

アクティブエレメント集合体によるパターンと機能の創発

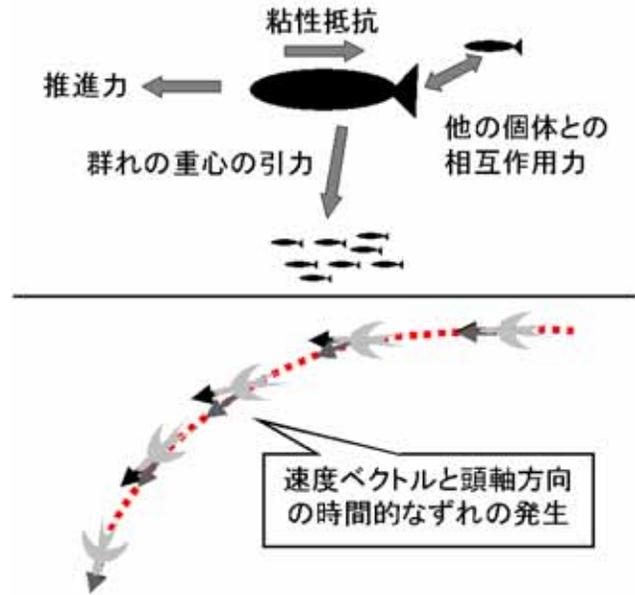
菅原 研、†水口 毅、‡早川美徳、*佐野雅己

東北学院大学教養学部、†大阪府立大学大学院工学研究科

‡東北大学大学院理学研究科、*東京大学大学院理学系研究科

1 はじめに

生物には、群れて行動する特性を示すものが多く見られる。人間をはじめ、多くの鳥や魚、昆虫にも見られ、中には蟻や蜂のような社会的秩序構造を持つものもある。単純な個体の集合体が相互作用により複雑な振る舞いを示す「群知能システム」の研究は、近年、様々な分野で盛んに進められている。本稿では簡単な動力学特性を組み込んだ「群れ」の挙動について論じるものである。前半は、シンプルな力学特性を用いて、各個体のダイナミクスを記述し、行進や迷走、蚊柱など、生物が示すような様々な群れの運動が発現することを示す。後半は、ストック物質と動的なポテンシャル場を用いて、社会性昆虫が示すような分業モデルについて論じる。特に外乱に対してロバストに比率を調整するモデルの比率制御特性についてシミュレーションとロボットによる検証実験を行った例を示す。



2 群れ行動を示す非線形動力学モデル

鳥、魚、昆虫には集団で行動するものがあり、秩序だったものから一見無秩序に見えるものまで、その振る舞いは様々である。しかし群れとその集団運動が示す多様な形態と特徴を、物理的な観点から捉えることで、動物の種によらない共通した力学的規則があるようにも見える。そこで、できるだけ最小限の力学的仮定から出発して様々な群れのパターンと運動を構成することを試みる。

2.1 モデル

これまで生物の群れ行動を記述する様々なモデルが提唱され、研究されてきた。特に Reynolds が示した Boid は単純なルールの組み込みにより、リアルな鳥集団の行動が再現され、注目を浴びた [1]。群れ行動の物理的特性を解析したとして、Viscek らは、向きだけの単純なモデルにおいて、ノイズの大きさによって集団行動の相転移が見られることを示した [2]。また、三宮らは、より実際の魚群行動のモデル化を行って解析している [3]。本稿では簡単な決定論的な力学モデルで様々な行動形態が表現できることを示す [4]。

N 個の動物個体が相互作用して運動する力学モデルを考える (図 1)。 i 番目の個体の状態を位置ベクトル R_i 、速度ベクトル V_i 、頭軸方向単位ベクトル n_i で表す。

Figure 1: モデルの概念図

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

$$\tau \frac{d\theta_i}{dt} = \sin(\phi_i - \theta_i) \quad (2)$$

ここで θ は単位ベクトルが x 軸に対してなす角、 ϕ は速度ベクトル V_i が x 軸に対してなす角である。(1) 式は、質量 m の質点のニュートン方程式である。 γ は抵抗係数であり、流体中を運動する場合のストークス抵抗を考慮している。第 2 項は推進力を表している。第 3 項は相互作用力を表す。回遊する魚や飛翔する鳥の群れで個体間の平均間隔がほぼ一定に保たれるという観察報告があるので、これを再現するために近距離で斥力、遠距離で引力を持つような相互作用力 f を考える。また、動物の目は体軸の前方 (頭) についており、前方は見やすいが後方は見えにくい。したがって相互作用は一般的に前後で非対称であると考えられる。この異方向性を表す係数が α である。第 4 項の g は重心への力を表わす。

(2) 式は頭軸角度のダイナミクスを表している。一般に鳥などでは頭軸の方向と速度ベクトルが常に一致している保証はない (図 1)。しかし定常的に直線運動をしている場合は、推進力の方向と速度ベクトルは一致しているはずである。そこで、ここでは両者の角度の違いがある

場合、その差を小さくするように頭軸の向きを変更するダイナミクスを単純に (2) 式で表現する。

2.2 シミュレーション

このモデルの定性的な振る舞いを調べるため、様々なパラメータで数値シミュレーションを行い、いくつかの特徴的な集団運動を観測した。図2にそれぞれの場合のスナップショットと重心の軌跡を示す。

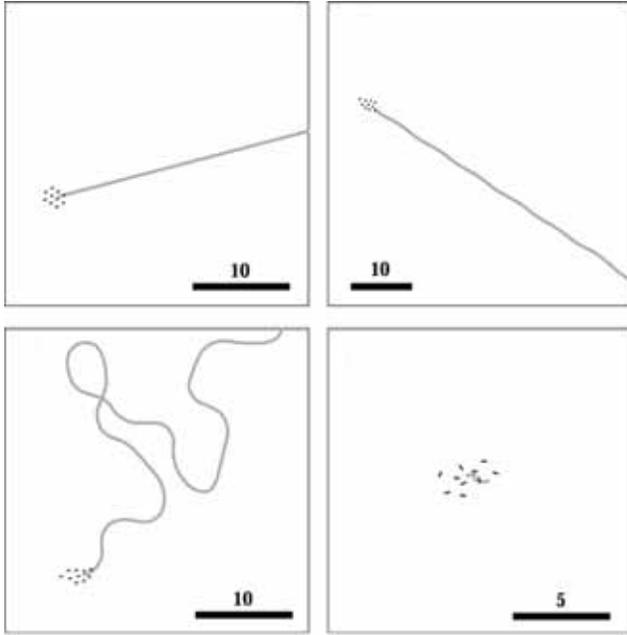


Figure 2: 特徴的な運動パターンの例：行進、振動1、振動2、振動3、迷走、蚊柱

特徴的なパターンに着目し、それぞれ行進、振動、迷走、蚊柱と命名する。運動の形態から、行進と振動は「秩序状態」、迷走と蚊柱は「無秩序状態」と捉えることができる。

行動を理解するために特徴的な長さ、速度、時間に着目し、方程式を無次元化する。すると独立な3つの無次元パラメータが得られる。

$$P \equiv \frac{r_c \gamma}{a \tau}, Q \equiv \frac{a}{c}, R \equiv \frac{m a}{\gamma^2 r_c} \quad (3)$$

通常、 $R \ll 1$ なので、重要なパラメータは P と Q である。これらのパラメータを元に相図を作ると図3のようになる。

この相図から秩序 - 無秩序転移が $P/Q = const$ の線上で起こっていることがわかる。このことから新たに $G = P/Q = r_c c \gamma / a^2 \tau$ が群れの形態をコントロールしている制御パラメータであることがわかる。このパラメータ G には臨界値 $G_c \sim 2$ が存在し、 $G < G_c$ ならば秩序行動、 $G > G_c$ ならば無秩序行動を示す。

また、乱れの強さを時刻 t における群れの平均速度、各エレメントの平均速度からの平均二乗偏差、について計測する。

$$\langle (\Delta v)^2 \rangle \equiv \left\langle \frac{1}{N} \sum_i |\vec{v}_i(t) - \vec{V}(t)|^2 \right\rangle_t \quad (4)$$

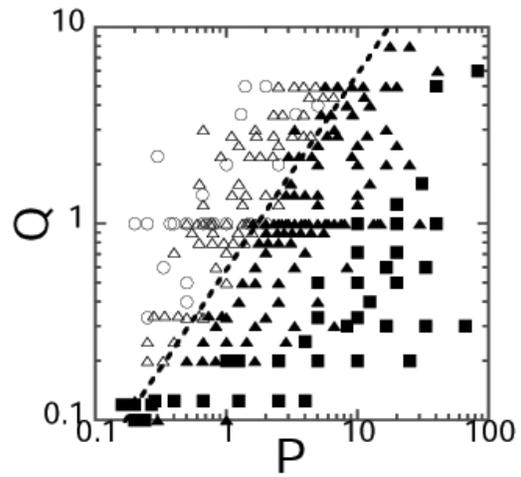


Figure 3: PQ 相図 (白：秩序、黒：無秩序)

$$\langle (\Delta V)^2 \rangle \equiv \langle |\vec{V}(t) - \langle \vec{V}(t) \rangle_t|^2 \rangle_t \quad (5)$$

ここで、 $\vec{V}(t) = \frac{1}{N} \sum_i \vec{v}_i(t)$ は重心の速度を表す。すると図に示したように、 $G_c \sim 2$ で相転移が生じていることがわかる。

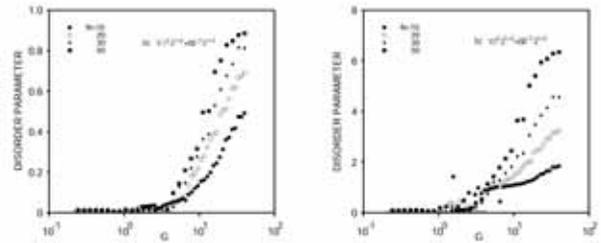


Figure 4: 制御パラメータ G と乱れの強さの関係

クラスターの安定性を調べるためにリアプノフスペクトラムも計算した。2次元の場合、1つの個体につき、5つの自由度があるので、 N 個の場合は $5N$ 次元の相空間で軌道に沿った微小摂動ベクトルの時間発展を数値的に追う必要がある。この系においては、空間に対する並進、回転あわせて3つの中立モードがあるため、少なくとも3つのリアプノフ指数は0である。数値計算の結果、やはり $G_c \sim 1$ 以下では正の指数はないが、それ以上では正の指数が現れ、カオスへの転移が起こっていることが確かめられた。

3 分業における比率制御モデル

アリや蜂などの社会性昆虫は複雑で巧妙な並列分散システムを構成している。社会性昆虫の世界では、各個体は比較的単純な振る舞いを見せるが、コロニーをうまく機能するために、集団として分業を行い、かつその分業に関する比率制御を巧みにやっていることが知られている [6]。この比率制御は動的安定性を持ち、何らかの原因により、ある作業に関わる集団に大きな変動があった場合、同じ比率になるように再配置される。また、環境の変化に対する適応性も併せ持つ。

集団で高度な機能を発揮することが期待される群ロボットシステムにおいて、このような特性を理解し応用することは大変意義深いものであると考えられる。ここではロボットシステムへの応用を念頭において比率制御に関するモデルについて考察していく(図5)。

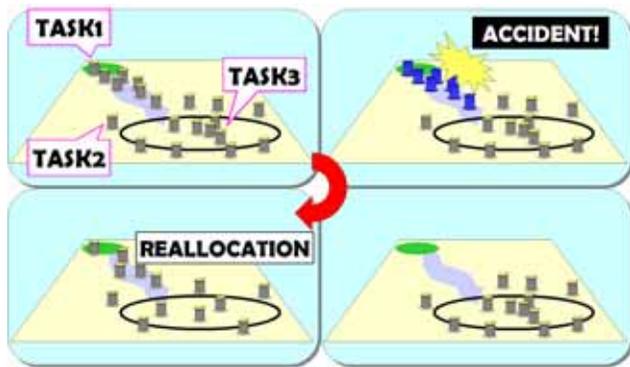


Figure 5: 比率制御の概念図

3.1 モデル

他業種間の自律的な分業、変動に関する再配置を実現する単純なモデルとして、これまで閾値モデル[6]、力学モデル[?]などが提唱されてきている。閾値モデルとは、各タスクにおいて外部刺激に対する閾値があり、臨界値を超えるとその作業に携わるとするモデルである。例えば、個体内に空腹度を検知するセンサーがあり、空腹度がある閾値を超えると餌を探しに出る、というものである。このモデルはシンプルではあるものの、齢差分業のような順序を伴う分業への適用が難しいと考えられる。

ここでは、仮想的なポテンシャル場を導入し、齢差分業を考慮した動力学モデルを示す。個体数 N の集団が M 種類のタスクを有しており、それぞれのタスクには、そのタスクに応じたストック物質があるものとする。ストック物質とは、タスクを遂行することによって生じるものであり、餌集め行動における餌や、コロニー内で発生するごみ、巣内で発せられる化学物質などを意味する。

各個体は内部状態 $u_i(t)$ を有するものとする。ここで $i = 1, \dots, N$ である。ストック物質は状態を意味し、その量は外部変数 $w_j(t)$ で表す。ここで $j = 1, \dots, M$ である。内部状態に対し、以下のようなポテンシャルの谷 $U(u)$ を導入する。

$$U(u) = \sum_j (\alpha_j - w_j(t)) U_j(u) + \alpha_0 U_0(u), \quad (6)$$

$$U_j(u) = -\frac{e^{-\beta(u-s_j)}}{(1 + e^{-\beta(u-s_j)})^2}, \quad (7)$$

$$U_0(u) = u^2, \quad (8)$$

ここで s_j と α_j はそれぞれ j 番目の谷の位置と深さを表している。また β は谷の深さの急峻さを表す。 U_0 は内部状態に対するバイアスである。 $w_j(t)$ は j 番目のストック物質の量を表しており、上記ポテンシャルの j 番目の谷の実効的深さに影響を与える。 w_j は以下のダイナミクスに従うものとする。

$$\dot{w}_j = -\frac{1}{\tau_j} w_j + a \sum_i (-U(u_i)), \quad (9)$$

右辺第1項はストック物質の自然減少量を表している。第2項は個体の内部状態に依存したストック物質の生成量を表す。 τ_j は j 番目の物質の緩和時間を表している。この値が大きくなるほどストック物質の自然減少率が小さくなる。 a はストック物質の生成率である。

内部状態 $u_i(t)$ は上記のポテンシャルにしたがって動くものとする。

$$\dot{u}_i = -\frac{dU(u)}{du} + \nu \eta, \quad (10)$$

ここで η は $(-1, 1)$ の一様乱数であり、 ν は振幅を表す。各個体の内部状態は実効的なポテンシャル場 $U(u)$ とノイズ η に依存して変化していくことになる。

3.2 シミュレーション

次に数値シミュレーションにより、このモデルの特性を示していく。ここではタスクは3つあるものとし、タスク1,2,3の最適比率は3:5:2 ($\alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.5, \alpha_3 = 0.2$) であるとしてシミュレーションを行っている。

Fig.6(a) は、各個体の内部状態の時間発展をみたものである。ここではノイズ項 $\nu = 0$ にしている。ランダムに初期値を与えられた個体の内部状態が3つのクラスターに収束していることが分かる。 Fig.6(b) は、外乱としてクラスター1の内部状態の個体をすべてクラスター2の状態に変えたときの振る舞いを見たものである。外乱に対し、比率の再調整が図られていることが観察される。

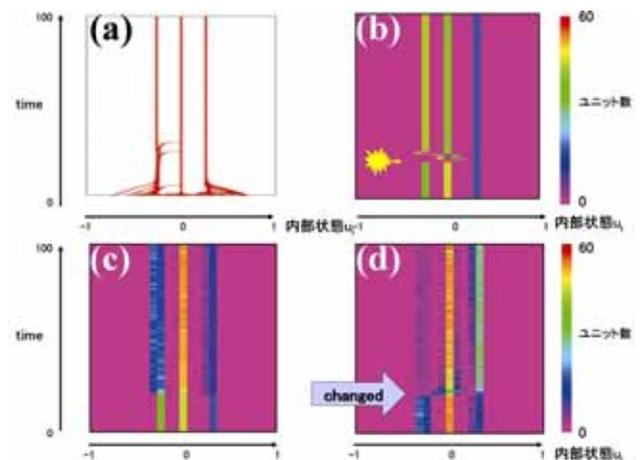


Figure 6: (a) 内部状態の時間発展, (b) 各クラスターを構成する個体数の時間発展, (c) 外乱に対する振る舞い, (d) 途中で最適比率を変えたときの様子。

ノイズがない場合、局所安定状態に陥り、比率制御がうまく働かない場合がある。この場合、適当なノイズを加える ($\nu \neq 0$) と、多少ゆらぎは発生する (Fig.6(c)) もの、比率制御はうまく機能するようになる。 Fig.6(d) は、途中で最適比率を変えたときの様子である。ここで

は比率に関係する変数 ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) を (0.3, 0.5, 0.2) から (0.1, 0.5, 0.4) へ時刻 t^* で変化させたときの振る舞いを見ている。ここに見られるようにシステムは新しい条件に素早く適応できていることが分かる。

3.3 ロボット実験

上記のモデルの妥当性を検証するために定性的な実験を行った。実験システムとして、動的な環境を表現できる仮想動的場 (Virtual Dynamic Environment for Autonomous Robot system, V-DEAR) [7] を用いた (図7)。

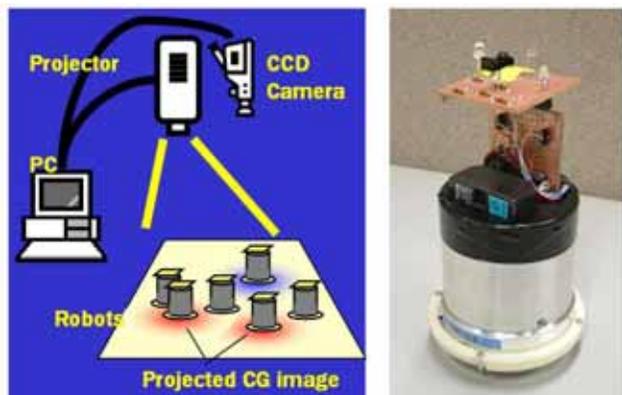


Figure 7: 仮想動的場 V-DEAR の模式図

これは CCD カメラでロボットの位置をトラッキングし、その位置に合わせてプロジェクタ CG イメージを投影するシステムである。ロボットは自身が有する光センサーを用いて、場の明るさをフェロモン濃度に見立てた行動をとる。

モデル検証実験として、本稿ではタスクを2つとした。内勤として巣に滞在するタスクと、外勤として巣外に出るタスクである。巣内の物質濃度は滞在するロボット数に応じた率で減少するものとし、巣外に出たロボットが巣に戻って来ると、餌が補充されたと見なして、巣内の物質濃度が一定率高くなるものとした。本実験では外勤：内勤 = 1:2 になるように設定した。ストック物質の減衰を表す必要があるため、上記の実験装置を用いて実験を行った。

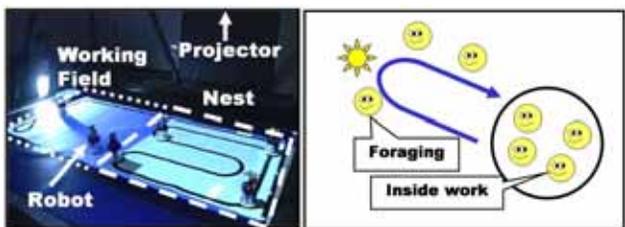


Figure 8: (左) 実験風景、(右) 実験風景の模式図

図9に6台のロボットで実験を行った例を示す。巣内に滞在するロボット数が分散が大きいものの、平均すると設定通り4台程度となっていることが分かる。なお、このまま個体数を変動させ、総ロボット数を3台に減少させても、その比率は保たれることが確認できている。

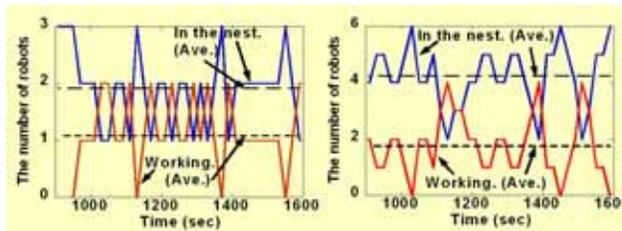


Figure 9: 実験例。(左) 6台における外勤ロボット数の時間変化 (右) 3台における外勤ロボット数の時間変化

4 まとめ

本稿では生物の群れ行動をモチーフとして、簡単な動力学特性を組み込んだアクティブエレメント集合の挙動について論じた。

前半は鳥、魚などの群れ行動をモチーフとして、できるだけ最小限の力学的仮定から出発して、様々な群れのパターンと運動が記述できることを示した。

後半は最適比率制御のためのモデルを提案し、その特性について論じた。本稿ではシミュレーションならびに実際のロボットシステムを用いて小規模な定性実験を行った。

今後はより大規模なシステムで実験を行うこと、また物質のやりとりが局所的な場合の振る舞いについて詳細を検討していく予定である。

References

- [1] <http://www.red3d.com/cwr/boids/>
- [2] Vicsek, T., Czirók, A., Ben-Jacob, E., Cohen I., & Shochet, O.: Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. *Phys. Rev. Lett.* Vol. 75 (1995) pp.1226-1229.
- [3] 三宮信夫: 魚群行動のモデル, 数理科学, No.432 (1999) pp.61-67.
- [4] N.Shimoyama, K.Sugawara, T.Mizuguchi, Y.Hayakawa, and M.Sano: Collective Motion in a System of Motile Elements, *Phys. Rev. Lett.* Vol.76 (1996) pp.3870-3873.
- [5] <http://www.princeton.edu/dcl/aosn/>
- [6] E. Bonabeau, G. Theraulaz, M. Dorigo, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Oxford Univ Press (1999).
- [7] K. Sugawara et al, "Cooperative Acceleration of Task Performance by Simple Interacting Robots", *Proc. SICE2003* (2003).