

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400424

研究課題名(和文)鳥の群れの集団動力学

研究課題名(英文)Collective dynamics of flock of birds

研究代表者

早川 美德 (HAYAKAWA, Yoshinori)

東北大学・教育情報基盤センター・教授

研究者番号：20218556

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：鳥の群れの集団的な挙動を、個体レベルの運動の定量的な計測に基づいて物理的な視点で理解するための試みとして、2メートルという基線長でありながら可搬性の高いドライカーボン製のステレオ動画撮影システムと、専用の画像処理ソフトウェアを開発し、主として、マガンの群れの動態の解析を行なった。その結果、近接個体間の相対位置の調整過程の詳細から個体間の相互作用の様態を推定し、それに基づいて群れの多体運動を運動方程式によって記述、計測データと併せることでモデルのパラメータを推定することに成功した。

研究成果の概要(英文)：To understand the collective behavior of flock of birds in physical view points based on quantitative measurement of individual motion of members, we have developed a portable stereo imaging system made of carbon material with baseline of 2 meters as well as image processing software and we conducted field measurements of the trajectories of individuals in the skeins of wild geese. Using a stereo camera system, we estimated the detailed adjustment processes between neighbors to estimate effective interactions. Based on the field measurements, we proposed a phenomenological equation of motion for collective flight of geese and discussed the conditions for stability of collective flight.

研究分野：数物系科学

キーワード：群れ 動力学 非線形波動 ステレオカメラ 三次元計測 結合振動子

1. 研究開始当初の背景

バクテリアから大型動物に至るまで、様々な生物に見られる「群れ」は、その運動パターンの多様さや複雑さが興味深いだけでなく、生物システムの環境適応の基本的な様態として、生物学や生態学の重要な研究対象であることはもちろん、相互作用しながら運動する要素の多体系の数理物理学 (所謂「渋滞学」の一般化)、ロボット工学や輸送工学、ひいては、社会現象をも含む多くの学問領域と関係し、かつ、背後に共通の数理的構造の存在が予感される、まさに学際的な問題である。

例えば、ムクドリなど小型の鳥の中には、条件によって時には数千～万羽の規模のクラスターを形成し、集団と外部との境界が明確で、自発的に運動する液滴のように振る舞うものがある。同様な運動は、イワシなどの魚群においても観察される。こうした系に特徴的なのは、決まったリーダー無しで、ほぼ同質の個体から成る集合体があたかも一個体の多細胞生物のように振る舞い、ときに外敵や障害物からの回避の際に顕著なように、それが自律的に制御されているように見える点である。

さまざまな観点で、こうした群れ行動は「面白い」現象ではあるが、これを定量的科学の対象とするためには、各個体の特性のみならず、個体間の相互作用と応答、さらには、それらが多体システムとして発現する「集団モード」を理解するステップが欠かせない。言うならば、物理学こそが「群れ」の研究の縦糸となるべきである。ところが、意外にも、数理物理学的な研究対象として、こうした群れの運動を実測に基づいて解析した前例はほとんど無かった。

近年になって、バクテリア等の微生物、あるいはそれを模した自走する (マイクロな) 要素の集団が「アクティブマター」などと呼称され、国内外の物理や数学のコミュニティーで活発に研究されるようになってきている。こうしたマイクロな系は、鞭毛や繊毛による駆動機構の理解が進んでいること、ストークス近似や反応拡散理論などによる現象の記述が有効であることに加え、何よりも、(顕微鏡下等で) 個と全体の動態を同時的に計測できる点が、定量的な議論とその実証性に繋がっているように感じられる。

これに対して、鳥の群れは高レイノルズ領域 (10^6 以上) で、上記のようなマイクロな系の対極的な状況にある系である。個体・集団のサイズ、行動のスケール、運動速度とも大きく、しかもその三次元性から、正確な計測は格段に難しい。鳥の群れの中の個体位置と速度が同時に計測できるようになったのは、世界的に見ても、比較的最近になってのことである。そうした事例として、例えば、Ballerini et al. (PNAS 105(2008))、Cavagna et al. (PNAS 107(2010)) は、独自に長深度の

ステレオ計測システムを開発し、ムクドリの大群について、個体の内部配置と配向性、各個体の平均速度からの揺らぎなどを計測している。その結果に基づいて、(i) 個体の相互作用の範囲は、物理的な距離ではなく、その個体に何番目に遠いか (トポロジカルな距離) に依存すること、(ii) 群れの中の速度揺らぎの相関は、群れ全体のサイズと一定のスケールリング関係にあること (内部揺らぎのスケールフリー性)、など、新しい概念や知見が提案された。また、小型の GPS ロガーを個体に取り付け、ハトの編隊の動的な組み換え過程を複雑ネットワークの手法で解析した研究 (Nagy et al., Nature 464 (2010)) もある。こうした動物の群れ行動の研究に対して、例えば、EU 域内では大きな研究予算が配分されており (EU ERC COLLMOT project)、物理コミュニティーを含む学際的なアクティビティーが高まりつつあった。

一方、上述の研究が公表される以前から、代表者は、鳥の群れの三次元計測を中心とし、群れの数理的な理解を目指して、東北大学学際科学国際高等研究センター・プロジェクト研究「群れの集団動力学とその制御機構」(2008年度-2010年度) を立ち上げた。その成果として、独自方式による三次元計測システムを試作し、主に宮城県内で、マガンやムクドリ等のフィールド計測を実施してきた。その結果、V字の編隊飛行でよく知られているマガンについて、その紐状の群れの中を伝搬する波動の存在を発見し、分散関係等を計測することに成功した。さらに、マガンの群れサイズを、凝集と分裂の効果を考慮した平均場モデル (Smoluchowski 方程式) で記述し、実測値と良い一致を得た。

このように、代表者は、主に生態学や動物行動学の対象であった鳥の群れを、物理学の俎上で数理物理学的手法によってさらに展開させたいと考えてきた。しかしながら、計測機材の性能、データ処理等において克服すべき課題が具体的に明らかとなった。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究では以下の二つの目的を設定した：

(1) 群れの動態の計測手法の確立

ステレオ動画撮影とその画像処理によって、鳥の群れの全個体の三次元的な運動を計測するシステムを開発し、フィールドでそれを実証すること。

目標として、100m 程度の圏内にあるサイズ 20cm 程度以上の大きさの鳥について、少なくとも、個体サイズ以下の空間分解能と十分な時間分解能で、数秒間程度以上にわたってトラッキングできる性能を目指す。

(2) 群れの動態の定量的な解析

作成したシステムを用いて実データの収集を行い、運動軌跡の再構成のみならず、群れの内部に励起される各種の集団モードと

その時間発展の解析、複数個体の多体的な有効相互作用の推定を行うこと。

それを踏まえ、多様な群れの様態の物理的な必然性を明らかにすること。例えば、マガンはマガンのように、ムクドリはムクドリの群れを形成する理由を、その「目的性」からではなく、多体システムの動的安定性の観点から説明すること。

3. 研究の方法

研究目的の(1)を達成するために、主として、以下の2つの項目について計測システムの開発を行う：

(1) 三次元計測機器の開発

鳥の群れの動態を計測するためには、高い空間・時間分解能を持つ装置が必須である。種によっても異なるが、例えばムクドリの体長は約0.2m、マガンの体長は約0.7mであり、対象の位置をそれよりも高い分解能で決定することが必要となる。一方、飛行速度は、15m/s程度以上であるので、体長と同じ程度の距離を移動する毎に撮影しようとする、最低でも、ムクドリの場合は70fps程度、マガンの場合は20fps程度以上の速いフレームレートが必要と見込まれる。

一般的なビデオ撮影機材(30fps)を用いる場合、フレームレートが不足することに加え、①CMOSセンサーはローリングシャッター方式を採用しているため、画素毎のシャッタータイミングにずれが生じる。これは、画像から再構成された三次元配置の歪となってデータに現れる。特に、群れが画像センサーの上下方向に広がりを持つ場合、無視できない誤差が生じてしまう。

②ステレオカメラの完全な同期を取ることができず、ステレオ計測の誤差要因となるばかりか、速い現象の解析が困難となる。

③民生用、プロ用を問わず、不可逆的に圧縮された動画データには高い空間周波数成分がそもそも欠損しており、画像処理の際に精度が出しにくい。

等の問題があるため、グローバルシャッター方式の産業用CCDカメラ(2048x2048画素、60fps以上)、大型三脚一式を新規に購入し、屋外でステレオ動画を記録するシステムを製作する。撮像機器の改良に加えて、カーボン素材を活用したステレオカメラ全体の軽量化、高剛性化などによって、機械的な安定性の向上をはかり、手動での群れの追尾に対応させる。また、カメラの仰角と方向角をデータロガーに記憶し、事後的な座標の再構成も可能とする。

(2) 画像処理プログラムの開発とトラッキングアルゴリズム開発・実装

撮影したステレオ画像の中から鳥を同定し、かつ、その三次元位置を求める処理の多くは、人手に頼るところが大きかった。本研

究に着手する前に、画像処理ソフト NIH ImageJ 上で動作するステレオ画像解析用プラグインを独自開発し、ステレオ画像上の物体のマッチング、位相相関法を用いたサブピクセル精度での視差の算出と三次元位置の推定を、半自動的に行うことは可能となっていた。

しかしながら、マガンで100個体以上、ムクドリの場合は1000を大きく上回る個体数からなる群れの動画像について、ビデオフレーム毎にマニュアル作業で解析を進めるのは事実上困難であるので、処理のかなりの部分について自動化を実現する。ただし、各個体の軌跡を再構成するためには、以下の課題を克服する必要がある：

- ① 複数の個体が画像上でオーバーラップする確率が高く(画像上で異なる個体同士が全く重ならない確率は個体数とともに指数関数的に減少)、ステレオ計測では位置の特定が不可能な個体がビデオフレーム毎に必ず一定数存在するのを、どのように補完するか。
- ② 群れ中の各個体は特徴に乏しく、マーカーとなるべき情報が無いので、左右画像のマッチングに加え、個体毎の同定とそのトラッキングをどのように実現するか。

計測データからの各個体の軌跡の再構成は、欠損や誤差を含む4次元(空間+時間)空間の点を、膨大な組み合わせの中から、妥当なモデルに従ってつなぎ合わせる作業に他ならない。そのために、確率的な推定アルゴリズムを組み込んだソフトウェアを新規に作成する。

これらの計測手法を用いて、宮城県内の野鳥の営巣地や越冬地において、野外観察とステレオ動画撮影を、時期と場所を変えて複数回実施する。そのデータ解析を踏まえて、以下の点を中心に、鳥の群れの集団動力学を考察する：

(3) マガンの群れの波動の解析と個体間の有効相互作用の推定

V字や鉤型の編隊で知られるマガンの大きな群れを、数十秒ないし数分程度観察すると、気流などの外乱によってではなく、系に固有のダイナミクスによって自発的に波動が励起され、紐(skein)の上を伝搬することが、代表者自身による過去の研究で示されている。

しかしながら、計測上の制約から、「飛行高度は一定」、「飛行方向に対して横向き運動の自由度は無視する」、などの幾つかの検証されるべき仮定が置かれていた。本研究では、こうした仮定無しに、三次元的な軌跡から主要なモードを抽出した上で、三次元的な群れ挙動の数理モデル(非線形波動方程式等)とそのパラメータを導出する。

(4) ムクドリ等の液滴運動のダイナミクス マガンの1次元状の群れと対照的に、ムク

ドリは多数（数千以上）の個体があたかも三次元的な液滴のように凝集し、複雑に運動する。イタリアのグループによる先行研究（Ballerini et al., PNAS 105 (2008) 等）によって、個体の空間分布や速度分布についてかなり詳細な解析が進んでいるが、未だに、秒程度以上の時間に渡る軌跡の再構成は難しい状況にある。長時間の軌跡の取得には、GPS ロガーを使う手法も考えられるが、時間・空間分解能の制限が大きい上に、デバイスの取り付けと回収も事実上困難である。

本研究では、数秒間程度以上の群れ全体の挙動を従来にない時間分解能で補足することで、その間に群れに生じる密度や配向の揺らぎの伝搬や拡散、個体間の相互作用に関する定量的な解析を目指す。

4. 研究成果

(1) 群れの動態の計測手法の確立

本研究の第一の成果として、図1に示すようなステレオ動画撮影システムを製作し、概ね実使用に耐える性能が達成されていることが確認された。ドライカーボン製の三脚、およびロッドを用いることで、2mの基線長を持ちながらも可搬性の高いステレオカメラを構成し、標準レンズを用いた場合、50m先の物体の奥行き方向の距離感度は4cm以内であることを確認した。仰角・俯角方向の距離感度はさらに高い。

ステレオ動画は60fpsのフレームレートで高速なインターフェース（USB3.0）を介してコンピューターに直接取り込まれ、現有の機器で、約30秒間の連続撮影が可能となっている。



図1 開発したステレオ動画撮影装置

また、台座には、仰角と方位センサーが取り付けられており、撮影と同時に自動的に記録される。加えて、風向風速計も設置した。

こうして収録されたステレオ動画を自動的に処理するためのソフトウェア（主にCでコーディング）の自主開発を行い、マガン

やハクチョウの群れについてベンチマークを行い、その有効性を確認した。こうして、マガンなどの大型の鳥の群れについては、カメラからの距離が200m程度の範囲内であれば、個体毎の三次元的な軌跡を追跡することが可能となった。

画像処理にあたっては、画像の位相相関を異なるスケールで多段的に行うアルゴリズムによって左右画像のステレオマッチングを行うとともに、時間的に連続する画像の類似性から、個体の同一性についての「ヒント」情報を生成し、それをステレオ画像から推定した位置情報と併せて評価することで、個体毎の軌跡の再構成が高い確度で行えるよう工夫されている。さらに、画像の重なりなどで欠損したデータ点については、時間的に前後する軌跡を外挿することによって、自動的に補完できる。

ここで開発したシステムは、大型のカモ類など、毎秒5回程度で定常的に羽ばたきながら飛行する鳥に対して有効である一方で、羽ばたきの時間スケールが短いだけでなく、動きが非定常的で予測が難しく、個体間距離が小さく密な鳥の群れ（スズメやムクドリ）については、数秒間以上に渡っての軌跡の再構成という当初の狙い（3. 研究方法（4））の実現には至っておらず、今後の課題である。

(2) 群れの動態の定量的な解析

ガンやハクチョウなどの大型の渡り鳥がV字型の飛翔体系を呈することはよく知られているが、隊形がどのようなメカニズムによって維持・制御されているのかについては、不明の点が多い。例えば、V字型隊形が「選ばれる」理由として、前方個体から生じる翼端渦による流体力学的効果を鳥が利用して飛行エネルギーを節約しているからではないか、という議論は古くからあった。しかし、現実の鳥の飛行を対象に、この仮説を定量的なデータに基づいて検証しようとする試みは、近年になってようやく始まったばかりである。

この研究を通じて、宮城県北部の渡り鳥の越冬地の各所で多数回の計測を実施し、そこで得たデータの解析をもとに、以下の新しい知見が得られた：

① マガンの隊列は、進行横方向には翼長よりやや短い程度の距離が維持されている一方で、進行方向には数10cmから数メートル程度の大きな自由度がある。その意味で、マガンの隊列は、横方向に強い拘束を受けながら連成運動している系と捉えることができる。

相互作用の程度や時間スケールを見積もるために、前後の個体の加速度相関関数を求めたところ、前後方向の運動については、秒オーダー程度の時間スケールでは相関が見られない一方で、横方向について有意な相関が現れた。また上下方向の加速度は、横方向の加減速と連動しており、この結果は、進行

方向の調整に伴う姿勢の傾斜とそれに伴う揚力の変化の結果として説明できる。

② 隊列中の個体の配置は、前方からの翼端渦の渦線に沿った細長い領域に分布しており、V字型隊形についての流体的学的な仮説はこの事実とよく整合する。さらに進んで、データを仔細に分析すると、前後個体の相対位置関係は、観測条件によって有意に「歪む」場合があることを新たに見出した。そこで、地上で計測した風速・風向と、個体配置のずれとの間の関係を調べたところ、有意な相関関係があり、このことは、渦線の分布が横風によって変形され、変形された渦線に沿ってマガンが配列していることを強く示唆している。

③ 飛行方向に対して横方向の運動の相関は、130ms程度の時間遅れを伴っており、これは、代表者自身によって報告されている、群れを伝搬する揺らぎの伝搬速度(7個体/s)ともよく一致する。そこで、この横方向の位置の揺らぎを主要な自由度として取り出した、一元的な現象論モデルを提案した。

このモデルは、一次元交通流の渋滞を記述するモデルとして研究されている最適速度(0V)モデルと、相互作用項の詳細を除けば、同一のもので、パラメータによって系が不安定化し非線形波動が伝搬する解を持つ。

計測データからモデルの動作域とパラメータを推定すると、マガンの群れは不安定な領域にあって、個体間の相互作用を仮想的なバネとして表現した場合、そのバネ定数は50N/m程度も見積もれること等を見出した。この結果は、動物の群れの多体系としての動的安定性に注目した数少ない研究事例のひとつと考えている。

以上は、雑誌論文や国際会議等で報告した内容であるが、研究期間中に明らかとなり、現在、発表に向けて準備中の成果として、以下がある：

④ 羽ばたきによって後方に残される渦場は時間・空間的な変調を受けているはずなので、前後の個体の羽ばたきのタイミングにもその構造が反映されていると予想するのは自然である。画像処理によってマガンの羽ばたきの位相を検出し、前後個体の関係を調べたところ、位相はランダムではなく、統計的に有意な相関が認められること、前後の羽ばたきは反対位相の関係にあることが多いこと、空間的な位相に分布にも特徴的な構造が現れること、等の知見が得られた。

これは、動物の群れの集団的挙動を、ある種の結合振動子系として理解・記述し得る可能性を示すものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

① 早川美徳、マガンの群れの集団動力学、日本物理学会誌、査読有、Vol. 70, 2015, pp. 718-721.

② 早川美徳、鳥の群れの集団ダイナミクスとその計測、数理解析研究所講究録、査読無、Vol. 1944, 2015, pp.30-35.

③ 右衛門佐誠、水口毅、早川美徳、ステレオカメラを用いた羽ばたき運動の解析、数理解析研究所講究録、査読無、Vol. 1940, 2015, pp.82-89.

④ 早川美徳、動物の群れと動的相互作用としてのコミュニケーション：マガンの群れのサイズ調整、数理解析研究所講究録、査読無、Vol. 1917, 2014, pp.164-171.

⑤ 右衛門佐誠、水口毅、早川美徳、Ordered structure in pigeon flocks : analysis of GPS trajectory data、数理解析研究所講究録、査読無、Vol. 1900, 2014, pp.56-62.

⑥ 右衛門佐誠、水口毅、早川美徳、追尾関係をもとにしたユリカモメの群れの構造解析、数理解析研究所講究録、査読無、Vol. 1853, 2013, pp.63-66.

⑦ Makoto Yomosa, Tsuyoshi Mizuguchi, and Yoshinori Hayakawa, Spatio-temporal structure of hooded gull, PLOS ONE、査読有、Vol. 8, 2013, e81754(8 pages).

[学会発表] (計5件)

① Yoshinori Hayakawa, On the stability of the line formation of geese、First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics (2015年10月29日、京都大学(京都府京都市)).

② Tsuyoshi Mizuguchi, Makoto Yomosa, and Yoshinori Hayakawa, Relation between spatial location and temporal delay in flock behavior、First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-inspired Robotics(2015年10月29日、京都大学(京都府京都市)).

③ 早川美徳、鳥の群れの個体間相互作用と集団運動、日本物理学会(2015年9月16日、関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市)).

④ Yoshinori Hayakawa, Spatiotemporal dynamics of skeins of airborne geese, Joint Annual Meeting of the Japanese Society for Mathematical Biology and the Society for Mathematical Biology (2014年7月31日、大阪国際会議場(大阪府大阪市)).

⑤ 右衛門佐誠、水口毅、早川美徳、旋回するハトの群れの構造解析、日本物理学会(2013年9月25日、徳島大学(徳島県徳島市)).

[その他]

本研究に関係した動画等が、研究代表者が運用するウェブサイト

<http://seaotter.cite.tohoku.ac.jp>
から閲覧可能。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 美德 (HAYAKAWA, Yoshinori)
東北大学・教育情報基盤センター・教授
研究者番号：20218556