

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12150

研究課題名（和文）渡り鳥の群れの大域的な制御機構

研究課題名（英文）Global Regulatory Mechanisms of Migratory Bird Flocks

研究代表者

早川 美徳（Hayakawa, Yoshinori）

東北大学・データ駆動科学・AI教育研究センター・教授

研究者番号：20218556

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：宮城県の渡り鳥飛来地においてマガン等の飛行の様子をステレオカメラで撮影し、併せて風向等のデータと共に蓄積した。畳み込みニューラルネットやカルマンフィルターを組み合わせた高精度なトラッキングシステムを開発し、マガンやハクチョウのそれぞれの個体の位置、速度、加速度、羽ばたきの位相を高精度に推定した。収集した飛行のイベント数は約1500に登る。飛行中の互いの位置関係および速度差を考慮した運動方程式モデルを仮定し、実データに基づいて、有効な「バネ定数」や「減衰係数」等のパラメータを高い再現性をもって推定することに成功し、群れの安定性の条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大型の渡り鳥の群れについて、特徴的なV字型飛行隊形がどのようにして生じているのかについては、仮説の域を脱しない議論が長年行われていたが、本研究は、それに定量的な説明を与えることに成功した。工学分野では、高速道路等の渋滞の発生メカニズムとその解消が多年に渡り研究されており、特に、後方が前方を追尾する形の一次元的な制御においては、“string instability”と呼ばれる不安定性が不可避免的に生じることが明らかにされている。近年、ドローンの利用は各所で拡大する中で、多数の機体が安定的に運行できるような制御方法の研究が必要になると考えられ、本研究での知見が活かされる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：We have successfully captured the flight of geese and other migratory birds at a migratory bird arrival site in Miyagi Prefecture using stereo cameras. In addition, we have gathered data on wind direction and other factors. We have developed a high-precision tracking system combining a convolutional neural network and a Kalman filter to estimate the position, speed, acceleration, and flapping phase of each individual goose and swan with high accuracy. We have collected approximately 1,500 flight events. The system successfully estimated effective parameters such as “spring constant” and “damping coefficient” with high reproducibility based on actual data. It also clarified the conditions for flock stability. This was achieved by assuming an equation of motion model that takes into account the positional relationship and velocity difference between each other during flight.

研究分野：複雑システム

キーワード：群れ 渡り鳥 飛行隊形 string instability

1. 研究開始当初の背景

ムクドリやスズメなどの集群性の高い鳥は、ねぐらを共有し、大小の群れを形成しながら行動する。数千以上の個体から成る群れがあたかも雲のように空中を運動する様子を、市街地でもしばしば目にもすることもある。鳥に限らず、こうした動物の群れは、全体があたかも多細胞生物のように、ときに複雑に、またときにはよく統制され整然と振ることがあり、その有り様は、生物学や生態学、動物行動学的な興味のみならず、背後の数理的なメカニズムの存在や自律的システムへの応用の可能性を予感させるものである。

計測・データ解析技法の発展も手伝って、現実系に根ざした「群れ」の科学的研究が近年国内外で広がりを見せており、自己駆動粒子の多体系(アクティブマター)の例として、種々の観点から興味深い知見が得られている。また、Swarm Intelligence や Swarm Optimization といった観点で、「群れ」の振る舞いを工学的に応用しようという試みも広がっている。

アクティブマターの中でも、鳥は高レイノルズ数の慣性的な領域で運動しており、流体からの影響が極めて大きい。また、飛行すること自体に大きな物理的な制約が課せられており、その意味で大変「不自由」な状況の下で、複雑な制御に頼りながら運動していると言ってもよい。こうした物理的な制約が群れの構造を規定する好例として、大型の渡り鳥のV字型飛行隊形が挙げられる。

ガンやツル等が一次元的な飛行隊形を呈する理由は、翼端渦の利用による飛行コストの低減にあると指摘されてきたものの、意外にも、これを実測データに基づいて検証する試みは比較的最近始まったばかりである(例えば、Portugal et al., Nature 505 (2014))。

さらに進んで、ガン等の群れを全体として見るならば、その進路は揺らいでおり、紐状の隊列の変形や配向の乱れが増幅されながら後方に伝搬していることが、代表者自身の研究によって示されている(Spatiotemporal dynamics of skeins of wild geese, Europhys. Lett. 89 (2010) 48004, Y. Hayakawa)。また、巨大な隊列の飛行を分程度のオーダーで観察していると、外的な刺激要因が特に無いような状況であっても、彼らは「自発的」に入れ替わりや分裂を繰り返しており、代表者が実施したガンの群れのサイズ分布の研究によれば(Group-size distribution of skeins of wild geese, Phys. Rev. E 86,(2012) 031924, Y. Hayakawa and S. Furuhashi)、時間あたりの分裂頻度は群れのサイズに対してべき乗関数的に依存することが示唆されているが、その理由は明らかでない。さらに、数 100メートル以上のスケールにわたって、複数の巨大な群れの全体が同時的に崩壊する事象を代表者は複数回目撃しており、何らかの長距離的な相互作用によっても群れの全体的な挙動が支配されている可能性も高い。

つまり、近接的な最適化というシナリオからは、渡り鳥の群れは、先頭→2番目→3番目・・・という1次元の因果関係の連鎖の下に制御が行われているように想像される一方で、現実の系では、個体の複雑な挙動を伴いながら大域的な構造と動きが調整されており、その制御機構に興味を持たれた。

2. 研究の目的

このように、個体サイズ程度の空間スケール、羽ばたき時間程度の時間スケールに限れば、大型の鳥の「低次元の群れ」は、力学的・エネルギー論的な意味での最適化の観点から理解可能と思われる一方で、現実の「群れ」の大域的な振る舞いは、多様かつ複雑で、不安定(あるいは臨界的)である。

そうした様態を理解するための鍵となるのが、群れの低次元性に加え、群れ内部の情報伝搬経路の構造ではないかと考えられる。つまり、低次元の多体系が本来的に有するフラストレーションが運動の揺らぎを増長することに加え(流体近似に基づく議論(Tu et al., PRL 80 (1998)、等)に拠れば、アクティブな運動体の臨界次元は2とされている)、視覚や鳴き声等によって媒介された長距離的・即時的な情報の流れが群れの大域的な振る舞いを支配しているはずである。

そこで、これまで蓄積した計測技法をさらに精密化し、マガンやハクチョウを含む複数のカモ類の群れについて、各個体の運動(軌跡、羽ばたきや体の変形)の相関関数等の推定によって、群れ内部の相互作用の大きさと反応時間、および行動の因果関係の「地図」を作成し、群れの

域的な振る舞いと対照しながら系統的に整理することを本研究の目的とした。

3. 研究の方法

宮城県北部の渡り鳥の越冬地を主なフィールドとして、飛び立ち時や飛行中のマガンやハクチョウなどのガン類の群れの動態の計測を行う。計測には、群れのステレオ動画撮影を中心に、同時に、風向・風速についてもロガーを用いて記録し、そのデータを用いる。ここで、ステレオ動画の撮影は、独自開発のカーボン素材を用いた基線長 2m のステレオカメラによって行うが、群れの活動が活発となる朝夕の低照度の条件下ではノイズによる分解能の低下が課題となっているため、光学系とセンサーを改良し、加えて、機械的な安定性についても調整を加えながら、画像処理ソフトウェアの改良と併せて、計測の高精度化をはかる。

越冬中の渡り鳥は採餌場所とねぐらとの間を群れを成して移動し、条件によっては 100 個体を大きく超えるような規模に成長することがある。撮影場所を適切に選定することで、数分間程度の時間にわたって群れの挙動を追跡することができるので、ステレオ動画から群れの各個体の三次元的な軌跡を再構成し、風向等の情報と共に時系列データとして蓄積する。

得られたデータから、1/60 秒程度の時間分解能で、速度、加速度、位置関係に加え、画像処理によって羽ばたきの位相の変化を推定する。これらに基づいて、行動の順序関係を速度や加速度等の相関関数の遅延時間によって推定すると共に、群れの中での個体の振る舞いの順序関係および情報の流れをネットワークとして可視化することによって、リーダー・フォロワー関係や行動のキューを明らかにする。本来、相関関数やエントロピー等の統計量を見積もるためには、長時間にわたる平均操作が必要となる一方で、群れの解析においては実測可能な時間長は限られており、しかも、行動は一般に非定常的であるため、計測対象にマッチした確率・統計的なデータ処理方法についても併せて検討し、編隊の経路の変更や群れの分裂・合体等の非定常的な事象を含む実データでそれを検証する。

4. 研究成果

(1) 群れの 3 次元動態の計測システムの開発

屋外での鳥の群れの軌道を追尾するためこれまで開発を進めてきたステレオカメラによる計測システムおよび画像処理ソフトウェアについて、画像センサーの低ノイズ化に加え、計測対象の特定の部位（胴体部分）の画像位置を特定する畳み込みニューラルネットワークの実装（学習に用いたデータ画像は約 6 万）、カルマンフィルターを用いた追尾と速度と加速度の推定機構の実装等の改良を続け、マガン

（翼長約 1.4m）程度の物体の場合、カメラから 200m 程度以内、好条件の場合は 300m 近くの範囲までの測定を可能とした。レーザー距離計を用いた測定との比較では、50m 遠方の物体の計測の誤差は±6cm 以内で、レンズの収差に伴う距離の絶対誤差も、画像全体で 2%程度の範囲に収まっていることが確認できている。さらに、羽ばたきの様子の画像から粒子フィルターによる手法によって位相を推定する方法を新たに開発した（図 1）。

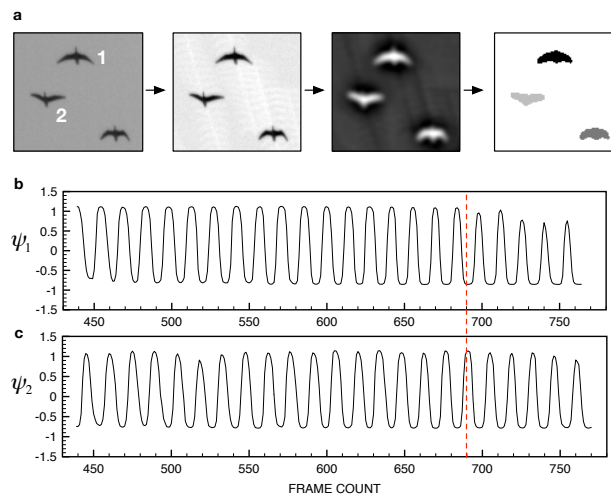


図 1: (a) 鳥の画像から羽ばたきの位相を検出する過程。(b) 1 と 2 の個体について得られた時系列。

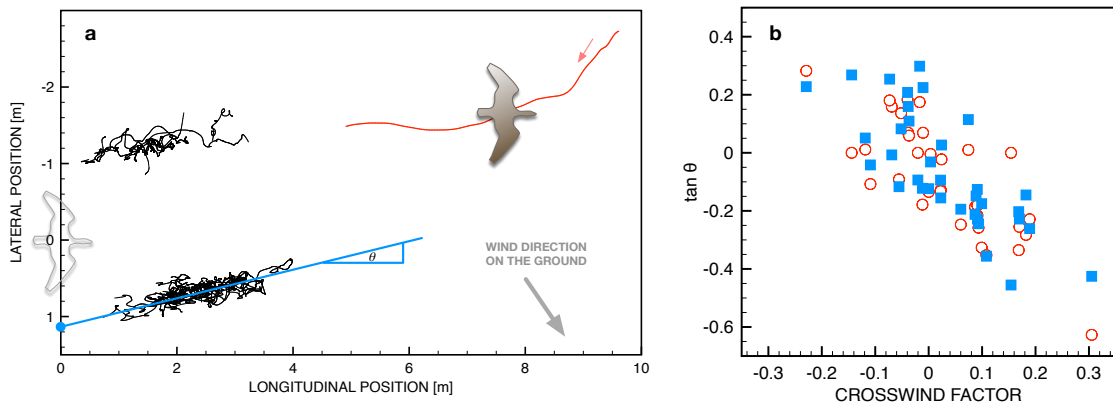


図2: (a) マガンの群れが飛行中の前後の個体の位置関係。(b) 横風の強度（風の横成分を飛行速度で除した値）と相対位置のずれの程度（aの θ の正接）との関係。丸が右側、四角が左側の個体。

(2) V字型飛行隊形の成因

渡り鳥の隊形が、飛行中に翼端に生じる渦場の上昇成分を利用するように最適化された結果として生じるという理解は、トキなどの実データを通じて支持されてきている一方で、もしそうであれば、渦線は上空の風と共に移流するため、最適な位置関係は風の影響を受けているはずである。さらに、渦の強弱は羽ばたきの位相に伴って変動することが、数値計算や風洞実験等で明らかになっているが、上向きの気流の効果を最大化させるには、前後の個体の羽ばたき振動の位相や位置関係も調整されているべきである。ところが、従来の群れの研究では、羽ばたきの同期は観測されないと報告されている。

そこで、多数のマガンの飛行データについて、各個体の速度方向を基準として、横方向（速度と直交する方向）の位置を調べてみると、翼端渦の構造を反映して滞在確率の大きな位置は横方向に狭い領域に局在していることが確認されるだけでなく、地上での風向・風速とも高い相関をもつことが明らかとなった（図2）。このことは、前方個体で生じた渦が風によってドリフトし、飛行に最適な位置がそれに応じて変化するという描像と完全に一致するもので、V字隊形の成因を説明する新しいエビデンスと言える。

次に、羽ばたきのタイミングについて、群れの前後の個体について、位相相関を求めてみると、進行方向の距離が1~3 m程度の範囲に限り中程度の相関（相関係数約0.4）となり、それ以外では顕著な相関は見られないことがわかった。すなわち、羽ばたきには弱い相関が見られるものの、位置関係でも変化するため、単純にペア同士の羽ばたきを観察するだけでは検出できなかった可能性が高い。また、羽ばたきのタイミングは、後方が前方に比べ、0.1秒程度遅れていた。飛行速度が実測で15m/s程度であることから、1.5m後方の個体は前方の個体との羽ばたきの位相が「空間的に」一致することになる。事実、多数のマガンの群れについて、前後の距離分布を調べたところ、1.4~1.6m程度に顕著なピークが見られ、最適位置が選択された結果と解釈できる。羽ばたきの遅れ時間（0.1秒）は、羽ばたきの周期（0.22秒）の凡そ半分であることから、視覚等によって前方個体と反対位相で羽ばたきながら、前後の距離を調整するような形の制御が行われている可能性が示唆される。

群れ全体として見ると、これは、緩く非対称に結合した1次元の振動子系として捉えることができる。事実、蔵本モデルの結合を非対称にしたモデルによって、群れの羽ばたきの時空間的な乱れの様子をよく再現できることも確認された。

(3) 一次元的な群れ構造の安定性

一次元的な群れにおいて、先頭付近の揺らぎが増幅されながら後方に伝搬する様子は、研究代表者自身による先行研究で示されていたが、その詳細については、不明な点がいくつか残されていた。当初は、揺らぎにとって主要な運動のモードは、一次元交通流と同様に、個体間の進行方

向の距離と仮定していたが、本研究を通じて、三次元的な動きを詳細に分析することにより、進行方向に対して直交する方向の揺らぎが重要であることが明確となった。翼端渦の渦線の位置を基準として後続個体が位置制御を行っているとするれば、これは妥当な結果と言える。

先頭から n 番目の個体の時刻 t での横方向の変位を $x_n(t)$ としたとき、前の個体との相対的な位置と速度によって、二次遅れ線形制御が

$$\ddot{x}(t) = \alpha(x_{n-1}(t) - x_n(t)) + \beta(\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t))$$

のように行われていると仮定する。このような系では、パラメータに依らず揺らぎが増幅されながら後方に伝搬する性質を持ち、本来的に不安定であることが、より一般の場合も含め、先行研究で示されている (string instability)。ただし、空間波数 k の揺らぎの拡大率に着目すると、波数 0 付近では線形不安定である一方、

$$k^* = \cos^{-1} \left(\frac{2\beta^2 - \alpha}{2\beta^2 + \alpha} \right)$$

より大きな波数については、システムは安定であることが導かれた。現実の群れの長さは有限であるから、不安定波長となる個体数、すなわち $N^* \sim 2\pi/k^*$ 、あるいはその 1/4 程度であれば、群れ構造は安定に保たれる可能性がある。

そこで、上記の制御モデルを内部空間モデルとし、粒子フィルターを用いて、マガンの群れの飛行データからパラメータ α 、 β の推定を行った。その結果、パラメータの値は群れの乱れ方に依存してかなり変わるようであるものの、安定に飛行している群れについては概ね安定した値が得られた (図 3)。これら

のパラメータから予想される群れの臨界サイズは、多数の群れについて計測した際の平均サイズ (16.3) と同程度になる。群れの大域的な形態や乱れ方、風の状態と、これらの制御パラメータとの関係性に興味を持たれるが、これは今後の課題である。

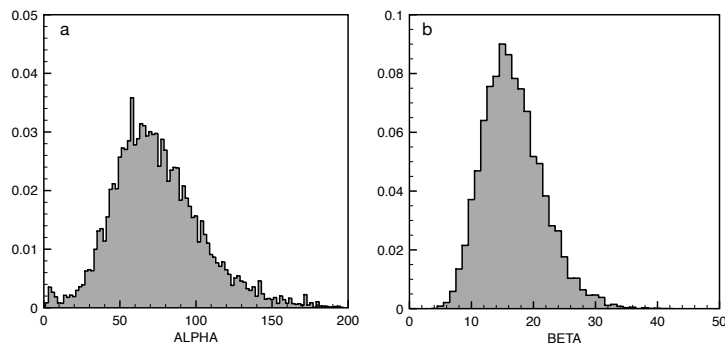


図 3: マガンの群れのペアの運動について粒子フィルター(PMMH法)によって制御モデルのパラメータ (α と β) をサンプリングした結果の例

一次元的な群れであっても、視覚等を通じた長距離的な相互作用が生じている可能性がある。例えば、安定に飛行している V 字型の群れでも、その形態は全くの直線状とはならず、後方はより広がり角が大きい事例がしばしば観察されており、それはより前方からの視覚情報を得るためではないか、と言われている。そこで、個体間の情報の流れを可視化する試みも、期間中に行った。具体的には、各個体の三次元加速度から離散的な状態を定義し、群れの各ペアについて移動エントロピーを求めてみたが、計測時間が 30 秒程度と限られることから、確率を議論するにはサンプル数が不足し、前後の個体で高い値が得られる他は、新しい知見を得るには至らなかった。こうした長距離的な相関や因果関係についても、今後と課題と考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------