7P-08

スケールフリー相関を軸にした群れモデルの再構築

坂本 佑樹 *1　高橋 達二 *2

*1東京電機大学大学院　*2東京電機大学

1. はじめに

自然界における生き物の群れは実に多彩な動きを見せる．群れの動きに魅せられ, 様々な角度から群れに対する研究が行われてきた．研究の中で Reynolds が Boids モデルが提唱し, 群れモデルとして群れの研究がさらに活発に行われるようになった [Reynolds 87].

しかしながら, 群れモデルの外見的な模倣については追求されてきたが, 現実における群れデータの取得の困難さから, 群れの中で何が起こっているのか未だ不明瞭な部分がある．群れの外見的な模倣ではなく, 群れの内部における動作の模倣を本研究では目指す.

群れの内部動作の一種の定義としてスケールフリー相関に焦点をあてる．Cavagna らによって定義された概念で, ムクドリの群れの中に群れ全体の平均的な動きとは異なり, 群れの中の群れと呼ばれる固有の動きをする領域が発見された．「群れ全体の大きさ」と「群れの中の群れの大きさ」が相関関係にあり, この相関関係が一定で表れる現象をスケールフリー相関と言う [Cavagna 10]．Cavagna らはこの現象からムクドリが一種の臨界系ではないかと説明している．個々の相互作用のみでこの現象を分析し, 表現できれば, 群れの内部動作の模倣へ近づくのではないかと考える.

スケールフリー相関の発現が確認されているモデルとして二種の近傍を切り替え用いる Metric-Topological Interaction モデル (MTI モデル) が 2011 年に新里によって考案された [Niizato 11].

しかしながら, MTI モデルは二種の異なった近傍を使い分けるといった複雑な定義を持ち, スケールフリー相関の発現が何に依存しているのか不明瞭であった．また, 個体が近傍を瞬時に切り替えているが, 現実で可能かどうか分からない問題点もある．MTI モデルを構成するどの要素がスケールフリー相関に関与しているのか調べる必要がある．MTI モデルの特徴をスケールフリー相関の観点から抽出し, より自然で簡易的なモデルの提案を行った.

2. 群れらしさとスケールフリー相関

アリやハチ, シロアリといった社会性昆虫は, 群れを成し生活している．まるで全体が一つの目標を持って振舞っているように見えるが実際は目標を持たず簡単な個々の相互作用のみで群れを形成している．こういった現象は様々な分野で応用され, 群行動への関心は高まっている.

群行動の模倣として群れモデルが出現し, Boids モデルを筆頭に様々なモデルが提案されてきた．しかし, 最近のムクドリの野外観測データ (スケールフリー相関) から, Boids モデルのように近傍を固定円としてとらえるという考え方や, 外的ノイズをランダムとするという考え方に疑問があがってきている.

スケールフリー相関とは群れ内部における個々の速度ゆらぎが広範囲で群れに影響を与える相関関係を持っており, 群れ全体の大きさ L に対して, 「群れの中の群れ」と呼ばれる速度ゆらぎが他と大きく異なり相関している領域 (個体の集合) の大きさ Lc の割合 ($L : Lc$) が, 群れのスケールに依存しないというものである [Cavagna 10]．速度ゆらぎは個々の速度ベクトルから群れ全体の平均速度ベクトルを引いたもので定義される．また, このとき得られた L:Lc の傾きの値を本研究ではスケールフリー相関係数と定める.

これまで群れのダイナミクスであると明確に定義できる指標というべきものが殆ど無かった中で, このスケールフリー相関は群れであることに対する実証的な研究も可能とする.

3. スケールフリー相関

スケールフリー相関を表している群れモデルとして MTI モデルがある．この MTI モデルを解析し, MTI モデルにおける内的の動作について追求していく.

3.1 Metric 近傍と Topological 近傍

群れモデルにおいて各個体を相互作用させる際に用いられる近傍設定は, 大きく分けて二種類に分類される.

一つ目は Metric 近傍と呼ばれ, 個体から一定の範囲内に存在する全個体を対象として, 相互作用を行うものである．二つ目は Topological 近傍と呼ばれ, 距離に依存せず最も近い個体から数体選択して相互作用を行うものである.

3.2 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].

MTI モデルの動作において, Topological 近傍を用いる場合, 更新個体が近傍内の他個体の向きと近傍内の平均方向との差が閾値 ζ 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, 近傍内の二体の個体の方向の差が, 閾値 ζ より大きければ Topological 近傍に戻る.

MTI モデルは Metric 近傍に従う相互作用と Topological 近傍に従う相互作用が, 周辺環境によって, それぞれの個体において切り替わることで, 近傍の範囲が常に調節され, 結果, 群れが一つの個体として振る舞うモデルである.

3.3 MTI モデルにおける問題点

ムクドリから得られたスケールフリー相関係数は約 0.35 であり, MTI モデルにおいてこの 0.35 と一致した結果が得られている．しかしながら, これはあくまで数値が一致したのみであり, 個体の動きがムクドリの物と一致した訳ではない．近傍の切り替えなど問題点もある.

"Reconstruction of the flock model in which the scale-free correlation to the axis", Sakamoto Yuki , Graduate School of Tokyo Denki University , Takahashi Tatsuji , Tokyo Denki University

Copyright ©2016 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

4. 内的な仮説と提案モデル

近傍の切り替えるという特徴を持つ MTI モデル．しかし, 本当に近傍の切り替えという動作を群れに属する個体は行っているのか．一瞬の内に近傍を切り替えるという行動を実際の生物が行っているとは考えにくい．果たして本当に, 近傍の切り替えは必要なのであろうか．そこで Metric 近傍使用時, 仮想で Topological 近傍のベクトルを計算, また Topological 近傍使用時, 仮想の Metric 近傍も計算し, 近傍毎にどれだけベクトルに差が存在しているのか表１に示した．ここでは個体が Metric 近傍使用時を『M-T』, Topological 近傍使用時を『T-M』とする．

表 1: x 軸における近傍ごとのベクトル差

近傍	ベクトル差		
	[-0.18 , -0.1)	[-0.1 , 0.1]	(0.1 , 0.18]
M-T	71	32525	106
T-M	2903	62818	1463

表 2: y 軸における近傍ごとのベクトル差

近傍	ベクトル差		
	[-0.35 , -0.1)	[-0.1 , 0.1]	(0.1 , 0.3]
M-T	31	32638	35
	[-0.5 , -0.1)	[-0.1 , 0.1]	(0.1 , 0.3]
T-M	3597	61357	2237

表１を見ると [-0.1 , 0.1] に存在する個体が多く, 近傍毎の差はあまりないと考えられる．つまりはどちらの近傍でも良いということになる．しかし, ベクトルの差が大きくなっている箇所も存在している．その部分を観察すると, 自身と周囲との進行方向に差があるときに近傍の違いによるベクトルの差が大きくなっていることが確認された．しかし, それでも大きな差ではなく, ２種の近傍を切り替えるのではなく２種の近傍が共存しているのではないかと考えることができる．

4.1 Weighted Metric-Topological Interaction モデル

観察結果から, 近傍２種は必要であるものの, 完全に近傍を切り替えるという点については必要性がみられなかった．このことから, Weighted Metric-Topological Interaction モデル (以下 WMTI モデル) を提案する．WMTI モデルの特徴として, 周囲との角度差によって Metric 近傍と Topological 近傍で得られたベクトルを重みをつけて合成する点にある．これにより, ２種近傍を使用しつつ, 角度差によってどちらを重視して自身の行き先を決めることが可能になった．

5. 結果

図１に WMTI モデルにおける閾値 $\zeta = 0.05$, 合成比率が, 自身と周囲との角度差があるとき [Metric 近傍 0.9, Topological 近傍 0.1], 自身と周囲との角度差がないとき [Metric 近傍 0.1, Topological 近傍 0.9] におけるスケールフリー相関のシミュレーション結果を示す．縦軸が相関長 (Lc), 横軸が群れの大きさ (L) を表わす．これはムクドリの群れから得られた実測値比の値 0.353 ± 0.022 のものとほぼ一致していることが確認できる．また図２は閾値を 0.01 刻み変化させ, かつ同じ合成比率でシミュレーションを行った結果である．縦軸は得られたスケールフリー相関係数, 横軸は閾値である．閾値 $\zeta = 0.05$ のときが一番ムクドリの実測値と近いことが確認できる．

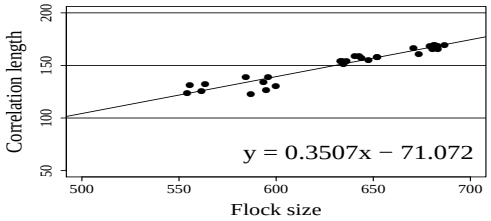

図 1: WMTI モデルにおけるスケールフリー相関

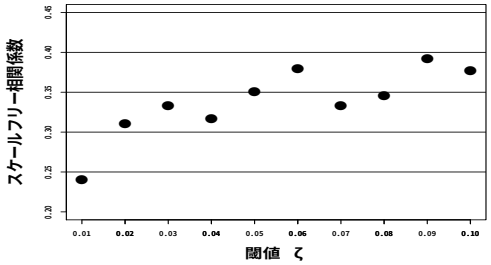

図 2: 閾値 ζ に対するおけるスケールフリー相関係数

6. 考察

WMTI モデルに導入した近傍の共存はムクドリの物と一致した．結果からスケールフリー相関には２種の近傍の必要性があるということなる．現実のムクドリでもこの２つと似たような近傍を持っているのではないかと考えられる．また角度差 0.05 が現実のムクドリでも自分自身の動作の判断材料になっている可能性がある．しかし, 一瞬で切り替えるという点について解消されておらず, 更なる分析が今後必要になる．

参考文献

[Ballerini 08] Ballerini, M., N. Calbibbo, R. Candeleir, , : Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study. *PNAS* 105: 1232–1237 (2008).

[Cavagna 10] Cavagna, A., A. Cimarelli, I. Giardina, G. Parisi, R. Santagati, F. Stefanini, and M. Viale. : Scale-free correlations in starling flocks. *PNAS* ,107: 11865–11870 (2010).

[Reynolds 87] C. W. Reynolds, : Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques(SIGGRAPH '87)* , 21:25–34 (1987).

[Niizato 11] Niizato.T,Gunji.P:Metric–Topological interaction model of collective behavior. *Ecological Modelling*, 222, 3041–3049 (2011).

Copyright ©2016 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.