

ステレオカメラによるユリカモメの運動の解析

右衛門佐 誠¹, 水口 毅^{1,2}, 早川 美徳³
阪府大工¹, JST さきがけ², 東北大教情基セ³

1 実データをもとにした鳥の群れの研究

自然界では様々な生物が群れを為すことはよく知られている。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。これまで鳥の群れを含め能動的な素子の集団運動の研究の多くは、数理モデルをもとにした数値計算を中心に行われてきた [1]。それは実データの取得が困難であることに起因する。しかし、近年の実測機器の性能の向上により実際に飛行している鳥の実データの取得が可能となり、得られた実データに基づく研究が盛んに行われるようになった。鳥の群れの飛行に関するデータを取得する方法にはステレオカメラを用いる方法 [2, 3] や、鳥の各個体に GPS 装置などの測定装置を装着する方法 [4, 5] などがある。前者はリモートセンシングの代表的なものである。一方、後者は「バイオロギング」と呼ばれ、鳥に限らず測定装置を動物の体に装着して野外に放しデータを得る研究方法で、動物行動学などの分野で最近盛んに用いられている手法である。バイオロギングの手法を用いれば、水中を含め観測場所も広がり、また、比較的長時間のデータが取得可能である。しかし、測定装置の装着や記録データの回収の問題等もあり、全ての生物種に適用できる手法ではない。これに対して、ステレオカメラを用いた手法では画角に入るすべての個体が解析の対象となり、条件さえ整えば大量のデータが取得可能である。

本稿ではまず鳥に関する実データをもとにした先行研究を数例紹介したあと、我々が実施したステレオカメラによるユリカモメの群れの運動解析の結果について述べる。

1.1 Ballerini らによるムクドリの群れの解析 [2]

Ballerini らはステレオカメラシステムを用いて、数千羽のムクドリの群れの位置座標を画像データから再構築することに成功した。彼らが用いたステレオカメラシステムはカメラ間の距離が 25m もある。各個体の相対位置に着目したところ、最近接個体では分布に異方性があるが、着目する個体を離していくにつれて異方性が見られなくなることを発見した。つまり、ムクドリは最近接個体の位置は認識して自身の位置を決定しているが、遠くの個体の位置はあまり意識していないということである。彼らはムクドリが何番目の個体まで意識しているかを測定するため、異方性を測定する量を定義し、測定したところ、6 番目までは相対位置の分布に異方性が見られた (文献 [2] の Fig. 3 を参照)。この論文で彼らは、ムクドリの個体間相互作用がこれまで主に数理モデルで考えられてきたように何 m 離れているかという計量距離に応じて決まる相互作用ではなく、何番目に近いかという位相距離に依存していると結論付けている。

1.2 早川のマガンの群れの研究 [3]

早川は可動式のステレオカメラシステムを開発した。このシステムは三脚の上にヤング率の大きい金属棒を設置し、その両端にカメラを固定したものである。カメラ間の距離は1m程度であり、画角を自由に変えることが可能である。早川はこのシステムを用いて、マガンのV字型の群れの解析を行った。解析するにあたり、群れの各個体が高さを一定に保ったまま飛行していると仮定した。さらに、V字構造の1辺を直線でフィットし、そこからの進行方向のずれに着目することで、V字構造の1辺の中に見られる揺らぎの構造を1次元問題として考えることができる。文献 [3] の Fig. 3を見ると、V字構造の1辺の中に見られる揺らぎの伝搬を見ることができる。また、文献 [3] の Fig. 4のような例を見ると、相互作用の効果が前方の個体から後方の個体へしか伝搬しないと思われる。このようなことを踏まえ、交通流のOVモデル（最適速度モデル）を用いて揺らぎの伝搬が解析されている。なお、このシステムは本研究でも使用されている。

1.3 Nagy らの伝書鳩の群れの中の階層構造の研究 [4]

Nagy らは伝書鳩の群れの各個体に GPS 装置を設置することにより、ハトの群れの位置データを取得することに成功した。そのデータを統計力学で用いられてきた手法を用いて解析した。具体的には、群れの各個体のペアに対して水平方向の速度の相関関数を $C_{ij}(\tau) = \langle v_i(t) \cdot v_j(t + \tau) \rangle$ と定義し、これを最大とする τ を個体 i に対する個体 j の遅延時間 τ_{ij}^* とした。遅延時間 τ_{ij}^* は運動方向を真似するのにかかる時間で、これが正であると個体 j が個体 i に追従していることを表す。群れの中の全てのペアに対して、遅延時間 τ_{ij}^* を求めることで、群れの中に追従関係で構築されるネットワークを描くことに成功した。そして、そのネットワークが階層構造であるということを報告している（文献 [4] の Figure 3を参照）。群れの中に階層構造があるということは、リーダーの存在を意味している。論文では群れ全体での平均的な遅延時間と群れの中の相対位置や帰巢能力との関係についても述べられている。平均的な遅延時間が正のものつまり群れの中で平均的に運動を真似される個体が群れの中で先頭方向に位置する傾向が見られる。また、平均的な遅延時間が負の個体でも単独での帰巢能力が高い個体がいるため、帰巢能力と遅延時間の間には強い関係性は見られない。

1.4 Usherwood らのハトの群れに関する空力学的見地からの研究 [5]

Usherwood らはハトの群れの各個体に GPS 装置と加速度センサーを装着し、そのデータの解析を行った。彼らは得られたデータを解析することで、これまでの研究とは異なり、鳥の羽ばたきによる振動の数値化に成功している。論文ではハトが曲がるときに、遠心力と重力を考慮し最適に傾いているということが報告されている（文献 [5] の Figure 1を参照）。また、群れの密度が増えるにつれて、羽ばたきの振幅が小さくなり振動数が増加することも、報告されている（文献 [5] の Figure 3を参照）。これは集団で飛行するとエネルギー的に得をするという従来からの考え方 [6] に反する。彼らはこのことに関して、密度が増加するにつれてまわりの個体の作る気流の影響でより綿密に自らの位置を調節しなければならないためではないかと主張している。

2 ユリカモメの運動の解析

本研究ではステレオカメラシステムを用いて、ユリカモメの群れの動画データから各個体の3次元位置座標を再構築し、その時系列の解析を行った。本研究で用いたステレオカメラシステムは早川が開発したものであり（1.2節,[3]），1.1節[2]で用いられているシステムと異なり可動式であり，これまで限定的であった画角の自由度を上げることに成功したものである。そのため，観測場所を限定されることなく，川に沿って飛行するユリカモメの多様な群れの形態を撮影することが可能となった。

2.1 羽ばたき運動の数値化

ユリカモメはその振る舞いが，先行研究で報告されているものと定性的に異なると考えられる。例えば，各個体の位置がマガンほど定常的なものでなく，しかし，ムクドリほど複雑でない。また，ユリカモメの羽ばたきの振動数は3~4 Hz程度とムクドリに比べて小さく，測定距離は20~100 mと小さいので，詳細なデータが得やすい。得られた時系列データを解析した結果，これまでのステレオカメラを用いた研究では時間的もしくは空間的な解像度の限界から困難であった鳥の羽ばたき運動を数値化することに成功した。この詳細に関しては文献[7]に記載している。

今回は，その結果を踏まえ各個体の相対位置の分布に着目した解析を行った。

2.2 最近接個体との相対位置の分布

ユリカモメの群れの振る舞いは多様であり，その様子は数十羽程度でかたまり状に集団で飛行することもあるれば，百羽を超えひも状に長く続くときもある（図1）。これらの群れの違いは個体数以外に群れの構造そのものに違いがあるように見られる。そこで，群れの構造の違いを特徴付けるために最近接個体との相対位置の関係に着目した。



(a) かたまり状.



(b) ひも状.

図1: ユリカモメの群れの多様性.

このとき、図 2 に示すように個体の運動方向を基準とした座標系 (ξ, η, ζ) (以下、鳥座標) を導入し、相対位置の解析を行った。 ξ 軸は個体の平均的な運動方向であり、 ξ 軸に垂直な平面内で地面と平行な方向に η 軸をとり、鉛直方向の成分が最大の方に ζ 軸をとる。図 2 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、 ξ 軸や η 軸が鳥の頭軸方向や翼長方向と一致するとは限らないことに注意が必要である。また、実際に羽ばたいている鳥の速度や運動方向は羽ばたきによる振動成分を含んでおり、研究で使用しているシステムではその振動成分をとらえることが可能であるが [7]、本稿では振動成分を取り除いた量を解析対象としている。

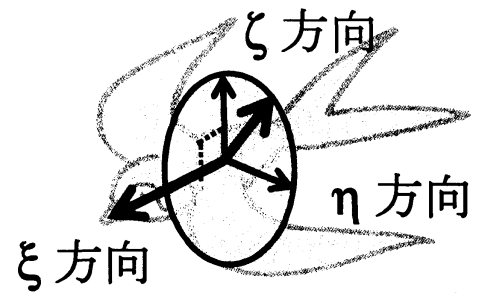


図 2: 鳥座標の模式図。

図 3 は鳥座標を用いて最近接個体との相対位置の分布を調べたものである。左段 (A) と右段 (B) では異なる群れのデータである。(A) がかたまり状で飛行している群れで、(B) がひも状で飛行している群れであり、(A) は観測時間が 5 秒、個体数が 22 羽、(B) は観測時間が 10 秒、個体数が 35 羽である。ただし、(A) ではほとんどの個体が常に画角に入っているが、(B) では観測時間内で画角内への個体の出入りがある。(A) では ξ 方向と η 方向の両方向の分布で 0 を中心とした双峰性が見られ、マガンの V 字型編隊に似た構造が見られる。また、(A) と (B) を比較すると η 方向の分布の双峰性は共通する構造であり、 η 方向に他の方向に比べ強い秩序があるようにみれる。また、ピークの位置は $\pm 0.7\text{m}$ のところに見られ、これはユリカモメにとって翼長の 2 倍程度である。これは文献 [8] で述べられているように、各個体が前の個体の作る気流を利用して飛行していることを示唆している。

さらに、 ξ 方向の分布に関して、(A) では見られた双峰性が (B) では単峰になっていることがわかる。つまり、(A) では最近接個体が真横に並ぶことを避けているのに対し、(B) では逆に真横に並ぶことを選択していることになる。また、 ζ 方向の分布の分散が (A) に比べ (B) は大きいことがわかる。これは (A) は平面的な群れの構造をしていることに対して、(B) は ζ 方向にも群れが広がり 3 次元的な群れの構造をしていることを示唆している。これらの相違が図 1 の 2 つを比較した時に直感的に感じる違いを示しているように思われる。

今後は解析するデータ量を増やすとともに、複数個体の相対的位置関係 (1.1 節) や羽ばたきの周期、方向、位相との関係等について調べる予定である。さらに、ソアリングや一斉飛び立ちなどのユリカモメに関するその他の現象の解析も行う予定である。また、可能であれば他の種類の鳥と比較することも考えている。

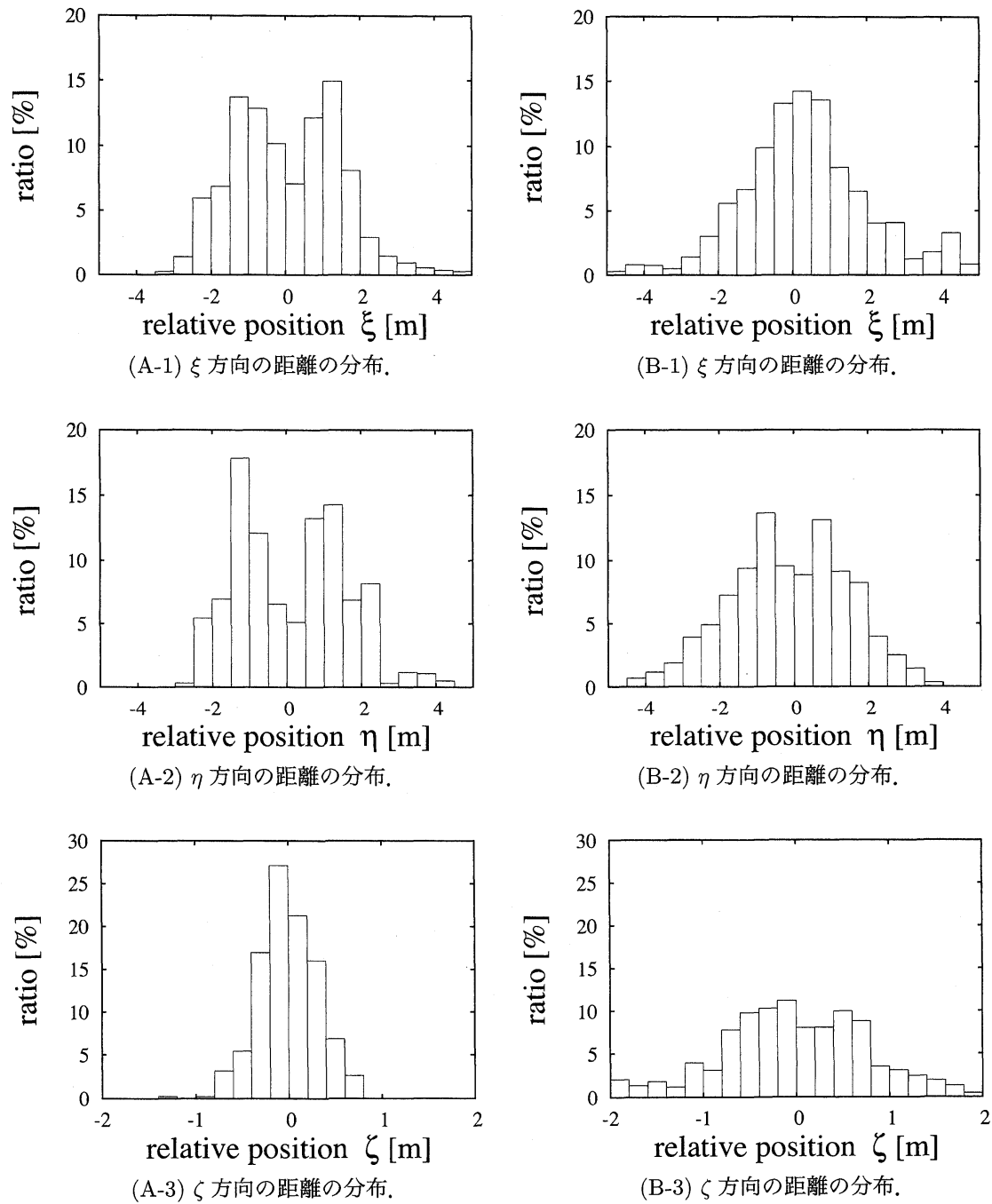


図 3: 最近接個体の相対位置の分布. A と B で異なる群れのデータを示している. A がかたまり状の群れで, B がひも状の群れである.

参考文献

- [1] T. Vicsek et al., Novel Type of Phase Transition in a system of Self-Driven Particles, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1226 (1995).
- [2] M. Ballerini et al., Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: evidence from a field study, *PNAS* **105**, 1232 (2008).
- [3] Y. Hayakawa, Spatiotemporal dynamics of skeins of wild geese, *Europhys. Lett.* **89**, 48004 (2010).
- [4] M. Nagy et al., Hierarchical group dynamics in pigeon flocks, *Nature* **464**, 890 (2010).
- [5] J. Usherwood et al., Flying in a flock comes at a cost in pigeons, *Nature* **474**, 494 (2011).
- [6] H. Weimerskirch et al., Energy saving in flight formation, *Nature* **413**, 697 (2001).
- [7] 右衛門佐 誠, 水口 毅, 早川 美德, ユリカモメの群れ運動の解析, 京都大学数理解析研究所講究録 **1796**, 22 (2012).
- [8] T. Sugimoto, A theoretical analysis of formation flight as a nonlinear self - organizing phenomenon, *IMA J. of Applied Mathematics* **68**, 441 (2003).