

ユリカモメの群れ運動の解析

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

自然界の中で、魚や鳥、昆虫、ヒトも含め動物には、群れを形成し集団的に行動するものがある。その運動は、種類や個体数、環境条件によって多様である。例えば、自動車が引き起こす渋滞や、アリの群れが作るトレイルなどはその典型的な例と言える。これらの多彩な振舞いを、「アクティブマター」すなわち能動的な素子の集団運動としてとらえ、数理物理的な観点から記述しようという一連の研究が最近盛んに成りつつある。

その中でも、鳥の群れはマガンのV字型編隊やムクドリのような複雑な運動など様々な集団挙動を示す。最近では実測機器の性能が向上したことにより、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 [1, 2, 3, 4]。

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。このシステムは可動式であり、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。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。

ユリカモメは飛行の方法として、羽ばたきモードと滑空モードの2つのモードがある(図1)。ユリカモメの羽ばたき運動は速度の時系列の中に振動成分として現れる(図2)。この振動成分が羽ばたき運動に由来するということは、ステレオカメラを用いた3次元化の方法とは別に、得られた動画データの個体の形状

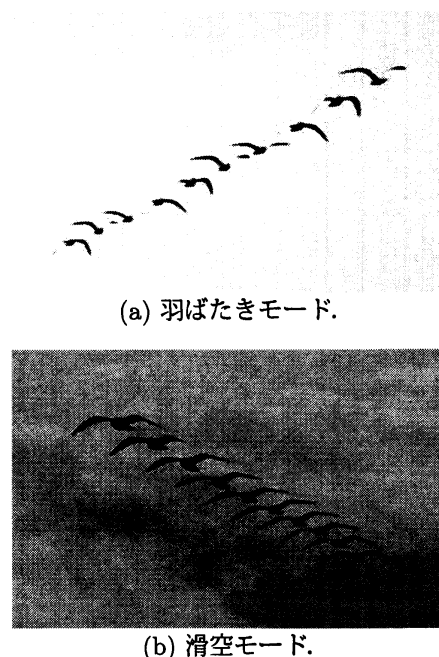


図 1: 羽ばたきモードと滑空モード. (a), (b) ともに1秒間に撮影された10枚のスナップショットを重ね合わせたもの。

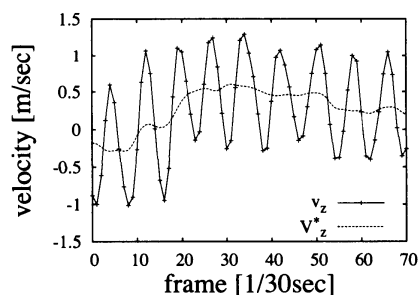


図 2: 速度 v の鉛直成分とトレンド速度 V^* の鉛直成分。

変化を測定することで確認された。振動成分の典型的な振幅は、平均的な移動速度 7~13 m/s に対して、移動速度によらず 1 m/s 程度であり、典型的な振動数は 3~4Hz である。実際には振動数と振幅は一定ではなくゆっくりとした時間スケールで変化している。

比較的近距离（ユリカモメの場合，50 m 以内）のデータを解析することで，羽ばたきに由来する振動成分を 3 次元的に解析することができた。速度から振動成分を取り出すために，式 (1) のように速度を各個体の平均的な移動方向（以下，トレンド方向） V^* と振動成分 $\delta v(t)$ に分解した。

$$v(t) = V^* + \delta v(t). \quad (1)$$

V^* は羽ばたきの周期程度では変化しない，ゆっくりとしたタイムスケールで変化している速度である。それに対して $\delta v(t)$ は時々刻々と変化し，羽ばたき運動の効果を反映する項である。具体的には，式 (2) に示すように，羽ばたき運動 1 周期 T で積分した時に，消えるように仮定した。

$$\int_{t-T/2}^{t+T/2} \delta v(\tau) d\tau = 0. \quad (2)$$

速度 v からトレンド速度 V^* を求めるために，式 (3) に示すように， v を隣接する羽ばたき運動 1 周期分で平均した。

$$V^* \equiv \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} v(\tau) d\tau. \quad (3)$$

実際には，羽ばたきの周期 T もゆっくりとしたタイムスケールではあるが変化しているため，各時刻における羽ばたきの周期 T を可変にしている。そのため，次のような手続きを行い $T, V^*, \delta v(t)$ を求めた。まず仮に周期 T を定数として， $V^*, \delta v(t)$ を求めた。求めた $\delta v(t)$ の周期を求め，これを各時刻での羽ばたきの周期と見なし，それを用いて再度 $V^*, \delta v(t)$ を求めた。この手続きを 2 回以上繰り返しても， $T, V^*, \delta v(t)$ が変わらないことは確認した。

このようにして，3 次元的な振動成分 $\delta v(t)$ を取り出した（図 3）。この中で例として挙げる図（図 2，図 3，図 5，図 6，図 7）は全て同一の時系列データに関するものである。次に，図 4 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）を導入する。 ξ 軸は個体の平均的な移動方向（以下，トレンド方向）であり， ξ 軸に垂直な平面内で鉛直方向の成分が 0 の方向に η 軸をとり，鉛直方向の成分が最大の方に ζ 軸をとる。図 4 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，トレンド方向 ξ が鳥の頭軸方向と一致するとは限らない。

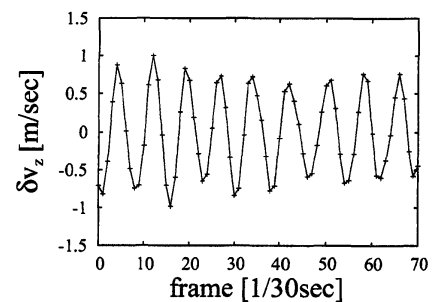


図 3: 振動成分 $\delta v(t)$ の鉛直成分。

この座標系を用いて、式 (4) に示すように振動成分 $\delta v(t)$ をトレンド方向とその垂直平面に分解し、それぞれの大きさを $f(t), g(t)$ とした (図 5)。

$$v(t) = \{|V^*| + f(t)\}e_\xi + g(t)e_\perp. \quad (4)$$

式 (4) において、 e_ξ はトレンド方向の単位ベクトルであり、 $e_\perp$ はトレンドに垂直方向の単位ベクトルである。

図 5 を見れば、振動成分がトレンド方向に対する垂直平面内だけでなく、トレンド方向にも見られることがわかる。図 6 は 3 次元的な振動を、個体に対して正面と側面から見た図になる。これを見ると、振動が直線的に行われその方向はゆっくりと変化してることがわかる。また、1 番振動成分が大きい方向は η 方向であり、左右の振動が大きいことがわかる。

このような振動成分 $\delta v(t)$ のうち η 方向の振幅が大きいということは常に見られるわけではない。各個体は遠心力や風の影響など周りの環境の変化に対して、振動の角度を変化させていると思われる。実際に図 7 は、個体の軌跡を水平面に射影したものである。ただし、羽ばたきによる影響は削除している。これを見ると、対象とした個体が大きな円を描くように運動してることがわかる。位置データから計算した曲率半径は 20 m 程度である。したがって、振動成分 $\delta v(t)$ のうち η 方向が大きいということは、遠心力に対して体を傾けて旋回していたためだと考えられる。この振動方向が水平面に対して傾いているという状態は、他の鳥でも見られる。たとえば、文献 [4] では、ハトが飛行する際に背面の向きを遠心力に対して最適になるように調節していると書かれている。

本研究では、ステレオカメラシステムを用いて、大阪の大和川を行き来するユリカモメの群れの 3 次元位置座標を再構築することに成功した。得られたデータを解析した結果、その精度は鳥の羽ばたき運動をもとらえることが可能であることがわかった。鳥の運動速度に含まれる振動成分に着目し、羽ばたき運動を数値化することに成功した。今後は複数個体の相対的位置関係や羽ばたきの周期、方向、位相等について調べる予定である。

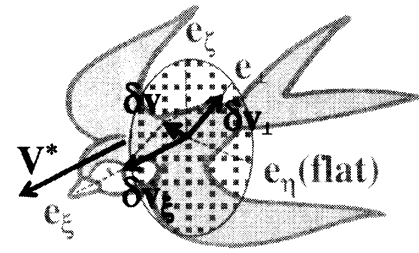


図 4: 鳥座標の模式図.

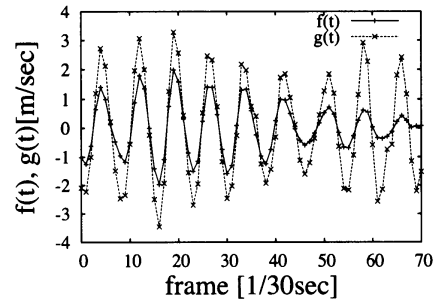
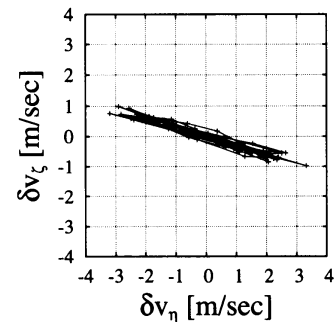
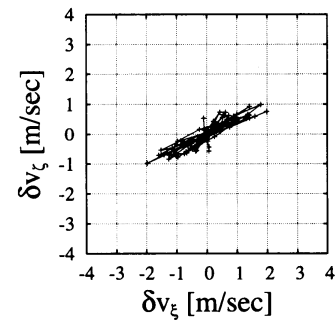


図 5: 振動成分 $f(t), g(t)$ の時系列.



(a) 正面図.



(b) 側面図.

図 6: 速度の振動成分 $\delta v(t)$ の 3 次元構造.

参考文献

- [1] 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).
- [2] Y. Hayakawa, Spatiotemporal dynamics of skeins of wild geese, *Europhys. Lett.* **89**, 48004 (2010).
- [3] M. Nagy *et al.*, Hierarchical group dynamics in pigeon flocks, *Nature* **464**, 890 (2010).
- [4] J. Usherwood *et al.*, Flying in a flock comes at a cost in pigeons, *Nature* **474**, 494 (2011).

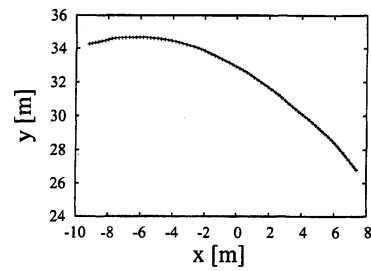


図 7: 個体の軌道. x, y は鉛直方向に垂直な平面内である.