

研 究 報 告 書

「コウモリの生物ソナー機構に学ぶ, ロバストな実時間空間センシング技術の創出」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成26年10月～平成30年3月

研 究 者: 飛龍 志津子

1. 研究のねらい

生物が生きるための戦略として生得してきた高度な機能やアルゴリズムには、従来ヒトが設計し創り出してきた技術には無い、斬新な発想や学ぶべき点が数多く含まれている。コウモリはイルカと共に生物ソナー(SONAR:SOUND Navigation and Ranging)とも呼ばれ、自ら超音波を発生し、そのエコーとを聞き比べることで、周囲の状況を知覚している。暗闇の中、障害物や周囲を飛び交う仲間との衝突回避や、数ミリほどの小さな獲物を短時間に繰り返し捕食する様子からも、彼らが非常に優れた超音波センシング能力を持つことがわかる。

一方、現在のセンシング技術の多くは、高速化・効率化が叫ばれつつも、実際には“ビックデータ”と呼ばれるように、技術の進歩と平行して処理する情報量の増加が許容されている。特に視覚情報を優先する設計思想は、聴覚情報より多くのデータ処理を必要とする。そこで本研究は、聴覚で視覚を代用しているコウモリの超音波センシング機構に着目し、人々の動作や移動を安全かつ高度に支援するための次世代のセンサ技術やナビゲーションシステムに関する新たな知見を見出し、コウモリをモデルとするバイオメティックとしての学術基盤の創出を目指している。

そこで本研究では、様々な場面におけるコウモリの音響行動を高度に計測し、コウモリが有する優れたセンシング機構の工学的利用価値を追求する。具体的には、複数のコウモリが飛び交う状況においてコウモリが解決している様々な問題を、行動分析から明らかにし、音響混信の回避メカニズムに挑む。また野生下で繰り返されるダイナミックな採餌行動を計測し、その行動分析から動物の意思や判断を読み取り、行動原理を見出すと共にその合理性を証明する。さらに行動計測で得られた知見を、チープデザインによる自立走行車に搭載し、コウモリが実践する工夫やそこから発想を得た新たな設計思想の工学的な効果を検証する。

情報センシング技術に求められる課題や精度は、今後より一層、高度化が予想される。生物ソナーは、様々な計測分野に関連する物理法則を踏襲しており、その工学応用範囲も広いことから、高等動物の意思に学ぶ、新たなバイオメティック研究を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、室内での精密な行動計測から、野外で繰り返されるダイナミックなソナー行動の計測を通じて、コウモリの超音波運用や動態制御に関する有用な行動原理を見出すことで、生物に学ぶ新しい情報センシング技術の提案を目指している。

例えば複数で飛行するコウモリ同士が行う音響的、動的な混信回避のメカニズムの解明は、工学的にも有用な知見を与えることが期待される。そこで本研究ではまず、単独飛行する個体に様々な混信信号を提示し、人工的な混信環境下における音響的な反応を計測し

た。その結果、超音波の終端周波数が混信音と重畳する場合に限り、コウモリが次に放射する超音波の周波数を僅かにかつ有意に変化させることを見出した(主な研究成果 Hase, et al., 2016)。次に各個体が発する超音波を分離して計測する多チャンネルレシーバーを製作し、4個体が同時に飛行する際の各個体の音声をそれぞれ計測することに成功した。計測の結果、集団飛行中の各個体が僅かに周波数を互いにシフトすることで、お互いの信号の混信を回避していることを発見した(投稿中)。さらに ambiguity function を用いた検証の結果、実験で確認された僅か 1-2kHz ほどの周波数差が、コウモリがセンシングに用いる信号の個体間の相関性を急激に低下させる効果があること、また集団飛行中は単独飛行時より、コウモリはお互いの信号の相似性を積極的に低下させていることも見出した。このような生物に学ぶ知見は、身の回りのあらゆるものにセンサが搭載され、ヒトやモノの集団での移動や信号の制御に関する未解決な課題に、シンプルで新しい着想を与えてくれると考えられる。

また本研究ではさらに、コウモリの音響センシングの行動データに対し、数理モデルを用いた分析にも取り組んだ。コウモリが先を読むセンシングを行っていること、また経路計画と音響センシングの効率的な協調を実践していることを、野生下のコウモリの行動計測から明らかにした(Fujioka, et al., 2016, Sumiya, et al., 2017)。さらに行動実験から得られた知見をヒントに、障害物回避アルゴリズムを考案し、チープデザインによる自律走行車に搭載することで、コウモリの行動原理の工学的な効果の検証にも取り組んだ。その結果、障害物ルートの完走率が向上するなど、コウモリが見せる動作には、現場で生じるセンシングの様々な問題にロバストに対峙するためのシンプルな工夫であることなどがわかった。

動物の行動に秘められた彼らの意思や判断を、生物学と工学の両方の視点から読み解くことで新たな着想を得て、社会に役立つ知識や技術へ繋げていきたいと考えている。

(2) 詳細

研究テーマA「行動実験による実験的検証」

単独で飛行するコウモリに対し、複数のラウドスピーカを用いたプレイバック実験により、音響的な混信状況を構築した。コウモリの背部に小型ワイヤレスマイクを搭載し、飛行中に発する超音波を分析したところ、FM型の超音波パルスの終端周波数が、混信信号と重畳する場合に限り、コウモリが次に放射する超音波の周波数を僅かにかつ有意に上昇することを見出した(図1, Hase et al., 2016)。

次に各コウモリに小型ワイヤレスマイクを搭載し、単独飛行時と集団飛行時それぞれにおいて、各個体が発する超音波を計測した。その結果、集団飛行中、各個体が互いに周波数をシフトさせていることを発見した(図2、投稿中)。またコウモリが用いる FM 型超音波におい

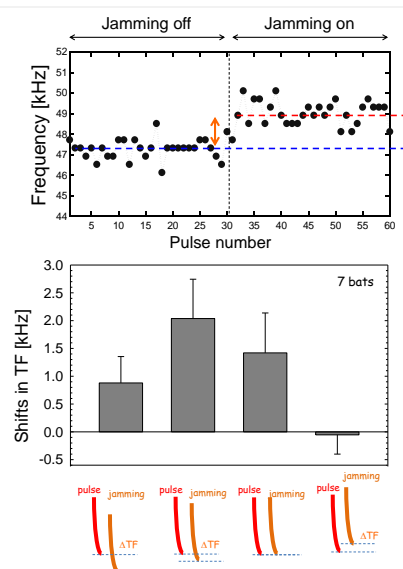


図1 混信信号に対するコウモリの超音波周波数の変化。(上)混信信号呈示前後の周波数変化。(下)混信信号による反応の違い。

ては、変調終端部の周波数を僅かにシフトすることで、互いの信号の相関性を効率的に低下させることを ambiguity function を用いて明らかにした。すなわち複数の FM 型超音波が混在する状況下でも、コウモリが互いに異なる終端周波数をもつことで、相互相関処理によって音声の分離が可能であることを意味している。現在の超音波センシングでは、共振型の単一周波数の物が一般的であるが、センシングの時間分解能の向上には広帯域化が必須である。複数のセンサが混在する状況において、時間分解能高く、かつ混信を回避する手段として、コウモリが行う混信回避は非常に有用に機能することが予想される。

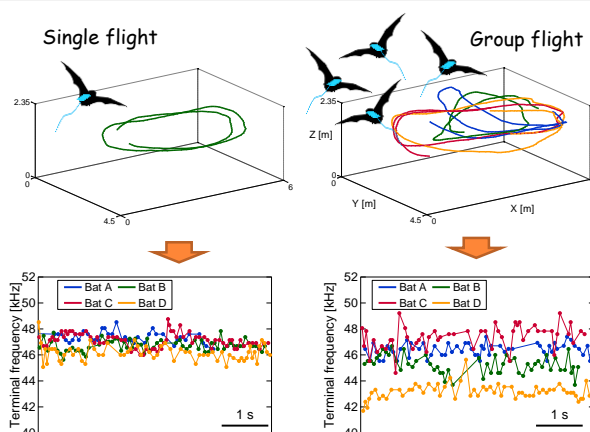


図2 集団飛行中のコウモリの超音波の変化。(左)単独飛行時。(右)集団飛行時。

研究テーマB「数理モデルによる理論的考察」

採餌飛行する野生コウモリの音響行動をマイクロホンアレイを用いて計測し、3次元飛行経路及び超音波の放射方向の計測を行った。複数のターゲットを連続的に捕食するコウモリの飛行動態を、数理モデルを用いて分析した結果、コウモリが将来のターゲットにも attention を分散させていることがわかり、“先を見る”戦略を持つことを明らかにした(Fujioka, et al., 2016)。さらにこのような連続捕食を行う際の、超音波のビーム幅を3次元的に計測を行ったところ、複数のターゲットを同時に捉えるように放射方向を調整していることを実験的に明らかにした(図3)。また数理モデルを用いたシミュレーションによって、そのビーム制御が連続捕食の成功率に効果をもたらしていることもわかった(Sumiya, et al., 2017)。

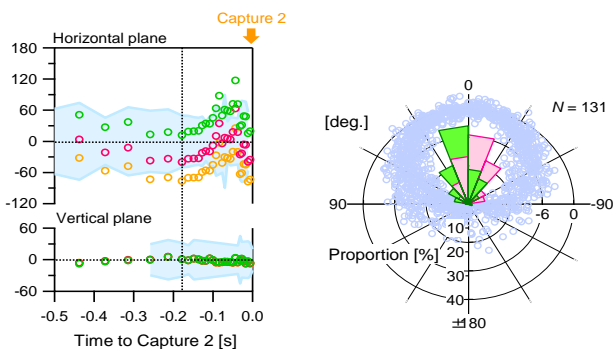


図3 コウモリの超音波のビーム幅とターゲットの位置関係。(左)時系列変化。(右)2連続採餌の場合。

研究テーマC「移動型ロボットを用いた実機検証」

障害物環境下でコウモリを繰り返し飛行させ、未知から既知に至る過程での、飛行経路や超音波センシングの変化を計測した。また未知空間においてコウモリが行うダブルパルスセンシング※に注目し、1送信2受信の簡易な超音波センサを持つ自律走行車に搭載した。その結果、従来からのセンシング機序と比べ、障害物走行の完走率が上昇することを実験により確認した。また実機での定位精度や走行状況の分析と合わせて、シミュレーションに

よる考察から、コウモリの未知空間で見られた行動には、超音波によるセンシング特有の問題(左右のエコー列の組み合わせ間違いによる謝った定位など)などを、シンプルに解決するロバストなセンシングを維持する効果があることが示唆された(投稿準備中)。

※短い時間で繰り返される2回連続の超音波。

3. 今後の展開

本研究により、音響信号の混信に対するコウモリの適応行動を実験的に見出すことができた。コウモリの音響ナビゲーションは、飛行と音響センシングの高度な協調により成立していることが予想される。衝突を効率的に回避する経路計画やその際の音響センシングとの関係を明らかにし、その工学的実証に今後、取り組んでいきたい。また自律走行車による2次元での実機検証を、今後はドローンによる3次元に展開し、センシングの機序や集団運動におけるアクティブセンシングの課題などにも、実験とモデル、実機を用いた多角的なアプローチで迫りたいと考えている。

また空間学習による効果やセンシングの効率化などについても、アルゴリズムとして記述できるよう行動実験による知見を積み重ね、未知から既知へのダイナミックな制御なども、コウモリをモデルに検討していきたい。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

集団飛行するコウモリの音響行動を計測するための装置の開発からスタートし、実験結果の蓄積から工学的な視点を取り入れた考察までを、試行錯誤しながらも研究期間内になんとか取り組めたことは非常に良かったと思う。また現在、室内実験と並行して屋外の野生下での集団飛行の計測にも着手している。当初予定していた飛行制御と音響センシングの関係やそれらの個体間相互作用を含めた集団運動のアルゴリズムとしての記述までには至らなかったが、音響的に重要な知見は得ることができた。時間的に達成できなかった残りの課題は、引き続き取り組んでいきたい。

コウモリの集団行動や音響ナビゲーションからは、生物学的な魅力はもちろん、工学的にも様々な有用な知見の獲得が期待できると確信している。研究の成果については、PNASを始め、数本の論文として発表または現在執筆中である。成果の一部が JST ニュースや新聞等に取り上げられたことは、単なる動物の行動分析に留まらず、社会的な関心や社会に貢献が期待できる内容に、知見をまとめることができていたのではないかと感じている。技術的にもチャレンジの高いテーマであったが、さががけ研究による研究費の支援や先生方からのアドバイスや温かい励ましの言葉のおかげで、途中であきらめずに研究基盤を確立することができた。科学的な好奇心も大事にしながら、社会に役立つ研究展開を常に意識することの重要性をこの領域で学ぶことができた。また他の研究者らとのディスカッションや実践の様子に触れることができたことは、自身にとって大きな刺激となった。さががけ研究を通じて幅広い人的ネットワークが築けたことは、今後研究を続けていく上での非常に大きな財産になったと感じている。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った。)

(研究総括)

実物のコウモリの行動を、最新のセンサ技術によって観測し、その優れた生物ソナーの原理を解明するとともに、次世代のセンサ技術やナビゲーションシステムへの工学的利用を目指した極めて独自性の高い研究である。1)コウモリの超音波センサの仕組みの解明、2)数理モデルの確立、3)工学応用へ向けた適用実験を行い、多くの新しい知見を得ている。画像データより2桁以上小さなデータ量により周囲の環境を認識し、衝突防止や捕食活動を行う仕組みの解明は、今後の社会情報基盤への応用において極めて重要な成果である。企業との共同研究も始めており、安価かつシンプルな動的空間認識システムとして、Society5.0の構築への影響は大きい。

得られた研究成果は、高く評価されており、日本学術振興会賞を始めとして複数の受賞など、研究者の社会的評価の向上にもつながっている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. Fujioka, E., Aihara, I., Sumiya, M., Aihara, K. and Hiryu, S., Echolocating bats use future-target information for optimal foraging, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, Vol. 113, pp. 4848–4852
2. Hase, K., Miyamoto, T., Kobayasi, K. I. and Hiryu, S., Rapid frequency control of sonar sounds by the FM bat, *Miniopterus fuliginosus*, in response to spectral overlap, *Behavioural Processes*, 2016, Vol. 128, pp. 126–133
3. Yamada, Y., Hiryu, S. and Watanabe, Y., Species-specific control of acoustic gaze by echolocating bats, *Rhinolophus ferrumequinum* Nippon and *Pipistrellus abramus*, during flight, 2016, *Journal of Comparative Physiology A*, Vol. 202, pp. 791–801
4. Sumiya, M., Fujioka, E. and Hiryu, S., Coordinated Control of Acoustical Field of View and Flight in Three-Dimensional Space for Consecutive Capture by Echolocating Bats during Natural Foraging, *Plos One*, 2017, 12(1): e0169995. doi:10.1371/journal.pone.0169995
5. Motoi, K., Sumiya, M., Fujioka, E., Hiryu, S., Three-dimensional sonar beam-width expansion by Japanese house bats (*Pipistrellus abramus*) during natural foraging, *Journal of Acoustical Society of America*, 2017, Vol. 141, 10.1121/1.4981934

(2) 特許出願

無し

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

主要な学会発表(依頼講演):

1. 2016 年 9 月 “音で見るコウモリー生物による超音波センシングー”, 飛龍志津子, センシング技術応用研究会 第 196 回研究例会(常翔学園大阪センター)
2. 2017 年 5 月 “Laboratory and field studies on acoustic navigation of echolocating bats – Tracking of flight paths and ultrasounds” , Hiryu, S., The 6th International Seminar on Biodiversity and Evolution: Wildlife Science by New Biologging studies (京都大学 北部キャンパス 理学研究科セミナーハウス)

受賞:

2017 年 日本学術振興会賞

著作物:

“Behavioral and physiological bases for Doppler shift compensation by echolocating bats”, Hiryu, S., Mora, M. C. and Riquimaroux, H., in Bat Bioacoustics, ed: Springer, pp. 239–263, 2016.

その他:新聞による紹介:

2016 年 8 月 6 日 日刊工業新聞「拓く研究人」