

Ordered structure in pigeon flocks —analysis of GPS trajectory data—

右衛門佐 誠 (Makoto YOMOSA), 水口 毅 (Tsuyoshi MIZUGUCHI)
大阪府立大学大学院 工学研究科 電子・数物系専攻 数理工学分野
Department of Mathematical Sciences, Osaka Prefecture University
早川 美徳 (Yoshinori HAYAKAWA)
東北大学 教育情報基盤センター
Center for Information Technology in Education, Tohoku University

自然界では様々な動物が群れを為すことで、統一的に行動しているように思われる。例えば、イワシの魚群やアリの行列、渡り鳥のV字編隊など多種多様である。その中でも伝書鳩の群れはねぐらから遠く離れた場所からでも帰ってくることができ、また、それぞれ単独では帰ることができない個体でも、群れを為し他の個体と協同することで無事にねぐらへと帰ることができる。彼らがどのようにしてねぐらへの帰路を知り得ているのかということも非常に興味深い問題ではあるが、群れ全体として協同することも興味深く、そのような観点からの伝書鳩の群れの研究も多く見られる。近年では、GPS装置の小型・軽量化に伴い、伝書鳩の群れの各個体にGPS装置を装着し、実際の飛行の軌道を取得し、それらを解析することで経路選択に関する個体間の関係性を明らかにしようという研究も見られる。

我々はM. Nagy (Oxford Univ.) らのグループが公開しているねぐらの周りを旋回飛行しているハトのGPS軌道データを動力的な観点から再解析した。解析の結果、旋回飛行するハトの群れは数十秒間程度は相対位置を維持したまま飛行していることが明らかになった。また、相対位置と追尾行動の関係性を定量的に特徴付けることができた。

1 Nagyらの先行研究 [1]

Nagy らは伝書鳩の群れの各個体にGPS装置を装着することにより、ハトの群れの3次元軌道データを取得することに成功した。そのデータを統計的な手法を用いて解析することで、ハトの群れの中に方向選択に関する追尾行動が存在し、さらに追尾関係を基にしたネットワークが群れの中で階層構造を作っていることを明らかにした。

具体的には個体間に式 (1) で定義されるような速度方向に関する相関関数を計算し、この相関関数を最大とするような τ_{ij}^* を個体*i*に対する個体*j*の遅延時間と定義し、これをもとに*i*と*j*の間の追尾関係を決定する。式 (1) において、 $\vec{v}_i(t)$ は個体*i*の時刻*t*における速度を表している。このとき、 $C_{ij}(\tau_{ij}^*)$ が閾値を上回らなければ $\vec{v}_i(t)$ と $\vec{v}_j(t+\tau_{ij}^*)$ の間には相関がないと判断し、この個体間には追尾関係を定義しない。

$$C_{ij}(\tau) = \left\langle \frac{\vec{v}_i(t)}{|\vec{v}_i(t)|} \cdot \frac{\vec{v}_j(t+\tau)}{|\vec{v}_j(t+\tau)|} \right\rangle. \quad (1)$$

もし、 $\tau_{ij}^* > 0$ なら*i*が*j*を先導し、 $\tau_{ij}^* < 0$ なら*i*が*j*を追尾していると理解できる。これを全てのペアに関して計算することで、群れの中の行動選択の決定に関するネットワー

ク構造を明らかにすることができる。このようにして計算されたネットワークが文献 [1] の Fig. 3a である。彼らはさらにこのネットワーク構造が群れの中での相対位置や帰巢能力と相関があると主張している（文献 [1] Fig. 3b）。彼らはこの結果を帰巢能力が高い個体がリーダーとなり、群れの中の前方に位置することで他の個体を先導していると解釈している。

2 解析したデータについて

本研究は文献 [1] に用いられ、Nagy らによって公開されているハトのGPS軌道データを再解析したものである [2]。公開されているデータは大きく2つに分かれている。1つは帰巢飛行と呼ばれ、ねぐらから遠く離れた場所から帰ってくる飛行である。もう一つは自由飛行と呼ばれ、ねぐらの周りを巡回飛行するものである。2つの飛行データは速度や軌跡が大きく異なる。帰巢飛行に比べて自由飛行は速度が遅く、軌道の曲率が大きい。本研究では自由飛行にのみ焦点をあて、解析している。図1は自由飛行の軌道の

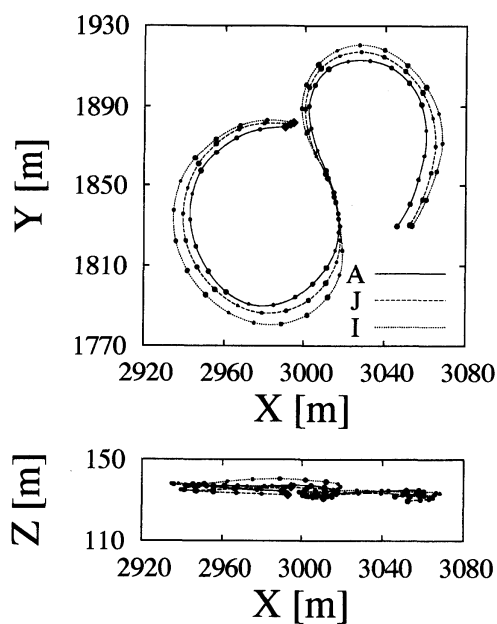


図1: 自由飛行の軌道の典型例。実際には8羽で飛行しているデータからよく調和のとれている3羽を選び出したものである。◆で示している点が始まりで、●は1秒ごとであり時間とともに大きくなり、5秒ごとに最小サイズに戻る。

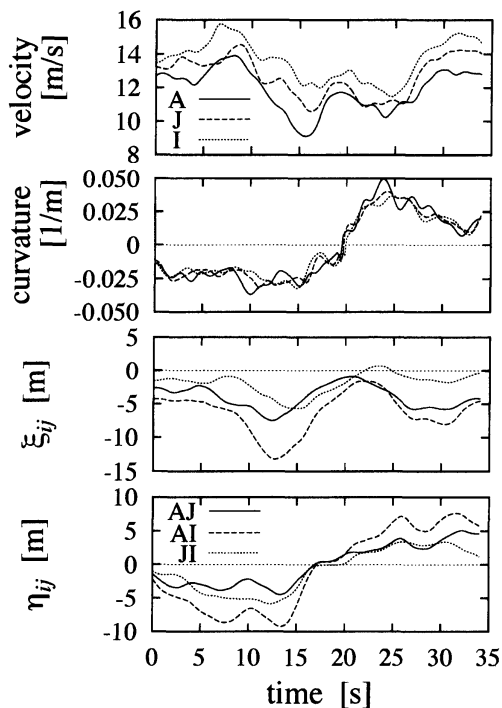


図2: 速度と曲率, 相対位置の時系列. 時間は図1と対応している. ξ_{ij} , η_{ij} はそれぞれ前後方向, 左右方向の相対位置である。

典型例である。Zは重力方向を表し、XY平面は水平面である。各個体は反時計回りに旋回していた後に、時計回りに旋回方向を変更している。また、軌道の変化は水平面内での変化が大部分で、鉛直方向にはほとんど見られない。このため、本研究ではこれらの振る舞いを理解するには水平面内の2次元での運動で十分であろうと考え、以下では2次元的な解析を行った。図2は図1に対応する速度 $v_i(t) \equiv |\vec{v}_i(t)|$ 、曲率、相対位置の時系列である。 ξ_{ij} と η_{ij} はそれぞれ i から見た j の相対位置であり、 ξ_{ij} は i の速度方向の、 η_{ij} は水平面内で ξ_{ij} とは垂直方向の相対位置である。解析では図2に見られるような、速度の大きさの個体依存性や ξ_{ij} があまり時間変化しないこと、 η_{ij} と曲率の関係などについて定量的な議論をする。

3 相対位置の時間変化

図2で見られた「同一方向への旋回中は相対位置の時間変化が小さいこと」を調べるために、データを平均角速度によって、さらに旋回飛行とS字飛行に分ける。具体的には、 $0.15 [\text{rad/s}] < |\langle \omega_i \rangle| < 0.35 [\text{rad/s}]$ の場合を旋回飛行、 $|\langle \omega_i \rangle| \leq 0.15 [\text{rad/s}]$ の場合をS字飛行とする。 $\langle \cdot \rangle$ は時間平均を表し、ここで示すデータは全て平均時間を20秒としている。この値は平均的に個体が1旋回する時間である。平均時間を10～40秒の間で変化させても、本研究で示す結果が定性的に変化することがないことは確認しているが、20秒以下にすると揺らぎが大きくなる。これは2次元近似の影響、GPS装置間の相対誤差、風速などの影響と考えられる。

このようにして分けた2つのデータに対して、相対位置の時間微分、 $\dot{\xi}_{ij}$ と $\dot{\eta}_{ij}$ を考察する。しかし、実際には $\dot{\xi}_{ij}$ や $\dot{\eta}_{ij}$ の値そのものを計算するわけではなく、それぞれを次のように変形する。

$$\dot{\xi}_{ij} \approx v_j - v_i - \omega_i \eta_{ij}, \quad (2)$$

$$\dot{\eta}_{ij} \approx -v_j \theta_{ij} + \omega_i \xi_{ij}, \quad (3)$$

ここで、 θ_{ij} は個体 i と j の水平面内での速度のなす角であり、 ω_i は個体 i の水平面内での角速度である。そして、得られた右辺を定量的に解析する。

図3は $\langle v_j - v_i \rangle$ と $\langle \omega_i \eta_{ij} \rangle$ の分布を2つの飛行で計算したものである。(a)と(b)の両者が正の相関を示し、その傾きはほとんど1である。したがって、式(2)において右辺がほぼ0となり、 ξ 方向の相対位置は飛行スタイルによらず、変化しにくいことがわかった。

では、 η 方向の相対位置はどうだろうか。図4は $\langle \omega_i \xi_{ij} \rangle$ と $\langle v_j \theta_{ij} \rangle$ の分布を2つの飛行で示したものである。(a)の旋回飛行では図3と同様に傾きが1の正の相関が見られ、 η 方向の相対位置もほとんど変化していないことがわかる。しかし、(b)のS字飛行ではその傾きは1よりも大きく、相関係数も小さく、 η 方向の相対位置が一定に保たれていないことが分かる。

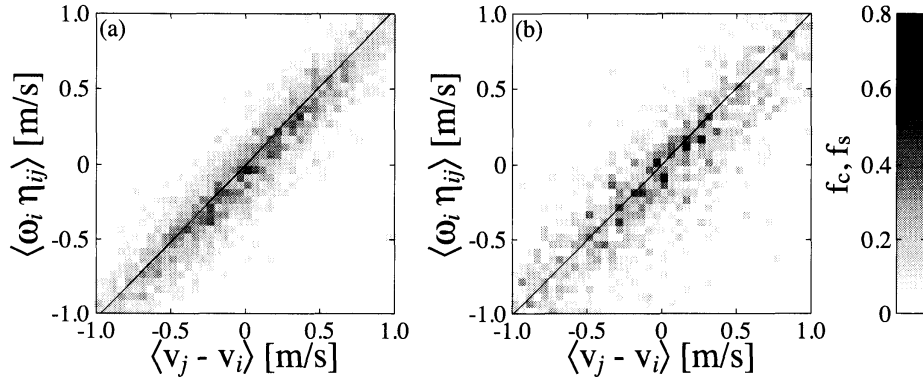


図 3: $\langle v_j - v_i \rangle$ と $\langle \omega_i \eta_{ij} \rangle$ の関係性. (a) が旋回飛行で (b) が S 字飛行である. また, f_c と f_s はそれぞれ旋回飛行と S 字飛行での分布関数を表している. それぞれの実線の傾きは主成分分析から求めたものである. [(a): Pearson's $r = 0.839$, 傾き 0.97, (b): Pearson's $r = 0.770$, 傾き 1.01]

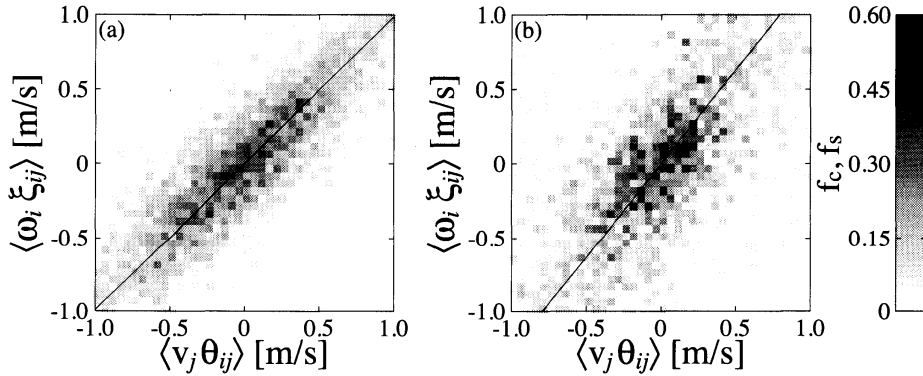


図 4: $\langle v_j \theta_{ij} \rangle$ と $\langle \omega_i \xi_{ij} \rangle$ の関係性. (a) が旋回飛行で (b) が S 字飛行である. [(a): Pearson's $r = 0.792$, 傾き 1.00, (b): Pearson's $r = 0.623$, 傾き 1.26]

ここまでの議論をまとめると, 旋回飛行では相対位置は平均的に一定に保たれるが, S 字飛行において η 方向の相対位置が時間変化することがわかった. 以下ではまず旋回飛行に限定し, どのようなメカニズムで相対位置が一定に保たれるのかを考えたいと思う. 式 (2) と式 (3) のそれぞれの左辺に 0 を代入することで次の式を得る.

$$\xi_{ij} = \frac{\theta_{ij}}{\omega_i} v_j, \quad (4)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{\omega_i} (v_j - v_i). \quad (5)$$

$\omega_i \eta_{ij}$ の符号は個体 i が j の内側か外側のどちらを飛行しているかを意味している. 従って, 式 (5) は左右方向の相対位置を維持するためには外側の個体が内側の個体より速く飛行しなければならないということを意味している.

では, 式 (4) はどのようなことを表現しているのだろうか. ここで, θ_{ij}/ω_i は時間のス

ケールであり、意味合いとしては1節で説明した遅延時間 τ_{ij}^* に近い。さらに、ユリカモメの群れで τ_{ij}^* と ξ_{ij} に次の関係が成り立つことが筆者らによって報告されている [3]。

$$\xi_{ij} = -\tau_{ij}^* V. \quad (6)$$

ここで、 V は群れの平均速度である。この関係は後方の個体が前方の個体と前後方向で同じ場所で旋回すると解釈することができる。今回の解析でも成立しているのかを確かめたものが図5である。ユリカモメのみならず、ハトでも式(6)が成立することが確認できる。

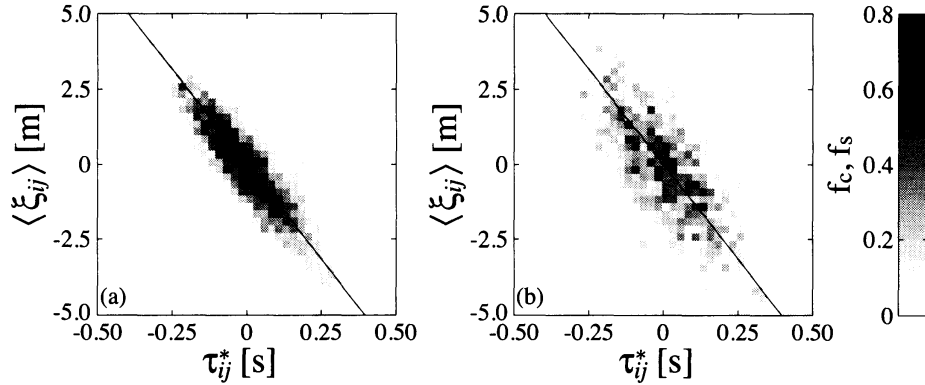


図5: $\langle \xi_{ij} \rangle$ と τ_{ij}^* の関係性。(a) が旋回飛行で (b) がS字飛行である。また、実線の傾きは平均移動速度 12.6 m/s を式(6)に代入したものである。[(a): Pearson's $r = -0.820$, 傾き -13.9 , (b): Pearson's $r = -0.994$, 傾き -17.4]

4 相対位置と追尾関係

図5や式(6)は ξ 方向の相対位置の維持するための条件を表すとともに、先導者が追尾者の前方に位置することも示唆している。これは文献[1]の結果をより定量的に表したものである。式(4)には追尾関係による制限はないにも関わらず、実測データは相対位置と追尾関係の相関を示している。 η_{ij} も含めた相対位置と追尾関係にはどのような関係性があるのだろうか。図6は先導者から見た追尾者の位置の分布であり、旋回飛行をさらに旋回方向で時計回りと反時計回りで区別したものである。旋回方向によらず先導者が前方に位置していることがこのことから確認できる。しかし、 η_{if} は旋回方向に対して対称性が破れている。さらに、旋回時に先導者の外側か、内側かということで比較すると、(a)、(b)ともに追尾者は先導者の外側に位置していることが多いことがわかる。式(5)において、追尾者が先導者に対して外側の軌道を取るということは、追尾者が先導者に比べて速く移動していることと同値である。図7は先導者と追尾者の速度の分布を示したものである。分布から全体として追尾者のほうが先導者に比べ速度が速いという傾向が確認できる。また、実線は角速度と η_{if} の分布のピークの値を式(5)に代入し計算したもので、分布とよくあっていることがわかる。

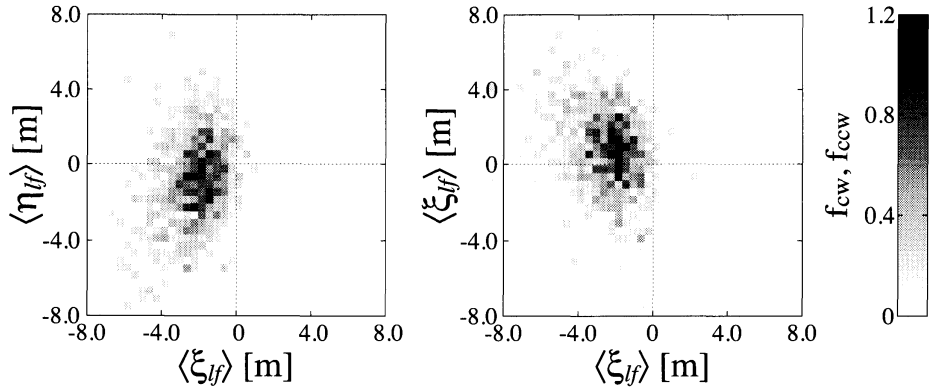


図 6: 先導者から見た追尾者の相対位置の分布. (a) が時計回りで (b) が反時計回りである.

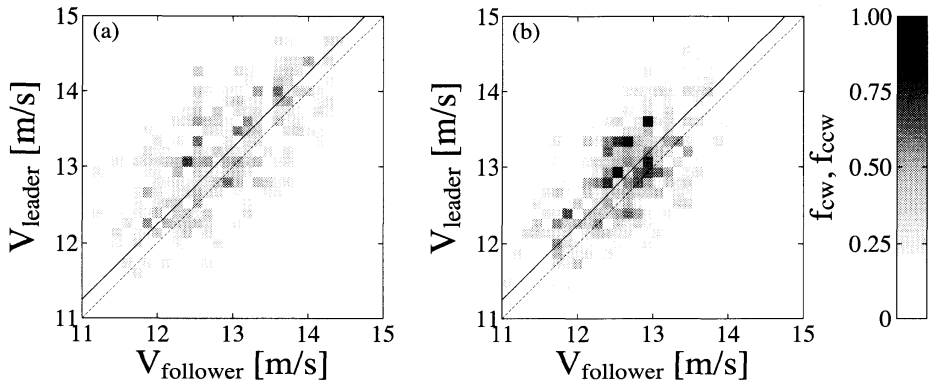


図 7: 先導者と追尾者の速度の分布. (a) が時計回りで (b) が反時計回りである.

5 ハトの群れ運動の全体像

ここまでの解析で旋回飛行時に、追尾者は先導者に対して後方・外側にいることが明らかになった。S字飛行は時計回りから反時計回り、反時計回りから時計回りへの旋回飛行間の転移過程と捉えることができる。このように考えると図 4 で確認した η 方向の相対位置の変化が、旋回方向の変更により一時的に内側に位置した追尾者の外側への移動と解釈することができる。図 8 は $\dot{\eta}_{lf}$ の分布関数で、S字飛行を時計回りから反時計回りと反時計回りから時計回りへと区別している。これを見ると、 η_{lf} の増加方向が外側方向と対応しており、S字飛行は時計回りと反時計回りの間の転移過程として解釈することができるであろう。

6 考察

今回の解析の結果、ねぐらの周りを一方向に旋回するハトの群れは数十秒程度では相対位置があまり変化しないことが明らかになった。群れ全体が相対位置を維持したまま移動するということは、衝突回避や前方の個体の作る翼端渦の利用など様々な利点が考

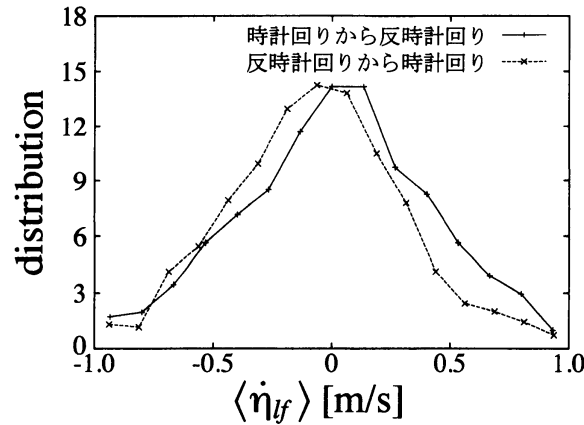


図 8: $\langle \dot{\eta}_f \rangle$ の分布.

えられる。そのため、今後の研究が進めばハトの群れに限らず、他の種の鳥の群れや動物の群れなどについても同様の結果が報告されていくと期待される。

データ解析から S 字飛行時には相対位置が変化していることが明らかになった。しかし、速度を調節することで旋回方向を変更するときであっても、相対位置を維持したまま飛行することが可能である。このことは、ハトがすでに最小パワー速度、 v_{mp} の近くで飛行していることと関係があると思われる。 v_{mp} とは水平定常飛行の中で仕事率を最小にする速度であり、これよりも低速での飛行は不安定になることが Pennycuick によって報告されている [4]。つまり、ハトにとって速度の大ききの維持が η 方向の相対位置の維持よりも優先されたからであろう。従って渡り鳥の V 字編隊など v_{mp} よりも高速で飛行している群れならば、旋回方向の変更時に速度を調節することで η 方向の相対位置を維持したまま編隊飛行することが可能であると考えられる。

参考文献

- [1] Mate Nagy, Zsuzsa Akos, Dora Biro, and Tamas Vicsek. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks. *Nature*, **464**, 890–893, 2010.
- [2] <http://hal.elte.hu/pigeonflocks>.
- [3] Makoto Yomosa, Tsuyoshi Mizuguchi, and Yoshinori Hayakawa. Spatio-temporal structure of hooded gull flocks. *PLOS ONE*, **8**, e81754, 2013.
- [4] C.J. Pennycuick. *Modelling the flying bird*. New York: Elsevier, 2008.