



日本バイオリギング研究会会報

日本バイオリギング研究会会報 No. 210

発行日 2024年2月28日 発行所 日本バイオリギング研究会 (会長 佐藤克文)

発行人 三田村啓理 京都大学フィールド科学教育研究センター

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

TEL & FAX: 075-753-6227 E-mail: BioLoggingScience@gmail.com

会費納入先: みずほ銀行 出町支店 普通口座 2464557 日本バイオリギング研究会



もくじ

新しい発見

地上 300 m における採餌行動 ～コウモリの音響 GPS バイオリギング～

藤岡 慧明 (同志社大学) 2

研究紹介

コウモリの飛行を AI で予測する

源田 祥子 (同志社大学) 3

野生下コウモリの集団ナビゲーション戦略の調査

杉森 僚太 (同志社大学) 5

比較集団行動学「入門」

村上 久 (京都工芸繊維大学) 7

イベントベースビジョンセンサー (EVS) によるコウモリ観測

12

高塚 進 (ソニーグループ株式会社テクノロジープラットフォーム TIC 先端研究部)

手嶋 優風 (国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC))

Beyond movement - what more can we learn by tagging animals with various sensors? 16

Yossi Yovel (Tel-Aviv University)

「ログボットを装着したコウモリ」

撮影場所: ザンビア 撮影者: 藤岡 慧明

地上 300 m における採餌行動 ～コウモリの音響 GPS バイオロギング～

藤岡 慧明 (同志社大学 研究開発推進機構)

陸生動物のバイオロギングとなると、センサデータの筆頭として挙がるのはおそらく GPS なのではないでしょうか。その次のセンサデータとして、コウモリ研究において特に取得したい情報となるのは、彼らが放射する超音波です。この理由の一つとして、獲物捕食の意思が音声に現れるということが挙げられます。本稿では、コウモリの採餌と移動に関する生態について調べたバイオロギング研究の成果を紹介します。

観測対象種はヤマコウモリで、飛翔しながら蛾などの飛翔昆虫を捕食します。このコウモリの超音波を調べるため、バイオロギング実験に先立って、コウモリのねぐら付近にてまず録音を実施しました。計測音声より、獲物捕食直前に見られる高頻度のパルス放射列 Feeding buzz が観測されました (図 1)。

この特徴を利用して、音響 GPS バイオロギングにより、コウモリがいつ・どこで採餌したかを調べます。当該ロガー (ArumoTech 社による特注) では、GPS 信号と併せて音声の計測時刻を記録することができます。このロガーをコウモリに装着し、回収したロガーから Feeding buzz を検知することに成功しました (図 2)。その場所の分布から、捕食行動が川エリアで集中的に行われていることが分かります。市街地エリアでは、帰巢行動と考えられるため捕食行動は少ないですが、山エリアでも上空を移動しながら採餌していることが分かりました (図 2、3)。捕食行動時の飛行高度の最大値は 306 m で、平均値 (山エリア) は 120.7 ± 641 (SD) m でした。この高さを飛行すると、現行の多くの風力タービンに衝突する危険性があります。

本研究では、サンプルサイズが小さい (N=1) ながらも、音響 GPS バイオロギングによって、コウモリの捕食行動の時空間情報を定量化し、バットストライク

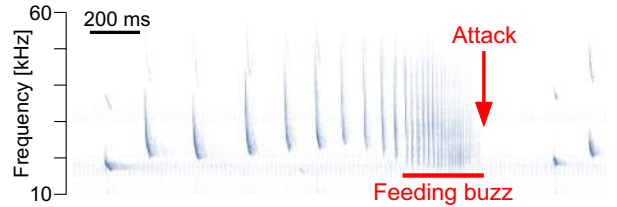


図 1. 獲物捕食時におけるヤマコウモリの放射超音波のスペクトログラム。捕食 (Attack) 直前には Feeding buzz と呼ばれる高頻度放射が見られる。

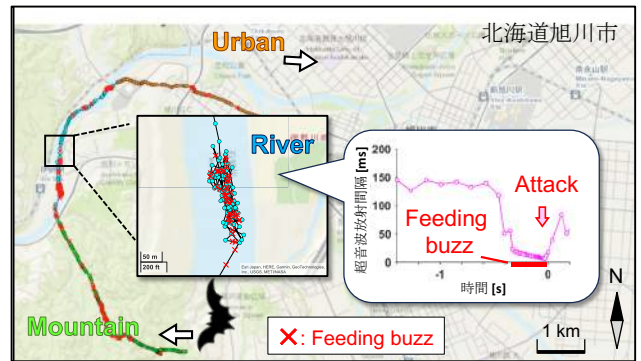


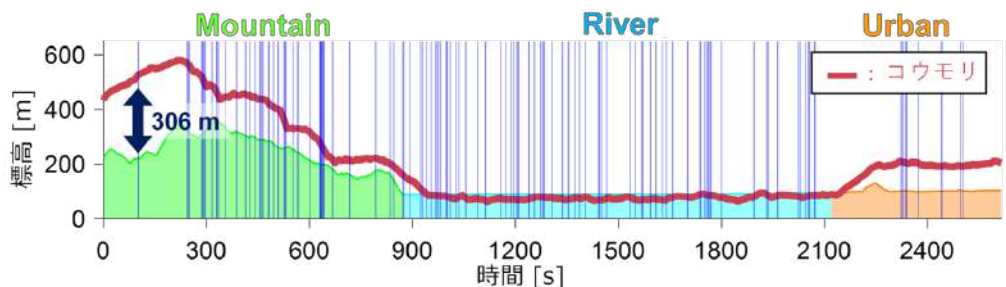
図 2. コウモリの飛行軌跡 (20:01 ~ 20:44, 5 秒間隔)。軌跡上の赤い X が Feeding buzz 観測ポイントを示す。

(コウモリが風車に衝突すること) のリスクを示すことに成功しました。今後は、サンプルサイズを増やすと共に、音響放射タイミングから捕食ポイントだけでなく、哨戒距離などの音響センシングに関するコウモリの意思決定の過程を分析することで、いまだ不明な点の多いコウモリの夜間採餌における超音波利用戦略の解明が期待されます。

文献情報

- [1] Y. Niga, E. Fujioka, O. Heim, A. Nomi, D. Fukui and S. Hiryu. (2023) A glimpse into the foraging and movement behaviour of *Nyctalus aviator*; a complementary study by acoustic recording and GPS tracking. R. Soc. Open Sci. 10 230035230035, doi:[10.1098/rsos.230035](https://doi.org/10.1098/rsos.230035).

図 3. コウモリの標高と、その飛行環境 (コウモリの真下) の標高の時間変化。青の縦線は Feeding buzz (捕食行動) のタイミングを示す。山エリアと川エリアにて捕食行動が多いことが分かる。



コウモリの飛行を AI で予測する

源田 祥子（同志社大学大学院 生命医科学研究科 脳神経行動工学研究室）



私は幼い頃から、動物と話すことができれば、なんでそんな不思議なことをするのか分かるの！とっていました。そんな不思議な行動の原因を推測するための手法の1つに、行動のモデル化があります。行動モデルを作ることができれば、シミュレーション上で動物を自由自在に動かすことができるため、動物の頭の中が手に入ったも同然です！そして、たくさんの動物がいる中で、私たちと同じ哺乳類でありながら、空を飛ぶことができるコウモリは、音を巧みに操ることで環境を認識していることから生物ソナーと呼ばれていて、「ソナー」という言葉が付くほど、工学的にみたとき魅力がたっぷりです。しかし、コウモリが音で見ている世界は、私たちが見ている世界とは異なります。コウモリは音による限られた情報しか入手できないにも関わらず、小さな脳から考え出す行動はとても複雑で、さらに、課題や環境との相互作用を加味して、行動モデルを作るとなると、人間の手では負えません。

そこで私は、AI の力を借りて、コウモリの状態から行動を予測する模倣学習によるデータ駆動型モデルを開発しました（模倣学習モデルの開発にあたり、名古屋大学大学院情報学研究科の藤井慶輔先生には大変お世話になりました。ありがとうございました！）。モデルのシミュレーションからは、コウモリには種ごとに共通する飛行戦略が存在することが推測されました。また、モデルの振る舞い方を詳しく見ていくと、コウモリの飛行はエコーロケーションと高度に協調していることが示唆されました。

方法① 行動データの取得

まず、データ駆動型モデルを作るために必要なデータを行動実験で取得しました（図1）。行動実験に用いたコウモリはキクガシラコウモリ（5 個体）とユビナガコウモリ（4 個体）の2種類です。この2種類のコウモリは飛行スタイルが全く異なり、キクガシラコウモリは比較的低速で、旋回の多い飛行をするのに対し、ユビナガコウモリは高速で飛行できる分、急旋回が苦手です。コウモリが飛行する空間は、チェーンを障害物として天井から吊り下げた、7 種類の障害物空間です。それぞれのコウモリを1 個体ずつ飛行させて、モーションキャプチャーで飛行軌跡を、4つのマイクロフォンでパルス放射タイミングを計測しました（図2）。モデルが十分に学習できるように、少しでも多くのデータを！と思いながら、コウモリの機嫌を損なわない

ように、実験を進めていくと、不思議にもコウモリがデータになりそうな飛行をしてくれるようになり（飛ばないときは本当に飛びません。1 周もしないです。めちゃくちゃ飛んだ！偉い！となるのが1分以上飛んだときです）、コウモリは私の気持ちを分かってくれているんだよ！と飛龍先生と話していました。

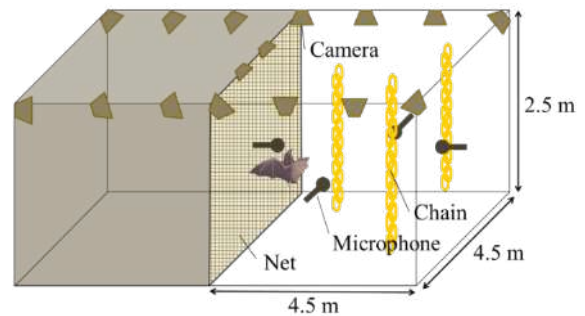


図1. 実験系

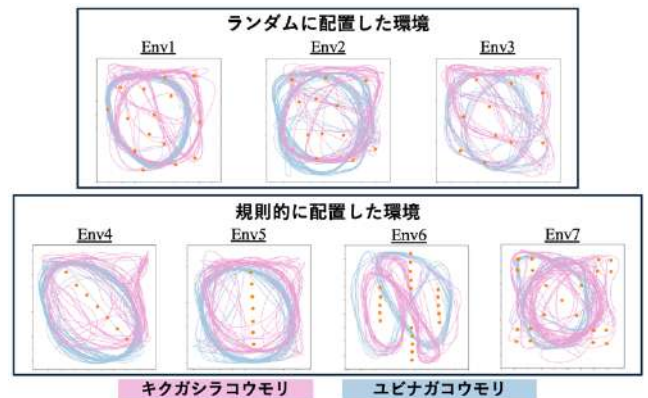


図2. 7つの障害物環境下における2種類のコウモリの飛行軌跡

方法② 模倣学習によるモデル化

取得した複数個体のデータから、模倣学習に使用するデータセットを種ごとに作成しました。データセットはコウモリの行動と、そのときの状態です。行動は2次元座標、2次元速度、旋回角度、パルスの有無の計7次元です。状態は、パルスの指向性とタイミングに基づいて認識した環境状態としました。具体的には、パルスに見立てた扇形の中にある障害物までの251次元の正規化距離です（図3）。

また、1エピソードを8秒と定義し、キクガシラコウモリの訓練データは212エピソード、ユビナガコウモリの訓練データは281エピソードで構成しました。このとき、訓練データは障害物をランダムに配置した

環境のデータを使用し、シミュレーションを行うテストデータは障害物を規則的に配置した環境のデータを使用することで、モデルの汎用性を検証しました。

模倣学習モデルは藤井先生が開発された Variational Recurrent Neural Network (VRNN) を使用しました[1]。VRNN の入力状態・行動の次元は 257 次元、隠れ層の次元は 64、隠れ状態の次元は 100 とし、出力は速度の 2 次元で構成しました。シミュレーションでは、1 エピソードの最初の 4 秒 (Burn-in 区間) から後に続く 4 秒の飛行経路を予測し、予測速度から算出したコウモリの位置と実際の位置との差をモデルの精度とすることで評価しました。

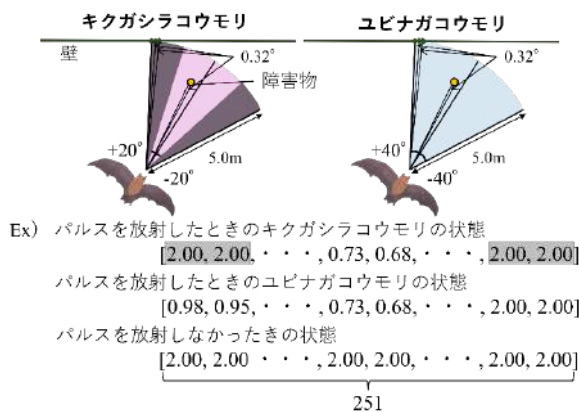


図 3. モデルに入力した状態の例

シミュレーション結果

種ごとに作成したモデルのシミュレーションを行い、実際のコウモリの飛行経路と比較しました。未学習の環境下でも飛行経路を予測することができ、また飛行スタイルの異なる 2 種類のコウモリの飛行経路を予測することができました。このことから、本モデルは環境や種に依存しない、汎用性のあるモデルであることが示されました (図 4)。

種ごとに結果を見ていくと、キクガシラコウモリは 0.39 ± 0.27 m (Env4: 0.42 ± 0.29 m, Env5: 0.39 ± 0.27 m, Env6: 0.38 ± 0.24 m, Env7: 0.37 ± 0.27 m) の精度で予測することができました。これらの値は、キクガシラコウモリが翼を広げたときの大きさが約 0.35 m であることや、羽ばたきを考慮すると、十分正確に予測できたと言えます。また、状態から行動を予測したモデルの結果であり、どの環境でも精度が同等であったことから、キクガシラコウモリは環境に依存しない飛行戦略を持っていることが示唆されました。

ユビナガコウモリは 0.60 ± 0.27 m (Env4: 0.76 ± 0.40 m, Env5: 0.69 ± 0.34 m, Env6: 0.47 ± 0.27 m, Env7: 0.40 ± 0.22 m) の精度となり、Env4 と Env5 で誤差が目立ちました。Env4 と Env5 の予測の傾向を見てみると、予測経路の概形は実際の経路と似ていましたが、大きさが縮小されていました。つま

り、予測した速度の方向は正確でしたが、速度が遅かったと言えます。これは、Env4 と Env5 では、障害物の配置パターンが単純であり、エコーロケーションによる見通しが良い環境であることから、ユビナガコウモリに自身の飛行スタイルである高速飛行を促進させたからだと考えられます。以上から、ユビナガコウモリの障害物回避戦略は環境に依存せず共通していますが、エコーロケーションによる見通しが良い環境であると、環境の先読みや空間記憶の利用も容易になると推測されます。

また本研究では、コウモリのパルス放射タイミングと指向性を想定し、スパースな環境情報から未知の空間で飛行経路を予測することができたことから、自律走行ロボットなどへの工学的応用も期待できます。さらに、エコーロケーションと空間の先読みや記憶利用との関係が確認されたことから、コウモリが実際に音で見ていた世界を実装することで、よりコウモリの飛行戦略を解明することができ、将来的には“コウモリ脳”を入手したいと考えています。

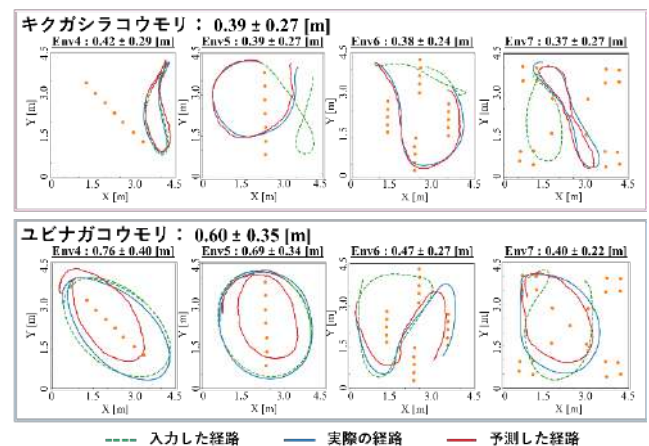


図 4. モデルが予測した飛行経路

まとめ

今回、私はコウモリの状態から行動を予測する模倣学習によるデータ駆動型モデルを開発しました。モデルのシミュレーションでは未学習の環境であっても、限定された情報から飛行経路を予測することができました。さらに飛行スタイルの異なる 2 種類のコウモリの経路を予測できたことから、モデルの汎化性能と工学応用への可能性が確認されました。

参考文献

[1] Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Kazuya Takeda, Decentralized policy learning with partial observation and mechanical constraints for multiperson modeling, *Neural Networks* 171, 2024, pp 40-52.
doi:10.1016/j.neunet.2023.11.068.

野生下コウモリの集団ナビゲーション戦略の調査

杉森 僚太（同志社大学大学院 生命医科学研究科 脳神経行動工学研究室）

はじめに

自然界では多種多様な生物が「群れ」を形成し、集団的に行動をしています。群れを形成する理由として、魚類の対捕食者戦略[1]や鳥類の効率的な帰巣[2]等が挙げられ、群れを作るとは生物にとって重要な生存戦略の一つになっています。その中でも私たちはコウモリに注目しました。コウモリは、超音波によるエコーロケーション戦略で暗闇の中でも他個体や障害物と衝突することなく、巧みに集団飛行を行います。また先行研究では、異なる種や同種との飛行時による音響的干渉を自ら発する音声を変化させることで回避していると報告されています[3]。このような視覚を主に用いる生物には見られない、コウモリ独自の集団行動メカニズムが存在する可能性があります。私たちの研究グループでは、これまでにコウモリが生息するねぐら（洞窟、廃トンネル）にて、集団で出巣・帰巣していく行動とその際の放射超音波について調査してきました。本記事では、その中でも三重県津市にある3種のコウモリが同所的に生息する廃隧道にて行った調査の雰囲気や魅力とデータ解析結果について紹介します。

野外調査

2023年6月4日～9日、7月5日～12日において三重県津市にある廃隧道にて野外実験を行いました。「廃〇〇」と聞くとそれだけで少しゾッとしますが、実は県内でも有名なレベル5の心霊スポットなんです（図1）。それに加えて夜行性であるコウモリの計測は、空が真っ暗な時間帯であるため、苦手な人にはちょっと耐えられないかもしれません。そんな山奥でかつ人気の少ない不気味な場所ではありますが、私たちの研究グループは恐怖知らずのたくましい人たちがばかりで、いつも助かっています。調査では、その日の午後から次の日の朝まで計測することもあったのですが、寝不足でみんな疲れていてそこが心霊スポットであることも忘れ、その場で寝てしまっていたほどです（図2）。ここまでの話だけでは、調査でのネガティブな要素が多いですが、もちろん魅力的な部分もあります。それは生物の野生本来の行動を観測できることです。特に、コウモリの集団でのダイナミックな飛行は迫力があり、いつ見ても新鮮です。また、調査地へ向かう道中では、野生のキツネやシカ等の多様な動物と遭遇でき、自然を肌を感じられるのも魅力の一つです。



図1. 三重県津市にある廃隧道（サーモカメラにより撮影）。



図2. メンバーが疲れ果てて朝方に調査地で寝てしまっている様子。

照度と出巣・帰巣行動の関係性

7月11、12日のコウモリが出巣・帰巣する場面を動画撮影したデータにおいて、日没・日の出前後のそれぞれで1分単位でカウントした個体数とその際の照度を調べました(図3A-B)。日没時刻は19時9分、日の出時刻は4時50分でした。出巣前後の19時0分から20時5分、帰巣前後の4時0分から5時0分までの約125分間の計測において、約270個体の出巣と約220個体の帰巣を確認できました。図3より、日没後の照度の値がおよそ1lx未満となった19時21分前後から出巣し始め、一方で、日の出前の照度が1lxより大きくなる4時33分までにほとんどの個体が帰巣したことがわかりました。このことからコウモリの出巣・帰巣時の行動決定は照度と密接に関係していることが考えられました。

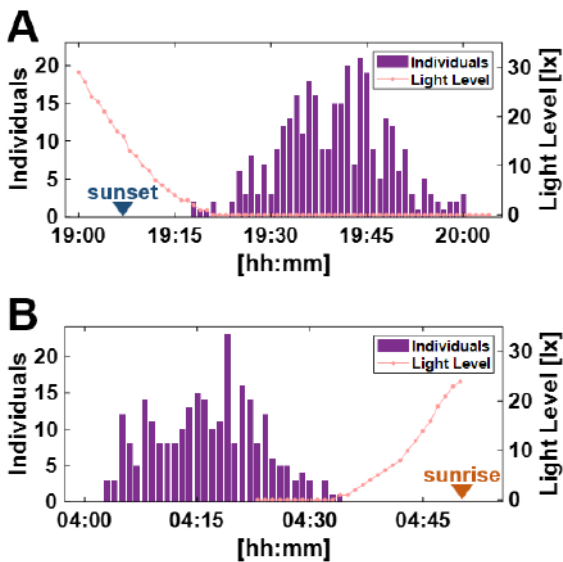


図 3. 1 分単位でカウントとした出巢個体 (A)・帰巢個体 (B) と照度の関係。

密度変化におけるピーク周波数の分析

図 4 は 2023 年 6 月 9 日の出巢時である 19 時 00 分から 20 時 20 分まで、マイクロフォンにより計測した音響データから自動検出した超音波パルスのピーク周波数の推移を示しています。①65 kHz、②50-60 kHz、③45-50 kHz 付近でピーク周波数が大きく分かれています。これらのピーク周波数の帯域と各種の超音波構造の違いから、①二ホンキクガシラコウモリ(*Rhinolophus nippon*)・②ユビナガコウモリ(*Miniopterus fuliginosus*)・③モモジロコウモリ(*Myotis macrodactylus*)の 3 種のコウモリであると判断できました。また、モモジロコウモリとユビナガコウモリの 2 種間において、19 時 15 分から 20 時 15 分までを 15 分間隔に区切り、それぞれの種における超音波のピーク周波数の推移を調べました。図 5 は、ピーク周波数と出巢個体数との関係を示しています。これより出巢終盤である 20 時 00 分から 20 時 15 分までの場面では 1 分あたりの平均出巢個体数が 1 桁となり、コウモリは単独で出巢しており、モモジロコウモリはピーク周波数の上昇が、ユビナガコウモリはピーク周波数の低下がみられ、両種のピーク周波数の差が小さくなっていることがわかりました。一方、それ以外の 1 分あたりの平均出巢個体数が 60 個体以上であり、複数での出巢が観測された 3 場面では両種のピーク周波数に 4-5 kHz の差がありました。この結果から、異種間において複数で飛行している際、コウモリは混信回避行動の一つとしてピーク周波数を変化させている可能性が示唆されました。

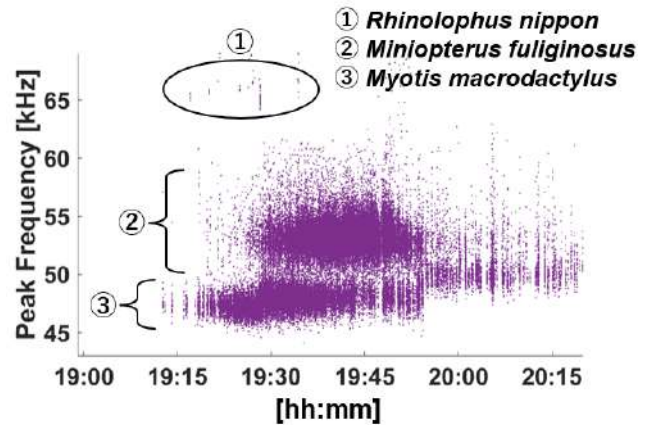


図 4. 出巢するコウモリが放射する超音波パルスから検出したピーク周波数の推移。

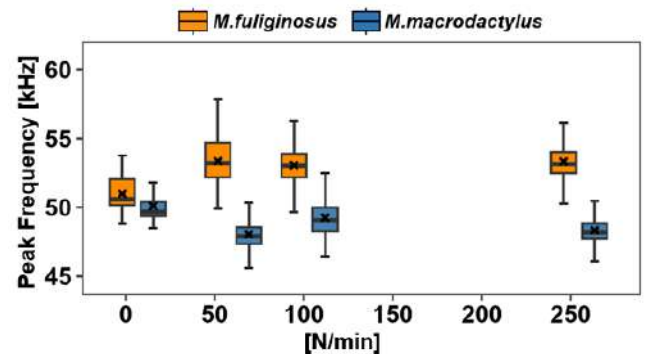


図 5. 飛行密度 (1 分あたりの平均出巢個体数) が異なる場面における 2 種のピーク周波数の比較。オレンジ色がユビナガコウモリ、青色がモモジロコウモリ。

おわりに

ここでは、私たち研究グループが三重県津市にある廃隧道にて行った野生下コウモリの集団行動の調査の様子とデータ解析結果について紹介しました。不気味な調査地に加え、長時間の計測と過酷な調査ではありましたが、コウモリの照度を頼りにした出巢・帰巢行動や飛行密度に応じた音響センシング等、コウモリの集団ナビゲーション戦略に迫ることができました。

本調査で獲得したコウモリの集団行動に関する知見が、今後の生物資源の保存や生態系の解明、一方で工学的な視点からは自動車の自動運転等の人間社会への応用に繋がることを期待したいと思います。

文献情報

- [1] Siegfried, W. Roy, and L. G. Underhill. "Flocking as an anti-predator strategy in doves." *Animal Behaviour* 23 (1975): 504-508.
- [2] Sumpter, David, et al. "Information transfer in moving animal groups." *Theory in biosciences* 127 (2008): 177-186.
- [3] Necknig, Veronika, and Andreas Zahn. "Between-species jamming avoidance in Pipistrelles?." *Journal of Comparative Physiology A* 197 (2011): 469-473.

比較集団行動学「入門」

村上 久 (京都工芸繊維大学 情報工学・人間科学系)

共同研究者と私は、分類群をまたいだ群れ行動の比較、特にヒトと非ヒト動物の群れ行動を比較することに積極的な意義を見出しており、これを比較集団行動学と呼んでいる[1]。海外では集団行動学に関するれっきとした部門をもつ研究機関があるが (Department of collective behavior, Max Planck Institute of Animal behavior)、日本にはまだない。それどころか、さらに頭に比較とついているものとなると、どこにもない。ないなら、自分らで作ってみるほかない。であれば、それを作ることが入門することにもなってくる。手探りで門を作ってみては、作り直す。他に手探りで「入門」しようと思う新しい人はいないだろうか。我々はそんな人に軽々と門戸を開け放つ。なにしろ門戸などあってないようなものなのだ。本稿は、そのようなリクルートの意味合いも込めて、したためられている。

なぜ、比較するのか。ここでは理由を二つ挙げる。一つ目のほうが二つ目よりも目的がはっきりしている。まず、ヒトと非ヒト動物の群れ研究はほとんど独立に進展してきた、という背景がある。具体的な運動から生じるヒトの群れ行動の代表例として、歩行者流が挙げられる。歩行者の集団も他の動物同様に様々な自己組織化的な集団現象を見せる。だが歩行者集団研究は、他の動物の群れ研究と異なり、その出自から混雑の社会問題の解決を主眼とする工学的観点から進展してきた。

にも関わらず、ヒトと非ヒトの群れ研究は、ある意味で同じような歴史を辿ってきた。まず、共に単純な規則から複雑な群れが生じることを念頭に数理モデルを用いた理論研究が進められてきた。それを支持する研究成果は、生物学と物理学 (特に統計力学) の共同による学際的研究の発展によって下支えられてきた。現象の説明として、理論面ではいかに単純な規則であるかが重要視されるのは当然のように思える。けれどもここ十数年で、バイオロギングやトラッキング、画像解析技術の向上によって現実の群れを分析できるようになると、単純な規則では説明できない様々な現象が明らかになった。その結果、それぞれを説明するため多くの群れのモデル (や仮説) が乱立しているという現状にある。このような問題を解決するためには、すなわち、より現実的なモデルを絞り込むためには、発達や進化の側面を考慮した種間比較が欠かせないはずだ。ところが多くの場合、群れ研究では、生物種ごとの研究にとどまっております比較研究は進んでいない。とりわけ、ヒトと非ヒト動物の群れ研究の交流は先述のようにこれまでほと

んどなかった。両者は自己組織化や創発といった抽象的なレベルで共通点を持つと指摘される一方で、具体的な比較研究は驚くほど少ない。このような現状が我々を比較の観点へと向けさせた理由の一つである。

二つ目の理由は、はっきりとした具体的な目的を持たないが、ある意味でより重要である。その理由はいわば、比較という方法自体に意義を見出せるだろうから、である。先に概観したように、これまでヒト (歩行者流など) とその他の動物の群れ研究の交流は希薄であったと言える。さすがに万物の霊長たる人間と他の動物は比較にならない、交流がないのも当然だ、と見る向きもあるだろうか。そんなことは決して無い。それは、一見して抽象的な思考を必要とせず、具体的な運動から生じるはずの群れ行動に着目しているから、ではない。そのわけは、群れ行動研究以外の、心理・認知・神経科学などの分野を見渡してみれば明らかだ。これらの学問分野では、ヒトと非ヒト動物の研究者が、多くの知識、概念、方法論を共有し、相互に発展してきた歴史がある。はじめヒトにおいて見つかり後に他の動物において発見された現象あるいは能力があり (雑多な例として心的時間旅行、運動準備電位など)、その逆もある (ミラーニューロン、認知地図など)。ある種の現象や能力はヒトと他の動物において同時に見出された (ダーウィンは経路統合に基づくナビゲーションについて、シベリア原住民の驚異的な能力に関する逸話を紹介しながら他の動物における可能性も示唆した[2])。心理学ではテストの方法自体を共有することもよく見られる。言語での教示を用いずに行われる動物実験では、様々な工夫が必要になってくる。そこから得られた方法がヒトの実験で新たな知見をもたらすこともある。例えば、大人にとっては自明に思えどのように調べればよいかわからない認知能力について、動物実験から得られた方法を用いて、ヒトの子どもの発達の過程を通して、認知の発達の研究が展開しうる。逆にヒトだからこそ可能な実験を通して、動物実験のみからでは想定できなかった問題点を指摘し、改善することにつながりうる。こうした分野では、ヒトと非ヒト動物研究のどちらか一方では得られなかった知見が、両方を同時に考えることで得られることが当たり前になりうるのである。群れ行動も、その例外ではない。

さて、ではどのようにこの比較の研究を進めていけばよいだろうか。先にあげた一つ目の理由に対応して、動物行動研究の定石として、ティンバーゲンの4つの

問いを（特に歩行者の）群れ行動に当てはめることが考えられる（詳細については[1]）。先述のとおり従来の群れ行動研究は、生物学と物理学の共同研究として進展してきたこともあり、主としてメカニズムを直接対象とするものであったからだ。動物の群れにおいてさえ、個体発生に関する実験(e.g., [3])、適応に関する野外介入実験(e.g., [4])、系統発生に関する厳密な比較研究（例えば太平洋におけるイカとイワシの群れ行動の比較[5]）は近年になってようやく行われ始めたばかりである。ヒトの歩行者の群れ研究の場合はなおさらであり（もちろん例外はあるが）、体系的な研究は存在しない。けれども、ティンバーゲンが述べるように、これら4つの問いは相補う可能性を秘めている。それは、現在様々な群れ形成モデルが提案され、乱立しているという当の問題に有効と考えられる。例えば、個体発生を通して群れ形成の相互作用が徐々に発達し、その強度を増していくと考えられるなら、この一連の発達過程全体を通して説明できるモデルは極めて限定されるに違いない。つまり、どういったメカニズムが自然において最もらしいかを確かめる方法として、個体発生や他の問いを利用することができるのである。本稿では割愛するが、[1]では群れの比較の具体例として、我々がミナミコメツキガニやアユの群れの実験結果からヒントを得た相互予期のメカニズムに基づく群れモデルを構築し、ヒトの歩行者の群れを対象としてこの相互予期に介入する実験を実施し、その結果相互予期のメカニズムとある種の機能（自己組織化される流れの頑健性）の関係を発見したことを紹介している。このように、動物で統制困難な介入実験をヒトを対象として実施することは有効であるし、その結果を動物実験にフィードバックできると考えられる。



図1. ミナミコメツキガニ (*Mictyris guinotae*) の群れ。沖縄県西表島北部の船浦湾干潟で撮影。

先にあげた二つ目の理由に対応して、単に振る舞いを比較するだけでなく、各研究領域で発展してきた方法論をも比較する、という研究の進め方が考えられる。ヒト（歩行者）と非ヒト動物のそれぞれで独自に発展しているが共有されていない分析手法が多く見受けられ

るからだ。例えば非ヒト動物の群れでは、群れのなかの個体が他個体をどのように認識するのか（相互作用近傍の形態）について詳細に検討されているが、ヒトの群れの場合は十分とは言えない。逆に、予期（未来における可能な位置を勘案に入れた相互作用）に関しては、ヒトの群れでは近年実験・実測データを用いてよく分析されているが、その他の動物では必ずしもそうではない（数理モデルは複数提案されている）。こうした分析手法を、改訂を加えながまま互いに共有することが、両研究領域を推し進める比較の研究のきっかけになると考えられる。

なお[1]では、4つの問いと深く関連するものの、物理学的知見からもたらされた群れ行動固有の観点として、臨界現象を取り上げている。また、個々の運動の非同期性や相互作用の時間スケールの議論を通じて、時間の概念が群れの比較の鍵になるだろうことも最後に論じている。

動物の群れは、たくさんの個体があつまること全体としてあたかもそれ自体が一個の生き物のように振る舞う。群れは、こうした一個の全体を評価できる可能性から多くの研究者を惹きつけてきた。つまり群れは、生命システムの部分と全体の関係を理解する上でのモデルシステムであると考えられる。だからこそ、群れ行動を比較の観点から捉え、メカニズムを進化や発達の側面から多角的に検証し鍛え上げていくことには意義がある。我々はそのように考えている。

以上が、本稿の主な内容である。ここまで読んだ方の中には、ヒト以外の動物を対象としながらヒトの研究にも関心がある（できてきた）方もいるかもしれない。そこで、以下ではおまけとして、ヒトを対象とした集団実験の準備と実施について簡単に説明しようと思う。というのも、ヒトを、それも数十人を対象とする実験は敷居が高いと感じる人もいるだろうからだ。しかし案外そうでもないのである。いや、大変なのは間違いない。毎回ひいひい言いながらやってる。でも、特別に専門的で高額な機器が必須ということもないのである。もちろん実験の内容にもよるが、必要最低限の高価な機器はビデオカメラである（細かく言うとトラッキングを簡単にするためマーカーとしてのニット帽、できれば無地のTシャツもあるといい。これらは人数が多いぶん費用がかかるが、調べると格安で手に入ることもある。その他大きくかかる費用としては被験者への謝礼がある）。つまり、言ってしまうとある程度の予算さえあれば誰にでもできる。ヒトの、特に集団の実験が気になっているけれども、どのような準備や手続きが必要か不明なため踏み切れないという方に参考になるかもしれない。なお以下では大学に所属する研究者が実験を行う場合を想定している。

(1) 実験計画(実験内容の決定): はじめにするべきことであり、当然最も重要だが、ここでは扱わない。

(2) 実験場所の選定: はじめて実験をするなら、まず必要なのがこれである。実験内容にもよるが、例えば長い通路を必要とするなら、まず自分のいるキャンパス内を散策してみよう。手頃な歩道などあるだろう。広い場所が必要なら体育館か運動場ということになる。よく調べてみると意外にも広い講堂などもあるかもしれない(椅子や机が床に固定されていないか確認が必要)。これも候補にいれるといいだろう。これらの施設はキャンパス内であっても使用には許可が必要な場合もあるので、とにかく事務に問い合わせしてみよう。施設ごとに担当部署が異なることがあり問い合わせ先もまちまちだが、まずは施設課に意見を仰いでみると思う。これまでの経験上、多くの場所において使用許可が下りた(いくらか込み入った申請書が必要な場合もある)。手頃な場所がキャンパス内に無い場合、学外でさがすことになる。もちろん学外でいい場所があれば問題ないが、費用の面や機材の運搬の観点からできれば学内で見つけたいところだ。さて候補をあげたところで、注意すべきは天候である。野外では雨が降ると実験はできないので、野外を念頭においた実験でも、必ず屋内の実験場所をバックアップしておかなければならない。晴れば屋外で、雨なら屋内で実験できるようにしておく必要がある。多くの人を集めて行う実験では簡単に日程を変更できないという厳しい制約があるのである。また体育館には空調が無い場合がある。その場合は真夏や真冬は実験に不向きである。これらの観点からいうと、十分広く空調も効く講堂があれば理想的である(なかなか無いだろうが)。もう一つ重要な点として、トラッキングを行うなら、できるだけ高いところにカメラを設置できるとよい。後から補正もできるだろうが、なるべく真上から撮るに越したことはない。難しい場合は、映画撮影用のクレーンを使うという手もある(海外で実際に歩行者実験に使われている。国内で調べたらレンタル料はなかなか高かった)。屋外ならドローン撮影という手もあるだろう(追加の申請が必要であることに注意)。どの場所でも必ず下見をしてから決めよう。

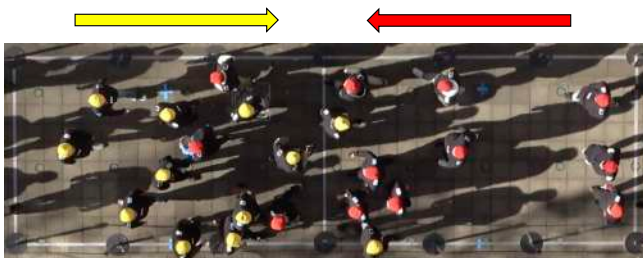


図2. 横断歩道で起きる歩行者集団の自己組織化現象(レーン形成現象という)に関する実験[6]. 矢印はそれぞれの色のニット帽を被った集団の移動方向を表す。この実験は屋外の歩道で行った。

(3) 実験日の決定: 実験場所が決まったら、施設課等に問い合わせながら、その場所が空いている日を確認する。余程のことがない限り、実験は最大でも2日間が限度ではないか(大変なので)。実験日を決定したら、その日に実験場所を押さえておく。なお準備のため、前日から押さえておけるとよい。加えて本実験一週間程度前に予備実験(後述)を実施する日程も押さえておく。また被験者の募集(後述)をする前に、実験に必要な時間を、同意書等の事務手続きにかかる時間や休憩時間も踏まえて、十分に余裕を持たせて概算しておく。

(4) ヒトを対象とする研究倫理審査の申請: 新しい実験である場合、必ず必要である。(1)で立てた計画を項目に沿って粛々と書いていく。被験者の同意書も併せて提出する(被験者募集用のポスター等の文面の提出が必要な場合もある)。わからないことは担当部署(研究支援課等)に聞こう。注意すべきは、審査会が開かれる頻度である。これも、大学によってかなりまちまちだ。毎月行われる場合もあれば、数ヶ月に一回という場合もある。しかも、同じ大学でもキャンパス毎に開催頻度が異なる場合もあると聞く。申請書提出の締め切り日とともに早めに確認が必要である。審査会后、通常審査員からなにかしらのコメントが帰ってくる。これには査読に対応するごとく丁寧に答える。申請書提出から実験ができるようになるまで、これも機関によりまちまちだし審査員のコメントにもよるが最短でも二週間にかかる。なお審査結果が有効な期間内であれば追加申請なく複数回実験しても問題ない。また計画を微修正するだけなら、あらためて申請しなおすのでなく簡単な報告・書類ですむ場合もある。

(5) 被験者の募集: 募集の前に、被験者への謝礼の支払い方法を確定するため経理課等に連絡する。人数が多いため、処理が煩雑な銀行振り込みではなく、メール等で送付できるオンラインギフト券を選択することをオススメする。学生を対象とした募集の方法としては、大学のオンライン掲示板(休講などの確認のため学生は頻りにアクセスしている)、学生を通じた人伝て、SNS、食堂などにポスターを貼付(許可がある場合がある)などがある(そのほか一般のアルバイト募集サイトや、シルバー人材センターなどで募集することもできる)。被験者にはGoogleフォームを使って登録してもらおうと、管理が簡単である。なお、大学等で行われているヒトを対象とする実験の被験者募集情報などは、ネットで検索するとたくさんでてくる。Googleフォームに書く内容なども含め、そちらを参考にされたい。文面に必要な情報は先行事例が参考になるが、参加条件・謝礼額・日時と場所・実験の内容などである。登録した被験者には確認のため必ず要返信のメールを送っておく。その内容は日時や場所の確認とともに、当日は歩きやすい服装と靴でくること、服や靴の色は、トラッキングを容易にするためのマーカー(ニット帽)の色とでき

るだけ被らないようにお願いしておくといい。実験に必要な人数が確保できたら、グーグルフォーム上で現在キャンセル待ちであることを明記しておく。これ以降に登録した人にはあらためてキャンセル待ちになることを説明し、それでも構わないという人をリストアップしておく。キャンセルは出ることが普通なので、出たらキャンセル待ちの人を先着順に参加可能か連絡していく。実験何日前から募集を開始すべきか？募集期間が長すぎるとキャンセルが増えるかもしれない、短すぎると応募数が少ないときに手を打てなくなるかもしれない。とりあえず実験日一ヶ月前としておく。

(6) 実験スタッフの確保：今更だが、この手の実験は一人ではできない。被験者の人数が多い分、学生等に手伝ってもらって実験スタッフの人数が必要である。被験者 50 人ほどに対してスタッフは最低でも 5 人はいた方がいいのではないかと（はじめての実験で経験者と一緒にやらない場合、まずはもっと少ない被験者人数の実験から始めた方がいいだろう）。人手が余れば実験の風景などを撮影してもらえばいいし、とにかく余裕がある方がいい。スタッフには実験の準備や片付けも手伝ってもらう。

(7) 予備実験：多くの人を集めた実験では、簡単に試行錯誤できないことがネックである。人を集めるたびに費用がかかるし、何度も実験するのは大変だからだ。それでも、少人数でもいいので本実験の一週間前までには必ず予備実験を行っておいた方がいい。これまでの経験上、必ずと言っていいほど予備実験において問題が見つかり、予備実験をしなかったと思うとゾッとすることが何度もあった。被験者の人数以外はスタッフも含め本実験と同じセッティングを試し、実験のオペレーションの練習もしておく。

(8) 本実験前日までの準備：実験の目的や、オペレーションの手順まで含んだ詳細な実験計画をスタッフに共有する。実験目的を理解するかしないかでスタッフの動きが変わってくるので重要である。パワーポイント資料などでわかりやすくまとめるのがいいだろう。実験の教示はもちろんのこと、実験手順の説明や号令など被験者にアナウンスすべき内容は一字一句文字起こしておくといいかもしれない。そうすることが、オペレーションのシミュレーションにもなる。実験に必要な機材は実験内容によりいくらか変わるが、最低限必要なものとして、以下は用意しておく必要がある。撮影機材、被験者のリスト、被験者 ID カード（条件分けやグループ分けで使用）、T シャツ、ニット帽、同意書、ペン。できれば被験者用の飲み物も用意しておく。号令用にマイクとスピーカーもあったほうがいい（施設課など学内のどこかで借りられるはず）。また被験者が休憩できる椅子などを用意しておく。少なくとも実験前日には被験者にリマインドメールを送る。前日か、当日の実験前にトラッキング用のキャリブレ

ーションのための作業をおこなっておく（下記リンク参照）。

(9) 実験実施：受付を用意しておく。被験者が来たら一人ずつ、被験者リストにチェックを入れ（謝金の支払い時に必要）、被験者 ID カード、T シャツ、ニット帽、同意書、ペンを配布。同意書に記入してもらったら、回収し、厳重に管理しておく。T シャツとニット帽を装着してもらう。実験開始の前に必ずビデオカメラが録画されているかを確認する。録画していなかったら、ここまでの準備が全て水の泡である。予定していた実験開始時間になり、被験者が揃ったら実験開始。事前に準備したオペレーションの手順に沿って粛々と進める。適宜、ビデオカメラが録画しているか確認。実験終了後片付け。被験者にはできるだけはやく謝礼を送り、会計手続きを済ませる。

(10) トラッキング：オススメのトラッキングソフトは PeTrack (<https://jugit.fz-juelich.de/ped-dyn-emp/petrack>) である。直立二足歩行するヒトは、真上から撮影したときでも、ビデオ画面の真ん中に位置していない限り、ピクセル座標上で頭の位置と足の位置（グラウンドレベル）が異なってしまう。ニット帽をマーカーとすると頭の位置をトラッキングすることになるが、キャリブレーションはグラウンドレベルを基準にして行うのが普通である。PeTrack はこの頭の位置をグラウンドレベルに射影する機能などをもち、歩行者のトラッキングに特化している。なお実験時のキャリブレーションのセッティングやソフトのマニュアルなども含めて、下記リンクに詳細がある：

<https://jugit.fz-juelich.de/ped-dyn-emp/petrack/-/wikis/usage/Workflow-for-performing-experiments-to-be-analyzed-with-PeTrack>

文献情報

- [1] Hisashi Murakami, Masato M. Abe and Yuta Nishiyama (2023), Toward Comparative Collective Behavior to Discover Fundamental Mechanisms Underlying Behavior in Human Crowds and Nonhuman Animal Groups. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 35(4), 922-930, doi:10.20965/jrm.2023.p0922
- [2] Charles Darwin (1873), Origin of certain instincts. *Nature*, 7, 417-418, doi:10.1038/007417a0
- [3] Carolina Doran, David Bierbach, Juliane Lukas, Pascal Klamsner, Tim Landgraf, Haider Klentz, Marie Habedank, Lenin Arias-Rodriguez, Stefan Krause, Pawel Romanczuk and Jens Krause (2022) Fish waves as emergent collective antipredator behavior. *Current Biology*, 32, 708-714, doi:10.1016/j.cub.2021.11.068

- [4] Benjamin P. Burford, R. Russell Williams, Nicholas J. Demetras, Nicholas Carey, Jeremy Goldbogen, William F. Gilly, Jeffrey Harding and Mark W. Denny (2022) The limits of convergence in the collective behavior of competing marine taxa, *Ecology and Evolution*, 12, e8747, doi: 10.1002/ece3.8747
- [5] Robert C. Hinz and Gonzalo G. de Polavieja (2017) Ontogeny of collective behavior reveals a simple attraction rule, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 2295-2300, doi: 10.1073/pnas.1616926114
- [6] Hisashi Murakami, Claudio Feliciani, Yuta Nishiyama and Katsuhiko Nishinari (2021), Mutual anticipation can contribute to self-organization in human crowds. *Science Advances*, 7(12), eabe7758, doi: 10.1126/sciadv.abe7758

研究紹介

イベントベースビジョンセンサー（EVS）によるコウモリ観測

高塚 進（ソニーグループ株式会社テクノロジープラットフォーム TIC 先端研究部 研究員・国立研究開発法人

海洋研究開発機構（JAMSTEC）超先鋭研究開発部門 客員研究員）

手嶋 優風（国立研究開発法人海洋研究開発機構（JAMSTEC）SIP 海洋統括プロジェクトチーム

海洋環境影響評価システム開発プロジェクトチーム 特任研究員）



EVS について

イベントビジョンベースセンサー（EVS）を使ってコウモリの飛行行動を測定した実験のご紹介をいたします。EVS はファクトリーオートメーションや自動運転などの産業用に開発された光学センサーで、将来はスマートフォンに搭載されることも予定されています。センサーから出力される情報を AI が認識することを想定して設計されており、人が美しいと感じる高精細な画像や色彩は撮影することはできません。一方、非常に高速に測定する能力に長けていて、1 秒間に 1 万フレーム相当の速度で輝度が増減した箇所をセンシングします。対象が動いたときに輝度の変化があった箇所だけセンシングされるので、もし背景に動く物が無ければ背景の画像は出力されません。実験の観測対象が動いている物であれば「動いている対象だけセンシングする」ということは、コンピューター解析の観点で以下のようなメリットがあります。

1. 何も動きがない時間は何も出力されないので計算する必要がなく効率が良い。
2. コンピューターによる物体検出の最初のプロセスは動体と背景との分離になる、その処理がセンサー内で完了している。
3. データサイズが小さい。記憶容量の削減により、高速化、低消費電力化が図れる。

図 1 に弾んでいるボールを撮影した例を用いて一般的なイメージセンサーと EVS との比較図を示します。私達が普段スマホで使用している一般的なイメージ

センサーは動いているボールと背景を全てフレーム単位（一画面の全領域）でセンシングします。そのため、ボールだけでなく背景の情報もセンサーから出力されるので、高速に撮影してフレーム数が多くなるとその分だけデータ量が多くなります。一方、EVS は設定した閾値を超えて輝度が増減した画素だけをフレーム単位ではなく一つの画素単位で独立して画素座標、時間を出力します。また一般的なイメージセンサーが RGB の色情報を出力するのに対して EVS は明るく変化して閾値を超えたのか、または暗く変化して閾値を超えたのか、その極性（+ or -）の二値情報だけを出力します。EVS は一般的なイメージセンサーのように多くの情報をセンシングしない代わりに、10,000fps(フレーム換算時)相当の超高速でセンシングを行うことができます。今回は EVS を用いて、コウモリの飛行行動の観測を屋内と屋外の 2 つの環境で行いました。

屋内実験

屋内実験は同志社大学でニホンキクガラシラコウモリの測定を行いました。コウモリの行動に影響をあたえないようにコウモリが認識できない波長 940nm(IR illuminator S20D-90-A-IR)の近赤外線照明を用いて撮影しました。非可視光で通常のカメラでは何も映らない測定環境ですが EVS はわずかな光の変化も捉えることができるため、飛行するコウモリを撮影できました。飛んでいるコウモリだけが記録されていて、背景の壁は写っていません（図 2）。

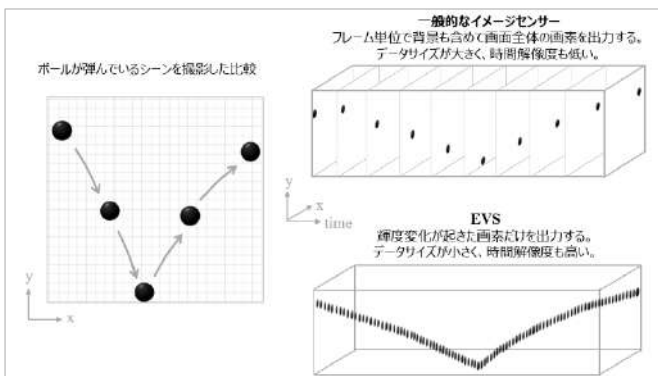


図 1. 一般的なイメージセンサーと EVS の比較図。



図 2. EVS で撮影した日本キクガラシラコウモリ。EVS の生データ。コウモリの前に下げている網も写っている。

このEVSの生データをコンピューター解析することにより各物体に番号、領域、飛んだ軌跡が表示されます(図3)。またサイズ(画素数)や形体、速度(画素換算)など様々な情報が解析可能です。



図3. EVSの生データをコンピューター解析したあとの画像。対象にナンバリングされ、領域と軌跡が表示され、特徴量が計算される。

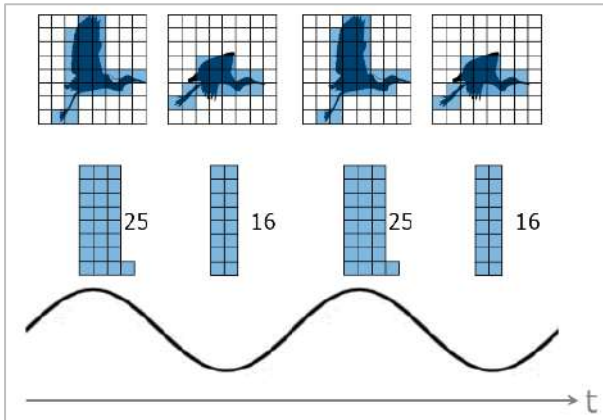


図4. 生物の運動は周期性を持つ。対象の画素数の周期的な増減の変化を周波数分析して対象推定の特徴量とする。

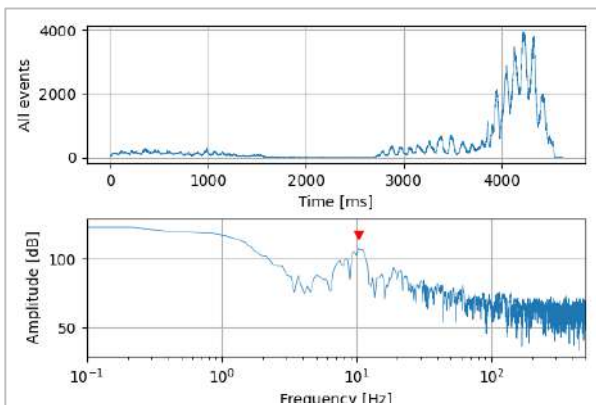


図5. 画素の増減の時間的変化。羽ばたきで増減する画素数が綺麗な波となって表れている(上)。増減をFFT解析する10.39Hzにピークがある(下)。

動物は足や手などの器官を繰り返し運動させて移動します。この周期的な運動は物体のサイズの増減となって表れます。一般的な観測では重要になる対象の形体ではなく、一つの物体の合計画素数の増減の変化をFFT解析して周波数を算出することができます。(図4)

実験で測定した二ホンキクガシラコウモリの飛行中の画素の増減の時間的変化が(図5上)です。綺麗な波となってグラフに表れています。この増減の周波数をFFT解析した結果のグラフ(図5下)です。10.39Hzにピークがあることが分かります。まだ研究段階なので今後の検証が必要ですが、この周波数は対象を推定する有意な特徴量になるのではないかと考えています。

屋外実験

次に北海道の苫小牧研究林内の池に生息するモモジロコウモリを測定する屋外実験を行いました(図6)。

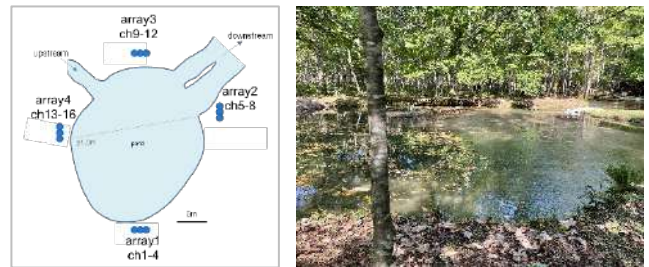


図6. 屋外測定を行った北海道の苫小牧研究林内の池の地形図(左)、風景写真(右)

ここでもほとんどの生物が認識できない近赤外線850nm(LIR-CS88 IR LAB)を照射して撮影を行いました。撮影時刻は23年9月14日20時で、照明を消すと辺りは真っ暗で何も見えません。

暗所で照明を付けずに生物を撮影する際に、よく赤外線カメラが使用されます。赤外線カメラは物体から発せられる放射熱を直接測定することができるため、夜間の野生生物観測によく用いられます。赤外線カメラでトンネルに生息するコウモリ(白丸内の点)を撮影した例です(図7)。トンネル表面も温度を持つため測定対象のコウモリだけでなく背景も写っています。しかし物体認識を行う場合には動体と背景との分離が最初のコンピューター処理のプロセスになるため、もし研究対象が動いている事物の場合は背景が写っていないほうが解析のしやすさで有利になります。

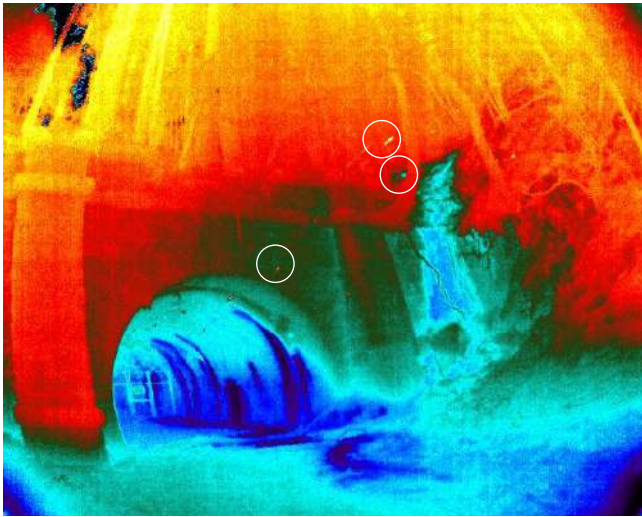


図 7. 赤外線カメラでトンネルに生息するコウモリ（白丸内の点）を撮影した例。トンネル表面も温度を持つため測定対象のコウモリと背景の画像分離はできていない。

EVS は輝度変化が起こった点だけ出力しますので、背景に動きが無く輝度変化が起こらなければ、背景は写りません（図 8）。なお輝度変化した箇所は写りますので照明を動かして、木々に輝度変化を与えると背景も写ります（図 9）。

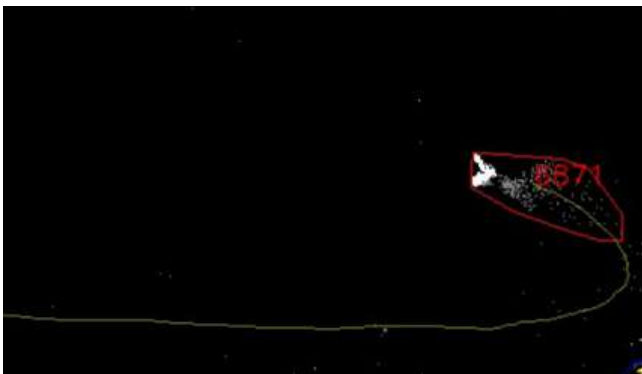


図 8. EVS で撮影，解析後の動画のスクリーンショット。背景は写っていないため，コウモリのコンピューター解析が容易。



図 9. 照明を動かして，背景の木々に輝度変化を与えると背景の木々も写る。

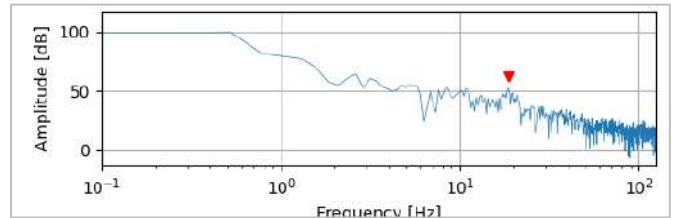


図 10. コウモリ領域の重心の座標推移の周波数を FFT 解析した結果。18.83Hz のところにピークを持つ。

このモモジロコウモリの測定領域の重心の座標推移を周波数解析しました（図 10）。18.83Hz にピークがあり、同周波数で羽ばたいていることが推定されます。

この観測ではコウモリ以外にも飛び回る虫も記録されました。面白いことに池に落ちた虫を捕食するモモジロコウモリの行動も記録することができました。水面に落ちてゆっくり画面に対して左向きに流れ行く虫を右から現れて捕食して飛び去って行きます（図 11）。

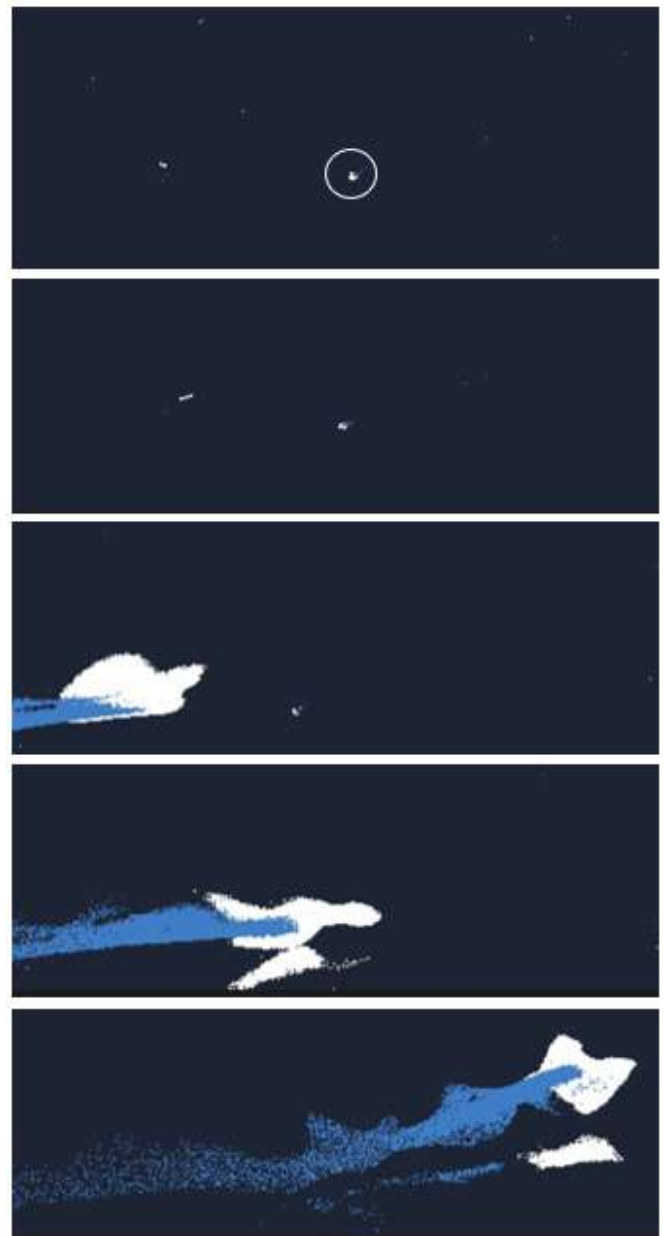


図 11. 池の水面に落ちた虫（白丸）を捕食して飛び去るコウモリが記録された。

コウモリの後ろに続く波線は室内と比較して野外で撮影した際に多く記録されました。屋内撮影でもこのような軌跡はありますが、自然環境でより濃く測定されるのは空気中に浮遊する粒子が関係していることが関係しているのではないかと思います。

この実験で使用された EVS カメラは“Event Camera Evaluation Kit 4 HD” (Prophesee 社)でソニーセミコンダクターソリューションズの開発した IMX636(EVS センサー)が搭載されています。Prophesee 社の HP や国内の商社を通して購入することが可能です[1]。

また解析に使用したソフトウェア“evsCluster”はソニーの Github [2] で入手できます。研究などの非商業目的であれば無料で誰でも使用可能です。このソフトウェアは文部科学省が主催する“海洋資源利用促進技術開発プログラム 海洋生物ビッグデータ活用技術高度化 「イベントベースビジョンセンサー (EVS) を用いた海洋粒子ビッグデータ生成」”[2]で開発されたもので、プランクトンなどの海洋の微小な生物を解析するために使用されました(図 12)。(同研究論文“Millisecond-scale behaviours of plankton quantified in situ and in vitro using the Event-based Vision Sensor (EVS)”[3])

EVS で撮影された生物の特徴量を計算するという点では海中を遊泳するプランクトンも空中を飛行するコウモリも等しく evsCluster で問題なく解析することができました。

もしこの実験報告を読んで EVS にご興味を持たれて、自分の研究でも使用してみたい、という方がいらっしゃいましたら問い合わせ先 [4] までご連絡いただければと思います。EVS の高速撮影により行動生物学の新しい世界が広がっていくことを願っています。

文献情報

- [1] Event Camera Evaluation Kit 4 HD IMX636 Prophesee-Sony
<https://www.prophesee.ai/event-camera-evk4/>
- [2] evsCluster : Event Camera Particle Analysis Software <https://github.com/sony/evsCluster>

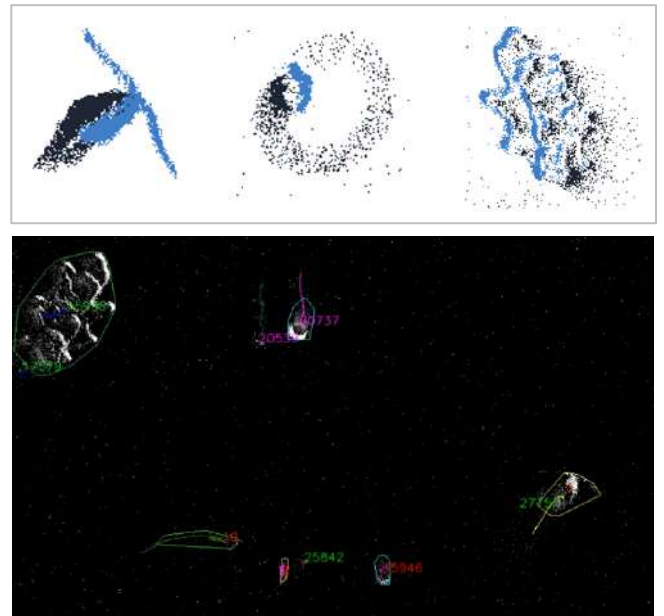


図 12. EVS で測定された動物プランクトンと幼生 (上) プランクトン解析データ (下)。

- [3] 海洋資源利用促進技術開発プログラム海洋生物ビッグデータ活用技術高度化 イベントベースビジョンセンサー (EVS) を用いた海洋粒子ビッグデータ生成
https://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/mext_00269.html
https://www.mext.go.jp/content/20230213-mxt_kaiyou-000027479_2.pdf
- [4] Susumu Takatsuka, Norio Miyamoto, Hidehito Sato, Yoshiaki Morino, Yoshihisa Kurita, Akinori Yabuki, Chong Chen, Shinsuke Kawagucci (2023), Millisecond-scale behaviours of plankton quantified in situ and in vitro using the Event-based Vision Sensor (EVS), bioRxiv, doi:[10.1101/2023.01.11.523686](https://doi.org/10.1101/2023.01.11.523686)

問い合わせ先 高塚 進 ソニーグループ株式会社
テクノロジープラットフォーム TIC 先端研究部
国立研究開発法人海洋研究開発機構 (JAMSTEC)
超先鋭研究開発部門 (客員研究員)
メール : susumu.takatsuka@sony.com

Beyond movement - what more can we learn by tagging animals with various sensors?

Yossi Yovel (Department of Zoology, Faculty of Life Sciences, Tel-Aviv University)

Miniature tracking devices and foremost, miniature GPS devices allow position-tracking of various animals, including relatively small ones in the wild. But registering the location of the animal, especially when done at low temporal resolution, reveals little about its actual activity (e.g., foraging or escaping a predator), about its physiological state and about the environment in which it is behaving. Many additional sensors that provide different types of information now allow to complete the picture in order to study animal behavior under natural conditions. Some of these sensors include: (1) fine movement sensors such as accelero- and magnetometers (2) Physiological sensors that measure heart rate, body temperature and more, (3) Microphones (4) Environmental sensors that measure various parameters such as illumination or ambient temperature.

Accelerometers and magnetometers can be used to classify the animal's behaviour, that is, to determine whether it is flying, walking, or resting (Nathan et al., 2012). Accelerometers and gyroscopes can be used to analyze fine maneuvers, for instance when attacking prey (Stidsholt et al., 2023) and they can be used to assess an animal's energy expenditure (Elliott et al., 2013). When placed on multiple individuals moving together, accelerometers can be used to assess the synchrony between them. We have used a similar approach to prove that bat pups are carried by their mothers, rather than flying behind them (Goldshtein et al., 2022). By tagging both mothers and pups, we could show that their Z-acceleration, which reflects the wingbeat, is perfectly synchronized, strongly suggesting that the pups are carried by their mothers who take them out of the cave and bring them to specific trees where they wait for them the mothers until they return from foraging (Figure 1). Advanced models for

inertial navigation can be used to integrate acceleration and gyroscopic data in order to reconstruct the actual position of the animal with much higher time resolution than typically allowed by GPS (Bidder et al., 2015). Such reconstruction might be challenging because the small sensors typically used in animal tracking devices tend to be noisy and to drift over time.

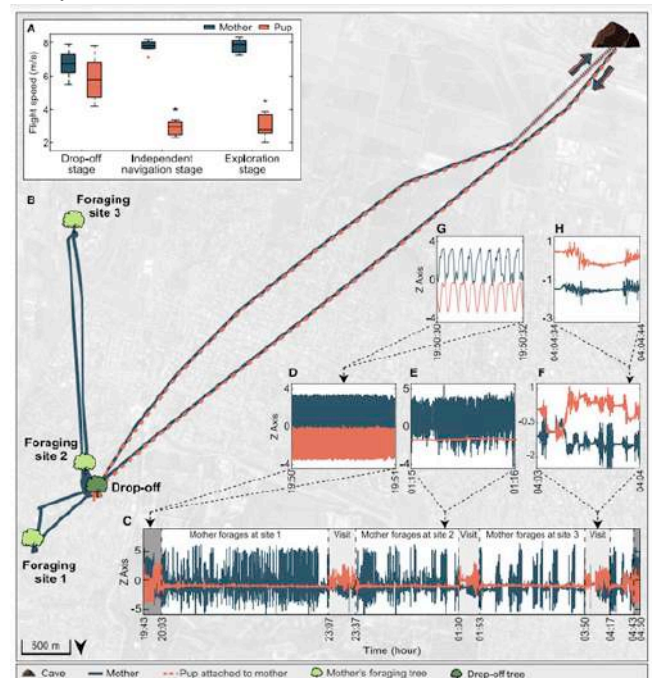


Figure 1. Using acceleration to study mother-pup interaction. Adopted from Goldshtein et al. 2022. (A) Average flight speed per stage, $n = 2$ pairs. Pups flew significantly slower when flying independently (i.e., in the independent navigation and exploration stages) than when flying with their mother (in the drop-off stage). (B) GPS tracks of a mother (blue) that flew with her pup attached (dashed orange line). The last 500 m before the return to the cave were extrapolated (dotted blue and orange lines). The pup, which was at the beginning of the drop-off stage, was dropped off, and the mother visited it occasionally throughout the night. (C) Full-night z axis acceleration recording of the mother (blue) and pup (orange). Dark-gray-shaded parts represent periods when mother flew with the pup attached. Light-gray-shaded periods depict the mother's visits at the drop-off site. (D) The pup's acceleration pattern is synchronized with the mother's wing beating

on the way to the drop-off site, with mirrored acceleration indicating that the pup was positioned belly up while the mother is flying (belly down) as expected if mothers carry the pups. (E) Wingbeat synchronization disappeared once the mother departed from the drop-off site.

Physiological sensors can be used to monitor heart rates, brain or muscle activity (EEG or EMG), or body temperature. These sensors can thus provide information about the physiological and stress state of the individual, including valuable insight into its energy expenditure. We have used temperature sensors in order to assess the body temperature of bats challenged with a bacteria-like LPS challenge (Moreno et al., 2021). We also used these sensors to reveal how bats' body temperature rises by several degrees within minutes when they take-off in flight (Luo et al., 2021) (Figure 2). EEG (and EMG) probes can be used non-invasively to assess when the animal is sleeping (Rattenborg et al., 2016).

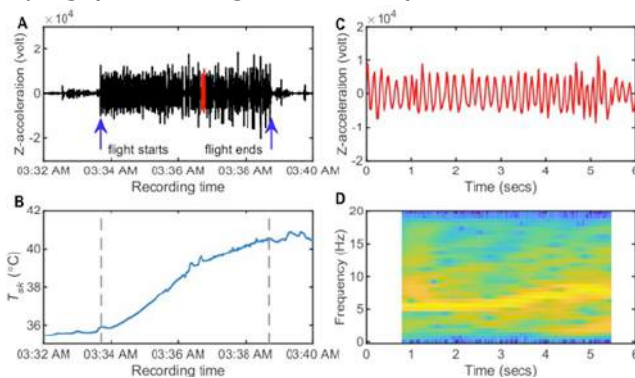


Figure 2. Measuring body temperature in flying bats. Adopted from Luo et al. 2021. (A) Z-acceleration can be used to identify the flight bouts of bats. When a bat starts to fly, the z-acceleration is characterized by a sudden increase in amplitude. When the bat stops flying, the z-acceleration amplitude returns to the baseline level. (B) The synchronized measurement of the T_{sk} surrounding the flight bouts as shown in A. (C, D) The zoom-in view and the spectrogram of the acceleration data for the section highlighted in red in A. The energy distribution of the spectrogram for the z-acceleration reflects the wingbeat frequency of the flying bat (which is centered around 6.8 Hz).

Microphones enable audio recordings, offering a method for monitoring interactions between conspecifics (Cvikel et al., 2015) where the intensity of the recording can reveal information about the distance of the animal. Audio can also reveal insight into the environment in which the animal is active (e.g., urban vs. country) including

the presence of conspecifics (Greif & Yovel, 2019). In the case of echolocating bats, audio recordings can also provide information about the momentary sensorimotor decisions of the individual (Greif & Yovel, 2019) in addition to monitoring foraging success based on chewing sounds (Stidsholt et al., 2023).

Ambient sensors can be used to monitor the environment in which the animal is operating, measuring, for instance, illumination or temperature (Chudnovsky et al., 2023), which can also affect decisions. Below, we will also discuss the importance of completing the story by monitoring the environment with external sensors to provide additional information about the population and the environment and because, unfortunately, not everything can be measured from the animal's point of view.

Obtaining long-term data for small animals remains difficult even today due to power constraints imposed when using light-weight devices with small batteries. To overcome this difficulty, about a decade ago, we have established an in-house colony of wild Egyptian fruit bats in Tel-Aviv University. Egyptian fruit bats are common in the urban environment and naturally roost in man-made structures like the one we offered them. The colony is open to the outside and enables the bats to roost and fly out for foraging. We took advantage of the bats' philopatric nature, which indeed motivated many of the bats to adopt the open colony as their roost and have been living in it for years. This daily access to the same individual bats allowed us to use small logging tags and replace them every few days to continuously monitor the same individuals over long time periods (Harten et al., 2020) (Figure 3).

We used this setup to continuously monitor young bats over many months from birth to adulthood. With full knowledge of their movement history, we were able to demonstrate that the bats use shortcuts when navigating, suggesting that they possess a cognitive map-like representation of their environment. We also demonstrated immense inter-individuality, which translated into inter-individual differences in exploration and, accordingly, in mapping and navigation capacities. The setup also allowed us to examine bats' behavior under controlled laboratory conditions

and compare it to foraging strategies and decision-making within the same individuals. Future work should focus on several key aspects of decision making including: (1) Bat's ability to track temporal patterns in its environment - by tracking bats' choice of various fruit trees, we will be able to examine whether they track tree phenology. (2) Manipulating bats' experience and observing the effect on their decision strategies. There are many ways to affect individual experience, some of which include (3) Monitoring changes in decision strategies over life. Some of the bats have been roosting in the open colony for more than five years now, so by examining their foraging yearly we can document age-related changes in decision-making.

Altogether, the immense advances in miniature technology now allow us to "place the lab on the animal", instead of bringing the animal into the lab. This approach is changing our understanding of animal behavior in their natural environment.

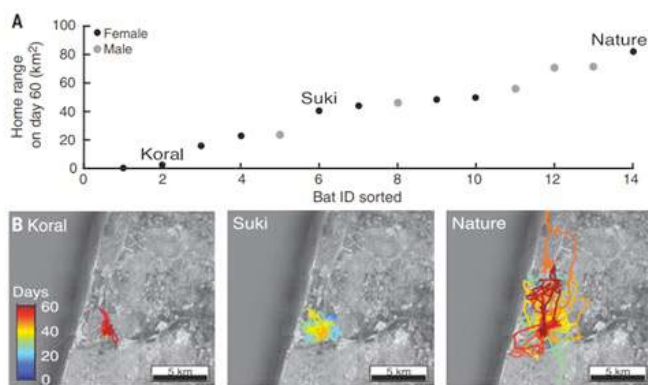


Figure 3. Using an open colony to continuously track bats. Adopted from Harten et al. 2020. (A) Different individuals (x-axis) tended to be more or less exploratory. The y-axis depicts the bat's home range on day 60. (B) Three examples of the complete movement of three bats during their first 60 days in life. "Koral," "Suki," and "Nature" are bat names.

Reference

Bidder, O. R., Walker, J. S., Jones, M. W., Holton, M. D., Urge, P., Scantlebury, D. M., Marks, N. J., Magowan, E. A., Maguire, I. E., & Wilson, R. P. (2015). Step by step: Reconstruction of terrestrial animal movement paths by dead-reckoning. *Movement Ecology*, 3(1), 1–16. doi: 10.1186/S40462-015-0055-4/FIGURES/14

Chudnovsky, A., Goldshtein, A., Shashua-Bar, L., Yovel, Y., & Potchter, O. (2023). Bat bio-assisted sampling (BAS) for monitoring urban heat island. *Applied Geography*, 155, 102952. doi:

10.1016/J.APGEOG.2023.102952

Cvikel, N., Levin, E., Hurme, E., Borissov, I., Boonman, A., Amichai, E., & Yovel, Y. (2015). On-board recordings reveal no jamming avoidance in wild bats. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282 (1798). doi: 10.1098/rspb.2014.2274

Elliott, K. H., Le Vaillant, M., Kato, A., Speakman, J. R., & Ropert-Couder, Y. (2013). Accelerometry predicts daily energy expenditure in a bird with. *Biology letters*, 9, 20120919, doi: 10.1098/rsbl.2012.0919

Goldshtein, A., Harten, L., Goldshtein, A., Harten, L., & Yovel, Y. (2022). Mother bats facilitate pup navigation learning Article. *Current Biology*, 1–11. doi: 10.1016/j.cub.2021.11.010

Greif, S., & Yovel, Y. (2019). Using on-board sound recordings to infer behaviour of free-moving wild animals. *The Journal of Experimental Biology*, 222 (Suppl 1), jeb184689. <https://doi.org/10.1242/jeb.184689>

Harten, L., Katz, A., Goldshtein, A., Handel, M., & Yovel, Y. (2020). The ontogeny of a mammalian cognitive map in the real world. *Science*, 369 (6500), 194–197.

Luo, J., Greif, S., Ye, H., Bumrungsri, S., Eitan, O., & Yovel, Y. (2021). Flight rapidly modulates body temperature in freely behaving bats. *Animal Biotelemetry*, 9(1), 1–10. doi: 10.1186/S40317-021-00268-6/FIGURES/5

Moreno, K. R., Weinberg, M., Harten, L., Salinas Ramos, V. B., Herrera M., L. G., Czirják, G. Á., & Yovel, Y. (2021). Sick bats stay home alone: fruit bats practice social distancing when faced with an immunological challenge. *Annals of the New York Academy of Sciences*. doi: 10.1111/nyas.14600

Nathan, R., Spiegel, O., Fortmann-Roe, S., Harel, R., Wikelski, M & Getz, W. M. (2012). Using tri-axial acceleration data to identify behavioral modes of free-ranging animals: general concepts and tools illustrated for griffon vultures. *The Journal of Experimental Biology*, 215, 986-996. doi: 10.1242/jeb.058602

Rattenborg, N. C., Voirin, B., Cruz, S. M., Tisdale, R., Dell’Omo, G., Lipp, H. P., Wikelski, M., & Vyssotski, A. L. (2016). Evidence that birds sleep in mid-flight. *Nature Communications*, 7(1), 1–9. doi:10.1038/ncomms12468

Stidsholt, L., Hubancheva, A., Greif, S., Goerlitz, H. R., Johnson, M., Yovel, Y., & Madsen, P. T. (2023). Echolocating bats prefer a high risk high gain foraging strategy to increase prey profitability. *Elife*, 12. e84190. doi: 10.7554/eLife.84190

事務局からお知らせ

会費納入のお願い



■会費の納入にご協力をお願いいたします。
正会員 5000円、
学生会員（ポスドクも含みます）1000円 です。
2年間会費未納ですと自動的に退会になりますのでご
注意ください。
■所属等の変更はお早めに事務局まで
メール BioLoggingScience@gmail.com
フォーム <https://forms.gle/MrHS8Hh5bUKTSpTs6>

バイオロギング本のご案内



多くの方に愛されているバイオロギング本。初めてバイオロギング本が産声をあげたのは、2009年でした。出版からすでに14年以上が経過しており、皆さんにたくさんお求めいただいたことから、絶版（在庫なし）となっています。そしてバイオロギング本の弟（バイオロギング2）が産まれてから7年が経ち、こちらも残りわずかとなりました。絶版となる前に是非お求めください！ 出版社「京都通信社」の Web ページから購入できます。 <https://www.kyoto-info.com/kyoto/>



講演会のご案内



国際バイオロギングシンポジウム翌日 3月9日（土）に予定されている高校生・大学学部生向け講演会は、まだ対面参加者に余裕があります。オンライン参加も可能、参加無料です。
参加希望の方は以下のURLからオンラインでお申し込み下さい。
<https://bls8tokyo.net/public-talk/>



【S.K】

編集後記



■あっという間にまた1年が過ぎてしまいました（この編集後記は、私にとって1年を振り返る貴重な機会になっています...）。今年はコロナ以降、初めて卒業式後の謝恩会が開催できることになり、今は卒業に向けて、修論と卒論の対応でラボはてんやわんやです。

そしてまだまだ先,,,,,とっていたBLS8も、もうすぐそばまで迫ってきました。今回は、BLS8の招待講演者でもある、コウモリ界のスーパースター、テルアビブ大学のYossi Yovelに記事を書いていただきました（感謝!）。まだ戦争が続くイスラエルですので、無事に来日してくれることを切に願うばかりですが、彼のすばらしい研究についてぜひBLS8での講演を聞いていただければと思います。そしてヒト以外の生物を“非ヒト生物”という呼び名で楽しい紹介記事を書いてくださった村上先生は、2021年にヒトの集団行動のご研究でイグノーベル賞を受賞されました。比較集団行動学というユニークな学問には、“非ヒト生物”の移動を扱うバイオロギング研究会の皆さんも興味を持たれたのではないのでしょうか。さらに今回は生物の行動を追う新しい手法として、光学センサーの最新技術をソニーの高塚さんに紹介いただきました。桁違いの時空間分解能が浮かび上がらせる生物の動きには、新しい行動学的発見が大いに期待できそうです。偶然にも佐藤克文先生と同じ予算プロジェクト(文部科学省「海洋資源利用促進技術開発プログラム 海洋生物ビッグデータ活用技術高度化」)でご活躍されているとのことで、今後、バイオロギング研究会の皆さんともどこかで繋がるのではないかな,,,と想像しています。

今年元旦から大変なことが続きました。代り映えしない毎日のありがたさに、感謝しながら過ごす日々です。最後に今年もいつもの一言を。家族とそして皆さんが今年も健康で楽しい一年でありますように(^^)!【SH】

■子供が産まれて以来、常に綱渡り状態でスケジュールを組み出張を続けてきましたが、ついに先日の出張で、悪天候のため飛行機が欠航となり帰れなくなりました。自分の旅程変更だけなら全然平気ですが、子供たちにとっては初めての「母が約束通り帰って来ない」状況。色々手を尽くして、なんとか家族がパニックに陥る前に帰ることができましたが、ものすごく消耗しました。飛龍さんの編集後記にもある通り、平常のありがたみを感じました。【SSK】

■梅の木が白や薄桃をまとい始めています。まもなくBLS8!【HM】