, C., Giardina, I., Parisi, G., Santagati, R., S. F., and Viale, M. 2010,Scale-free correlation in the bird flocks. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.

Copyright ©2014 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.