

回転運動するマイワシの群れに対する 回転曲線の計測と解析

京都大学 人間・環境学研究科* 寺山 慧, 阪上 雅昭
Kei Terayama, Masa-aki Sakagami
Human and Environmental Studies,
Kyoto University

概要

群れの多様で複雑な形状変化を解析・理解するためには、何らかの計測手法を用いて群れの動きを数値化する必要がある。しかしながら、数千個体からなる魚群のような大規模で個体同士が重なり合うように見える密度の高い群れにおいては、各個体の追跡は非常に困難で、群れの行動の計測は困難を伴う。我々はこれまで、トーラス形状を保ったまま回転運動するマイワシの群れに対し、個体追跡を行うことなく、動画画像解析の基本的手法であるオプティカルフローを用いて、ある種の世界場である回転曲線を自動で計測する手法を開発してきた。本稿では、その手法を概説し、その手法を適用して得られた長時間のマイワシの群れの速度変化について報告する。最後にマイワシの群れに対する計測手法の今後の展望について述べる。

1 はじめに

近年魚群や鳥の群れ、人の群衆をはじめとする生物の多様でダイナミックな集団行動は生態学や動物行動学のみならず、統計物理学あるいはコンピュータグラフィクス等幅広い分野の興味を集めている [12, 4, 7]。これまでに、様々な集団運動のモデル構築やシミュレーションが試みられてきているが、モデルの妥当性やパラメータを検証・推定するためには、現実の生物の集団運動を観測・数値化した上で集団運動のモデルの解析解やシミュレーションで求められた結果とを比較することが必要不可欠である。

本研究では、海きらら九十九島水族館で飼育されている図 1 のようにトーラス形状を保



(a) 対称性の高いトーラス形状を保ちながら回転するマイワシの群れ。中央付近の影はアカシユモクザメ。

(b) 図下部の影はホシザメである。このようにマイワシの群れが他の障害物によって隠される場合もある。

(c) 捕食者などの攻撃によりトーラス形状が崩れる場合。

図1 水底から撮影されたマイワシの群れ (海きらら九十九島水族館にて)

ちながら回転運動を行うマイワシの群れを研究対象としている。この群れは、水槽内に飼育されているサバ、シユモクザメや野外から飛来する鳥などの捕食者に襲われた際に、図1(c)に見られるように鋭敏に反応し群れ全体の形状を変化させるが、数十秒程度でトーラス形状に戻り回転運動を続ける。我々はこれまで、手動で群れの一部の個体を追跡することで速度を計測し、回転する集団運動のひとつの特徴量として回転曲線に注目し計測を行ってきた [14]。回転曲線とは、集団の回転中心からの半径方向についての各位置での回転速度の大きさをプロットした曲線である。図2に回転曲線の模式図を示す。これまでの研究では群れの回転中心から群れの平均体長 $\times 1$ 分の幅を持つリング状の領域を設定し、各領域での魚の平均の速さを求めることで回転曲線を計測してきた。回転曲線を調べることで、魚群の全体の動きの特徴を捉えることができ、[14]での計測から基本的に回転の中心よりも外側に位置する個体ほど速く泳ぐが、角速度を一定にする程ではないことが示唆されていた。しかし、手動での個体の追跡は非常にコストがかかるため、手動での計測によって長時間にわたる回転曲線の傾向や時間変化を計測することは困難であった。そこで、オプティカルフローを用いて自動的に回転曲線を推測する手法を開発した [10]。また、その手法を用いて約2時間にわたる回転曲線を計測し解析した [11, 13]。

本稿では、オプティカルフローを用いた回転曲線の自動計測手法とその手法によって得られた長時間にわたる回転曲線の時間変化について簡単に解説する。最後に、主にカメラ

*1 本研究では各動画ごとに見かけの平均体長 (pixel) を計算し、それを単位長さ (体長, BL) として速さを計算する。

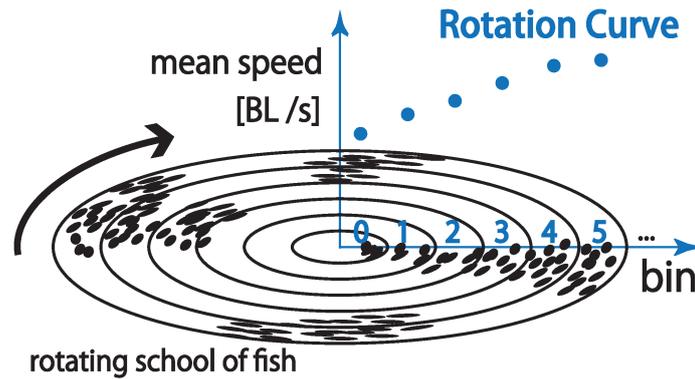


図2 回転曲線 (Rotation Curve) の模式図. 論文 [10], 33 ページ, Figure 1(c) より転載

などの光学機器を用いたマイワシの群れ観測手法の改善について展望を述べる。

2 オプティカルフローを用いた回転曲線の計測手法

本章では、オプティカルフローを用いた回転曲線の計測手法について概説する。なお本手法の詳細については [10] を参照されたい。

マイワシの群れの回転曲線を計測するためには、魚群の領域を図2に示すように分割し、それぞれの領域に含まれる魚の速さを求めればよい。しかしながら、図1が示すようにマイワシの群れでは各個体が頻りに重なり合い、またマサバやアカシユモクザメなどの陰に隠れてしまうこともあるため、継続的なマイワシの個体認識と速度の測定は非常に困難である。

そこで我々は、画像処理分野でよく知られているオプティカルフロー計測アルゴリズムを用いて、個体識別と各個体の速度の測定を行うことなく回転曲線を推定する手法を開発した。ここではその基本的な考え方を説明する。オプティカルフロー（フロー）とは、連続する二枚の画像中での局所的なパターンの動きをベクトルで表現したものであり、様々なフロー推定アルゴリズムが提案されている。画像中を移動する物体に対し、フローを計測し、物体の周囲で計測されたフローを平均することで物体の速度を推定することができる。我々はこの考え方に従って、マイワシの群れに対し Färneback によるオプティカルフロー推定アルゴリズム [6] を用いて各領域での速さを推定し回転曲線を計測した。ただし、計測に使用した動画には水面の波に起因するノイズやマイワシ以外の魚類の動きを反映したフローも含まれるため、フローの回転方向とフローの大きさの条件を課すことによってマイワシの群れのフローだけを抽出している。

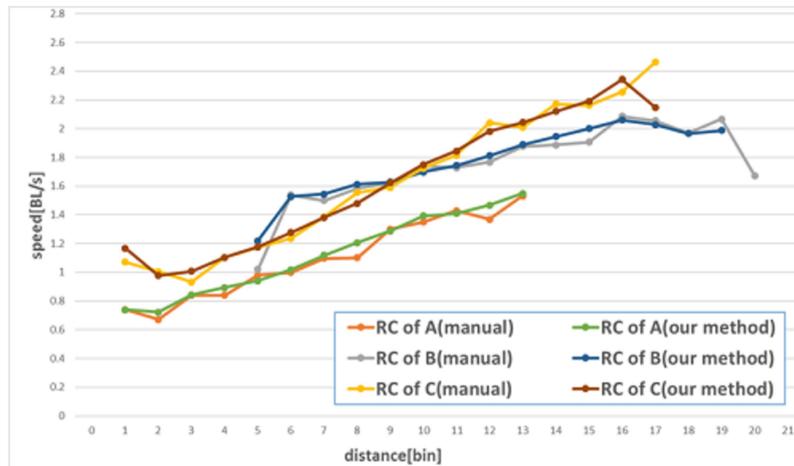


図3 3つのシーンA, B, Cに対し提案手法と手動で得られた回転曲線(RC)との比較. 論文[10], 39ページ, Figure. 9より転載

回転曲線を計測するためには、回転の中心を定める必要がある。我々は以下のような最小二乗法に基づくアルゴリズムに従ってマイワシのフローから中心を計算した。まず、各フローを規格化した (u_{xi}, u_{yi}) は群れの回転の中心を中心としそのフローの位置 (x_i, y_i) を通る円の接線方向にをほぼ向いていると仮定する。すると (x_i, y_i) を通るフローの法線は、中心座標 (x, y) の近くを通ると考えらる。ここで、中心と法線との距離は $|u_{xi}(x - x_i) + u_{yi}(y - y_i)|$ である。この考え方に従えば、中心はこれらの距離の2乗和

$$E = \sum_i (u_{xi}(x - x_i) + u_{yi}(y - y_i))^2$$

を極小にするという条件で求めることができる。

図3に3つのシーンに対して本手法を用いて計測した回転曲線とその精度を確認するために手動で群れの一部の速さを計測した回転曲線の両方を示す。オプティカルフローを用いた手法と手動による回転曲線の差は、後者を真値とした相対誤差の平均で0.04を下回り、また相対誤差の二乗平均平方根は0.05程度となり、本手法の実用性が確認できた。

3 回転曲線の時間発展の解析

本章では、前章で解説したオプティカルフローを用いた回転曲線の計測手法を用いて計測された2013年3月26日の約2時間分の回転曲線とそこから得られた回転曲線の性質について概説する。なお、より詳細な回転曲線の時間発展の解析については[11, 13]を参照されたい。

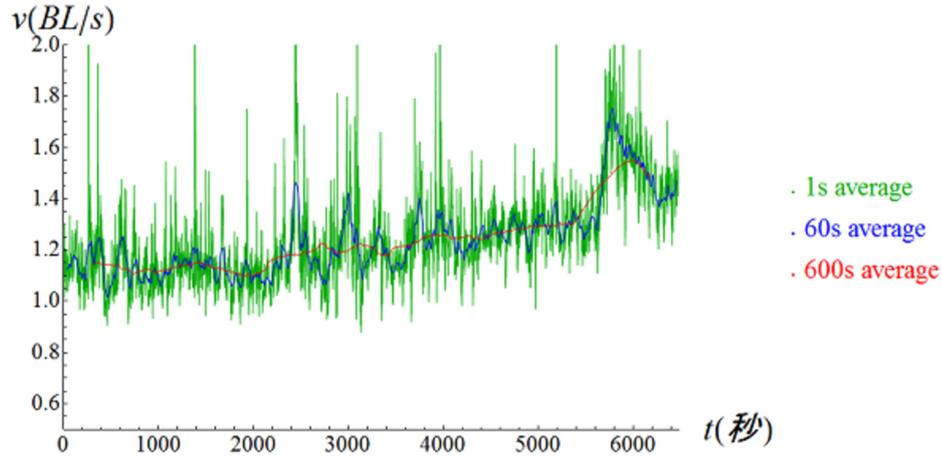


図4 中心から10番目の領域での速さの平均の時間変化. 速さの平均はそれぞれ1秒, 60秒, 600秒で平均したものを示す.

図4は中心から10番目の領域の平均速度(1秒平均)の長時間変化である. 計測中に群れは形を変えるが, この領域には殆どの時間帯においてマイワシが観測された. 図4の1秒平均の時間変化からわかるように, スパイク状の速度が急に早くなる時間帯が複数観測された. これらは多くの場合, 捕食者に襲われて群れ全体が速く泳いでいる時点と対応している. また, この動画が撮影されたのは正午を挟んで午後の給餌の時間の前までの約2時間であり, 給餌の時間帯やその直前ではマイワシを含む水槽の多くの生物が普段より活発に行動する. 図4より, 給餌の時間のかなり前からマイワシの群れ全体が徐々に速く泳ぐようになる傾向が見られた.

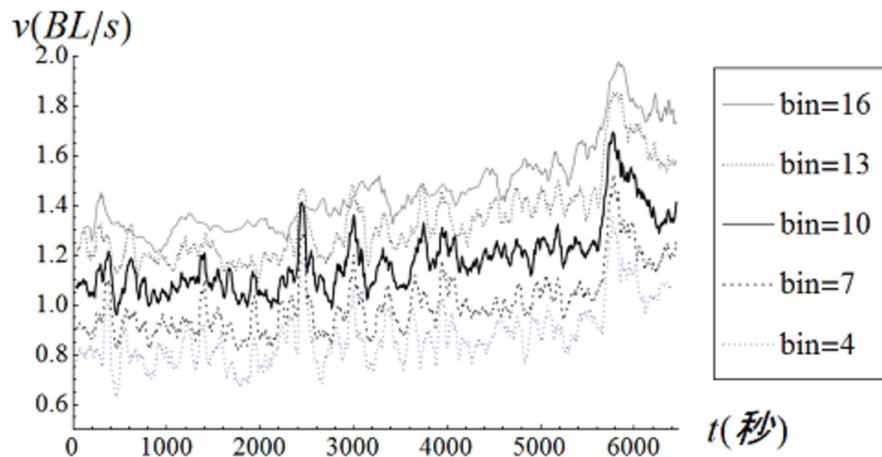


図5 中心からの様々な距離(4BL, 7BL, 10BL, 13BL, 17BL)での60秒平均の速さの時間変化

また、図5は複数の領域における60秒平均の速さの長時間変化である。この図から外側の領域にいる個体の方が内側の領域にいる個体より常に速く泳ぐことがわかる。また捕食者の攻撃で乱れている領域や観測の誤差と思われる領域を除くと、ほぼ間隔を保って全体が変化していることがわかる。これは、回転曲線の傾きがある程度保たれていることを示唆しているものの、現段階ではこのような回転曲線の性質が群れ全体の性質として現れる原因は説明できていない。

4 マイワシの群れの計測手法と今後の課題

我々は、トーラス形状を保ったまま回転運動するマイワシの群れに対し水底に沈めたカメラを用いて撮影し、オプティカルフローを用いた計測手法で回転曲線を計測した。この計測手法を用いて、密度が高く障害物を多く含む動画から自動的に群れの動きを計測できるようになった。さらに、前章で示したように、長時間にわたる群れの回転曲線の計測からマイワシの群れ運動の定量的な解析が可能になった。

しかし、本手法によってマイワシの群れの解析が十分に遂行されたとはいえない。まず、本来マイワシは3次元的な広がりを持っているにもかかわらず本研究では1つのカメラから得られた動画から回転曲線を計測しており、群れの深さ方向の情報は無視している。また、個体同士の重なりがあるときにはオプティカルフローを用いた計測方法のみでは各個体の速度は推定できない。しかし、群れの性質を解析するためには先行研究 [2, 3] が示すように各個体の位置と速度の計測が不可欠である。

本章では本研究が対象としているマイワシの大規模な群れに対する計測問題について、他の集団運動をする生物との類似点と相違点に触れながら簡単にまとめ、今後の取り組み目標について述べる。なお、ここでは集団の各個体の位置情報を一定時間にわたって、主にカメラ等の光学機器を用いて計測する場合を考える。

4.1 マイワシの群れの計測における問題点

まず、本研究が対象にしているマイワシの群れは三次元的な広がりをもっており、そのために個体同士の重なりが発生する。他の生物の集団行動では、例えば平面的な陸上を移動する人間あるいはシャーレや培地上を移動するバクテリア等移動が基本的に二次元に制限されているものも多い。このような場合は、個体同士の重なりにより背後の個体が追跡できなくなる等の問題は発生しない。また、魚群の場合には浅い水槽内を泳がせるなどして移動を二次元に制限することもある。浅い水槽においては、混合ガウス分布による推定

や魚の形のモデルを用いるなどして、多少の個体同士の重なりには頑強な自動位置計測研究が進んでいる [5, 9]. しかし、鳥の群れや魚群など三次元的広がりを持つ集団運動の場合には、個体同士の重なりにより背後に隠れた個体の動きを推定する、あるいはカメラ等の計測機器を複数設置しカメラ間で各個体を同定するなどする必要はある。

さらに、魚特にマイワシなど小型の回遊魚の場合群れを構成する個体数が多く、例えば、我々が対象としているマイワシの群れはおおよそ 2000 匹から 4000 匹程度の個体から構成される。また、マイワシ等の小型の回遊魚はムクドリ等の群れに比べ群れの密度が高いという問題点も存在する。実際、数千匹の European starling の位置を測定した [2] らの研究では、各個体の最近接距離の平均は約 2.6 翼長 (5.3 BL) であったと報告されているが、マイワシの群れの平均最近接距離は約 0.3 BL であった。この数字が示すように、マイワシの群れではただでさえ計測を困難にする個体同士の重なりが非常に頻繁に発生するため、全個体の位置を一定時間計測することは大変難しい。

4.2 今後の計測に向けて

我々は上記の困難を鑑み、本研究では各個体の速度を計測せずに、オプティカルフローを用いて回転曲線というある種の速度分布を計測したが、今後の魚群の研究を進める上で各個体の正確な位置の計測は必要不可欠である。以下では今後の研究計画を含めマイワシの群れに対する計測手法の可能性について述べる。

まず、カメラを使った計測を行う場合には、観測機器が 1 つでは通常の方法では 3 次元の位置・速度を計測できないうえ他個体の陰に隠れた個体は追跡できないので、二台以上の複数の機器を用いた計測に取り組む必要がある。カメラの位置、光軸の向きを制御でき、レンズによる画面の歪みが修正でき、また複数カメラ間での各個体の同定ができれば各個体の三次元位置が計測できるはずである。そのとき、あるカメラから見たとき個体同士の重なりが発生しても他のカメラから位置情報を計算できると考えられる。さらに、これまでに開発された追跡手法 [1, 3, 8] を組み合わせて自動的に各個体の位置を決定できれば長時間にわたって群れの正確な動きの計測が期待できる。ただし、群れの状態によっては各個体が非常に接近する場合もあり、そのときには複数のカメラを使っても他の個体の背後に隠れてしまう個体は出てきてしまう可能性は否定できない。

また、カメラ等の光学機器を使わず GPS ロガーや各個体に小型の発信器を付けて各個体の位置を同定することも考えられる。しかし、体長が 10 数 cm からせいぜい 20cm のマイワシにそのような機器を取り付けて計測することは現段階では現実的ではないようである。今後は複数のカメラを用いた計測に取り組みつつ、カメラ等の光学機器以外を用いた

計測も視野に入れて研究を進める予定である。

参考文献

- [1] S. Ali and M. Shah, “Floor fields for tracking in high density crowd scenes,” in *ECCV*, October 2008, pp. 1–14.
- [2] M. Ballerini, N. Cabibbo, R. Candelier, A. Cavagna, E. Cisbani, I. Giardina, A. Orlandi, G. Parisi, A. Procaccini, M. Viale *et al.*, “Empirical investigation of starling flocks: A benchmark study in collective animal behavior,” *Animal Behavior*, vol. 76, no. 1, pp. 201–215, July 2008.
- [3] A. Cavagna, I. Giardina, A. Orlandi, G. Parisi, A. Procaccini, M. Viale, and V. Zdravkovic, “The STARFLAG handbook on collective animal behavior: 1. Empirical methods,” *Animal Behavior*, vol. 76, no. 1, pp. 217–236, July 2008.
- [4] I. D. Couzin, J. Krause, R. James, G. D. Ruxton, and N. R. Franks, “Collective memory and spatial sorting in animal groups,” *Journal of Theoretical Biology*, vol. 218, no. 1, pp. 1–11, September 2002.
- [5] J. Delcourt, C. Becco, N. Vandewalle and P. Poncin, “A video multitracking system for quantification of individual behavior in a large fish shoal: Advantages and limits,” *Behavior Research Methods*, vol.41, no.1, pp.228-235, 2009.
- [6] G. Farnebäck, “Two-frame motion estimation based on polynomial expansion,” in *Proceedings of the 13th Scandinavian Conference on Image Analysis*. Springer-Verlag, June 2003, pp. 363–370.
- [7] C. K. Hemelrijk, H. Hildenbrandt, J. Reinders, and E. J. Stamhuis, “Emergence of oblong school shape: Models and empirical data of fish,” *Ethology*, vol. 116, no. 11, pp. 1099–1112, November 2010.
- [8] J. Liu and Y. Liu, “Multi-target tracking of time-varying spatial patterns,” in *CVPR*, June 2010, pp. 1839–1846.
- [9] Z. Qian, X. Cheng and Y. Chen, “Automatically Detect and Track Multiple Fish Swimming in Shallow Water with Frequent Occlusion,” *PLoS ONE*, vol.9, no.9, 2014.
- [10] K. Terayama, H. Hioki and M. Sakagami, “A Measurement Method for Speed Distribution of Collective Motion with Optical Flow and its Application to Estimation of Rotation Curve,” in *Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Multimedia*, December 2014, pp.32-39.
- [11] K. Terayama, D. Tadokoro, K. Shimatani and M. Sakagami, “Analysis of a long-time evolution and fluctuations in the average torus shape of fish school,” in *Proceedings of the 6th International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms*, November 2014, pp.66-72.
- [12] T. Vicsek and A. Zafeiris, “Collective motion,” *Physics Reports*, vol. 517, no. 3, pp. 71–140, August 2012.
- [13] 阪上雅昭, 寺山慧, “魚群の速度構造と平均トーラスの存在,” 第 20 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集. 交通流数理研究会, 2014.
- [14] 阪上雅昭, 寺山慧, 炭谷竜太, “魚群のダイナミクスと情報伝達,” 数理解析研究所講究録 1900, pp.110-117, 2014.