

# 追尾関係をもとにしたユリカモメの群れの構造解析

Structure analysis of hooded gull flocks based on leader-follower relationship

右衛門佐 誠 (Makoto YOMOSA), 水口 毅 (Tsuyoshi MIZUGUCHI)

大阪府立大学大学院 工学研究科 電子・数物系専攻 数理工学分野

Department of Mathematical Sciences, Osaka Prefecture University

早川 美徳 (Yoshinori HAYAKAWA)

東北大学 教育情報基盤センター

Center for Information Technology in Education, Tohoku University

## 1 はじめに

自然界の中では、イワシの魚群やアリの行列、マガンのV字編隊、ヒトの行列など様々な動物のいろいろな群れを目にする。その様子は種類によって水中であったり、空中であったりと様々であるが、それぞれが自発的に運動する個体の集団運動という点では共通している。このような自己駆動粒子の集団運動はVicsekらの研究[1]がきっかけとなって注目されるようになり、近年では「アクティブマター」と呼ばれる一連の研究が盛んに行われている。その中でも、鳥の群れはマガンのV字型編隊やムクドリ of 複雑な運動など様々な集団挙動を示す。これまで、これらの鳥の群れの振る舞いの研究は数理モデルを用いた手法が中心であった。しかし、近年の実測機器の性能の向上により、これらの鳥の集団挙動に関して、数理モデルのみだけでなく、実測データをもとにした研究も見られるようになってきた[2]。

我々は大阪の大和川を行き来するユリカモメの群れを可動式のステレオカメラを用いて撮影し、得られた左右の動画データの視差を利用して各個体の3次元位置座標を再構築し、その時系列解析を行っている[3]。今回の発表内容はその中でも、群れの中の追尾関係と相対位置の関係に関してである。具体的には得られたデータから群れの中の各ペアに関して速度方向の相関関数を計算し、方向選択の遅延時間を計算した。そして、この遅延時間をもとに群れの中の追尾関係のネットワーク構造を明らかにした。さらに、得られた遅延時間は相対位置と相関があることがわかった。

## 2 遅延時間と相対位置

各個体が自発的に運動しているため、各個体の運動方向に着目した座標系を導入する(図1)。i番目の個体に対して $\xi_i$ 軸を個体の運動方向にとり、水平面に平行で $\xi_i$ 軸と直交する軸を $\eta_i$ 軸とし、 $\xi_i$ 軸と $\eta_i$ 軸に直交する軸を $\zeta_i$ 軸とする。図1では、鳥の画像の上に座標系を描いているが、この座標系はあくまで個体の運動方向を基準とした座標系であり、 $\xi_i$ 軸が鳥の頭軸方向と一致するとは限らない。

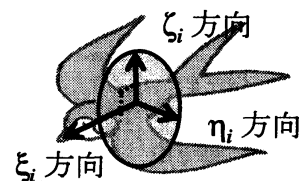


図1: 鳥座標。

次に、群れの中の追尾関係を数値化するために、群れの中を飛行する個体  $i$  と個体  $j$  の運動方向の相関関数を次のように定義する。

$$C_{ij}(\tau) = \left\langle \frac{\mathbf{v}_i(t) \cdot \mathbf{v}_j(t+\tau)}{|\mathbf{v}_i(t)| \cdot |\mathbf{v}_j(t+\tau)|} \right\rangle \quad (1)$$

式 (1) 中の  $\langle \cdot \rangle$  は観測時間平均を表す。この相関関数  $C_{ij}(\tau)$  を最大とする  $\tau = \tau_{ij}^*$  を個体  $i$  から見た個体  $j$  の遅延時間と定義する。ただし、相関関数の最大値  $C_{ij}(\tau_{ij}^*)$  に閾値  $C_{min}$  を設け、 $C_{ij}(\tau_{ij}^*) < C_{min}$  のとき  $i$  と  $j$  の運動の間に相関はないと解釈し遅延時間を定義しない。このようにして決定された遅延時間  $\tau_{ij}^*$  は、 $\tau_{ij}^* > 0$  のとき  $i$  が  $j$  を率先し、 $\tau_{ij}^* < 0$  のとき  $i$  が  $j$  に追従していると解釈できる。この遅延時間を群れの各ペアに関して計算することで、群れの中の追尾関係を数値化することができる。図 2 は 2 2 羽で飛行する群

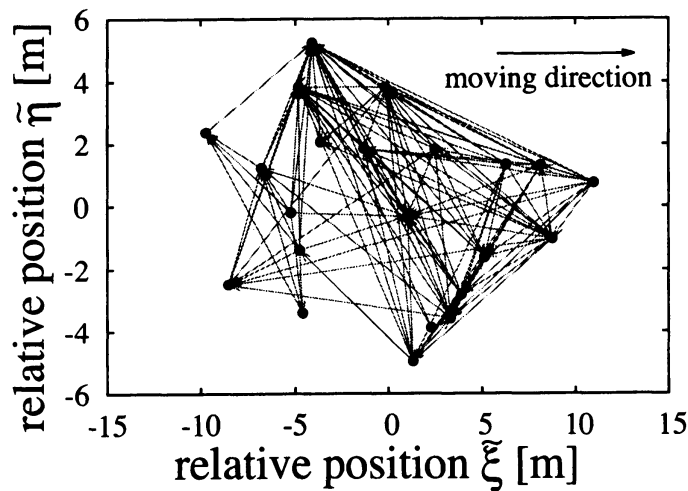


図 2: 群れの中の追尾関係のネットワーク構造。

れを解析したもので、点は群れの中での個体の平均的な位置を示している。また、矢印は追尾関係を示しており、 $\tau_{ij}^* > 0$  のとき  $i$  から  $j$  に矢印が引かれている。図 2 の遅延時間をもとにして構成されるネットワークを解析すると、先行研究 [4] と同様に群れの進行方向にいる個体から順に方向を選択していく傾向があることがわかる。

より詳細に追尾関係と群れの中の相対位置の関係について考察するため、相対位置と遅延時間の相関を考える。 $\langle \xi_{ij} \rangle$  は個体  $i$  の鳥座標系から見た個体  $j$  の  $\xi_i$  方向の相対距離の観測時間平均であり、式で表すと次のように表される。

$$\langle \xi_{ij} \rangle = \langle (\mathbf{P}_j(t) - \mathbf{P}_i(t)) \cdot \mathbf{e}_{\xi_i}(t) \rangle \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{P}_i(t)$  は時刻  $t$  での個体  $i$  の位置を表し、 $\mathbf{e}_{\xi_i}(t)$  は  $\xi_i$  軸方向の単位ベクトルを表す。 $\langle \xi_{ij} \rangle$  が正 (負) は、その観測時間内で平均的に個体  $i$  が個体  $j$  の後 (前) 方に位置していることを意味する。図 3 は図 2 と同様のデータのそれぞれのペアに対する  $\tau_{ij}^*$  と  $\langle \xi_{ij} \rangle$

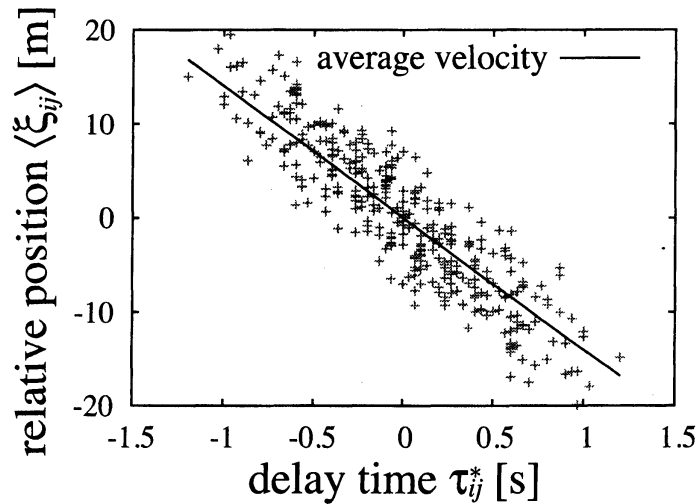


図 3:  $\tau_{ij}^*$  と  $\langle \xi_{ij} \rangle$  の関係性.

の関係を示したものである。 $\tau_{ij}^*$  と  $\langle \xi_{ij} \rangle$  の間には負の相関があることがわかり、後方に位置する個体が前方に位置する個体を追尾していることを定量的に示している。また、実線は群れの平均移動速度の逆符号であり、 $\tau_{ij}^*-\langle \xi_{ij} \rangle$  平面内でのデータの傾き  $\text{avg} \left( \frac{\langle \xi_{ij} \rangle}{\tau_{ij}^*} \right)$  と群れの平均移動速度  $\langle \tilde{V} \rangle$  との間には式 (3) の関係が成り立っていることがわかる。

$$-\text{avg} \left( \frac{\langle \xi_{ij} \rangle}{\tau_{ij}^*} \right) \approx \langle \tilde{V} \rangle. \quad (3)$$

これは後方の追従する個体が前方の個体が旋回したところまで進んだのちに旋回し始めることを意味している。

平均移動速度  $\langle \tilde{V} \rangle$  は観測を行った時の風向や風力などの影響により解析するデータごとに様々である。しかし、 $\langle \tilde{V} \rangle$  の値によらず式 (3) は解析を行った5つの多数羽の群れでは成り立っていた。そのため、式 (3) はユリカモメが編隊飛行をする上での必要条件ではないかと考えられる。

### 3 考察

本研究ではこれまでの先行研究と同様に、遅延時間  $\tau_{ij}^*$  を用いて群れの中の追尾関係を数値化した。さらに、図 3 や式 (3) に示したように、追尾関係と群れの中の相対的な位置との関係性を明らかにした。

式 (3) は群れ全体での平均的な結果であり、図 3 でもそれぞれのペアのデータは実線上からずれているものも多い。それは相対位置を保ちながら飛行するために、各個体により細かな調整を行っていると考えられる。たとえば、旋回軌道の内側と外側では旋回するタイミングをずらす必要があるだろう。今後はそういった式 (3) からのずれに関し

て詳細な解析を行い、群れ全体が形状を維持しながら飛行するメカニズムについて明らかにしていきたい。

## 参考文献

- [1] Tamás Vicsek, András Czirók, Eshel Ben-Jacob, Inon Cohen, and Ofer Shochet. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters*, **75**, 1226–1229, 1995.
- [2] Tamás Vicsek and Anna Zafeiris. Collective motion. *Physics Reports*, **517**, 71–140, 2012.
- [3] 右衛門佐誠, 水口毅, 早川美德. ステレオカメラによるユリカモメの運動の解析. 京都大学数理解析研究所講究録, **1808**, 95–100, 2012.
- [4] Mate Nagy, Zsuzsa Akos, Dora Biro, and Tamas Vicsek. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks. *Nature*, **464**, 890–893, 2010.