

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15012

研究課題名（和文）コウモリの生物ソナーからひも解く大自由度な3次元音響ナビゲーションの解明

研究課題名（英文）Investigation for flexible 3D Acoustic Navigation employed by echolocating Bats

研究代表者

山田 恭史（Yamada, Yasufumi）

広島大学・統合生命科学研究科（理）・助教

研究者番号：80802561

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究遂行により、コウモリ同様の耳介動態を取り入れた超音波センシングが、3次元音源方向の推定に有効であることを、数理的に評価できた(T. Hiraga, Y. Yamada et al, 2022)。また、障害物環境下で空間学習飛行を行うコウモリが、音響的視界の良し悪し（音響遮断物の有無）により、適応行動を変化させることが明らかになった(Y. Yamada et al, 2020)。さらに、1送信2受信器の超音波センサを搭載したドローンによる自律飛行実験から、コウモリ同様の非線形FMパルスを用いることで、プロペラノイズに対して頑強なセンシングを実践できることが評価できた（現在論文執筆中）。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、1送信器（口または鼻）と2受信器（両耳）のシンプルな超音波センシング機構で3次元空中ナビゲーションを実現させるコウモリについて、3次元空間の知覚メカニズムから経路・センシング最適化行動に至るまで、低次・高次機能を包括する意思決定プロセスへメスを入れた研究であった。今後のコウモリの超音波センシングの全容解明に向けても大きな一歩になると期待している。また、実機検証結果からは、世界初のコウモリ模倣型の自律飛行ドローンを実現させるうえで大きな一歩を踏み出したと言える。

研究成果の概要（英文）：At first, we mathematically evaluated that (1)Acoustic sensing with both ear movements similar to bats is useful for 3D sound source estimation(T. Hiraga, Y. Yamada et al, 2022). Moreover, through the measurements of the spatial learning flights of bats, it was found that (2) bats change their adaptive navigation behavior depending on the acoustic visibility (presence or absence of acoustic obstacles) in the flight environment (Y. Yamada et al., 2020). Furthermore, an active sonar system is proposed for drones equipped with a single transmitter and two receivers, inspired by echolocating bats. As a result of flight test, the received signals were saturated by cluttered propeller noise, suggesting a simple sonar system with a down sweep FM pulse (similar to bats) is sufficient for flight noise.

研究分野：音響工学，数理生物学，動物行動学，制御工学

キーワード：エコーロケーション 構成論的研究手法 バイオミメティクス 生物ソナー 自律ドローン 空間学習 シンプルデザインセンシング 3次元音源定位

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

コウモリは、“1送信2受信器の超音波センシング”からは想像できない“大自由度な3次元飛行”を実現させている。本申請では、コウモリの脳内での“エコー(反響音)信号処理”から“経路計画の意思決定”に至る一連のナビゲーションプロセスを分析し、“3次元空間に最適化された生物ソナーシステムの全体像”を解き明かすことが目的であった。具体的には、①センシング時のコウモリの耳形態の計測より、1次元エコー信号から3次元空間の情報抽出を実現させる彼らの信号処理プロセスを解明する。さらに、②空間学習・群飛行時のコウモリの計測から、経路計画と音響的視線制御に関する意思決定プロセスを解明する。最後に、③これらコウモリの計測によって得られた行動原理を数理モデル化し、コウモリ模倣のドローンを用いた検証を行うことで、実環境センシングに対する有用性を定量的に評価する。これらの成果から、工学ロボットセンシングに求められる大自由度ナビゲーションへの問題解決を導くというものであった。

## 2. 研究の目的

本研究では、コウモリの行動計測によって推察される行動原理をシンプルな数理モデルで記述し、ドローンを用いた実機検証によりその有用性・問題点の評価を繰り返し行う構成論的研究を実施した。特に、コウモリの行動パターンからそれらを支える神経基盤・信号処理プロセスについても包括した理論構築を行うことで、センサ入力から意思決定に至る一連の3次元ナビゲーションシステムを明らかにすることを目指した。最終的には、コウモリと同等のパフォーマンスをドローンに発揮させることで、生物ソナーシステムの全体像を解明することを目的とした。

本研究遂行により、①コウモリ同様の耳介動態を取り入れた超音波センシングが、3次元音源方向の推定に有効であることを、数理的に評価できた(T. Hiraga, Y. Yamada(責任著者) et al, 2022)。また、②障害物環境下で空間学習飛行を行うコウモリが、音響的視界の良し悪し(音響遮断物の有無)により、適応行動を変化させることが明らかになった(Y. Yamada(筆頭責任著者) et al, 2020)。さらに、③1送信2受信器の超音波センサを搭載したドローンによる自律飛行実験から、コウモリ同様の非線形FMパルスを用いることで、プロペラノイズに対して頑強なセンシングを実践できることが評価できた(現在論文執筆中)。以下にその詳細を分割して記す。

## 3. 研究の方法

### 3-1. コウモリの耳介動態から紐解く三次元空間定位プロセスの分析[1]

長い周波数定常音を用いるコウモリは、パルス放射と同期した耳介動態が観測されている。これら動態は、受信エコーのドップラー効果や音圧差を利用した彼ら独自の“3次元定位機能”であることが推察されているものの、その理論的評価は行われてこなかった。当初はコウモリの耳介動態の綿密な計測を行うことも計画していたが、コロナ禍のため他大学実験施設の利用は最小限にとどめざるを得なかった。そこで、3次元空間定位に有効な耳介動態について、数値シミュレーションによる分析を行った。まず、過去に計測されているコウモリの聴覚感度の方向特性を模倣し、コウモリの聴取エコーを音響シミュレーションにより再現した。さらに、網羅的な疑似耳介動態を再現し、教師あり機械学習を活用した数値シミュレーションから、3次元方向定位に有効な耳介動態について検証を行った。

### 3-2. 音響的死角が空間学習飛行に与える影響についての分析[2]

マイクロホンアレイシステムとFMワイヤレスマイクロホンを用いた音響飛行計測から、空

間学習飛行時におけるコウモリの周囲空間に対する注意分散やパルスとエコーの入出力関係について分析した。特に、アクリル板を用いた音響遮蔽性の高い障害物環境とチェーンだけを用いた遮蔽性の低い障害物環境での、空間学習飛行のふるまいの違いを比較した。具体的には、14匹のコウモリを2グループに分け、それぞれの環境で12回の繰り返し飛行を行わせた。この際の1試行目（未知空間飛行）と12試行目（既知空間飛行）の飛行・及びセンシングのふるまいの違いについて比較した。これらの分析から、音響的死角が空間学習飛行に与える影響について分析した。

### 3-3. コウモリ模倣型自律飛行ドローンによる飛行検証

1送信器・2受信器の超音波センサを搭載したドローンによる自律飛行システムは、現在のところ世界的に見て全く報告されていない。そこでコウモリ同様のFMパルスを放射できる超音波センサを搭載した自律飛行ドローンによる自律センシングテストを行った。直径0.12mのポールに対して飛行中にセンシングを行わせ、物体検知性能について評価した。

## 4. 研究成果

### 4-1. コウモリの耳介動態の有効性の解明および耳介動態理論の構築成功[1]

聴音感度に※3)指向性のある疑似耳介モデルを構築し、※4)ロール・ピッチ・ヨー運動(図1, C参照)の組み合わせから216パターンの耳介運動の分析を行った結果、216パターン中14パターンの耳介運動が3次元定位に有効な動態であることがわかった。また、それら運動の共通点を調べたところ、4つの運動条件を満たすことで3次元方向定位に有効な耳介運動パターンを作り出せることがわかった。また、実際のコウモリの耳介運動では、(水泳中のパタ足のように)反位相同期したピッチ運動が観測されている。本数理分析により、コウモリが採用するピッチ運動の必然性についても明らかにすることができた。これらは、コウモリの音響センシングの理解につながるだけでなく、工学音響センシング技術への応用も期待される成果だと考えられる。

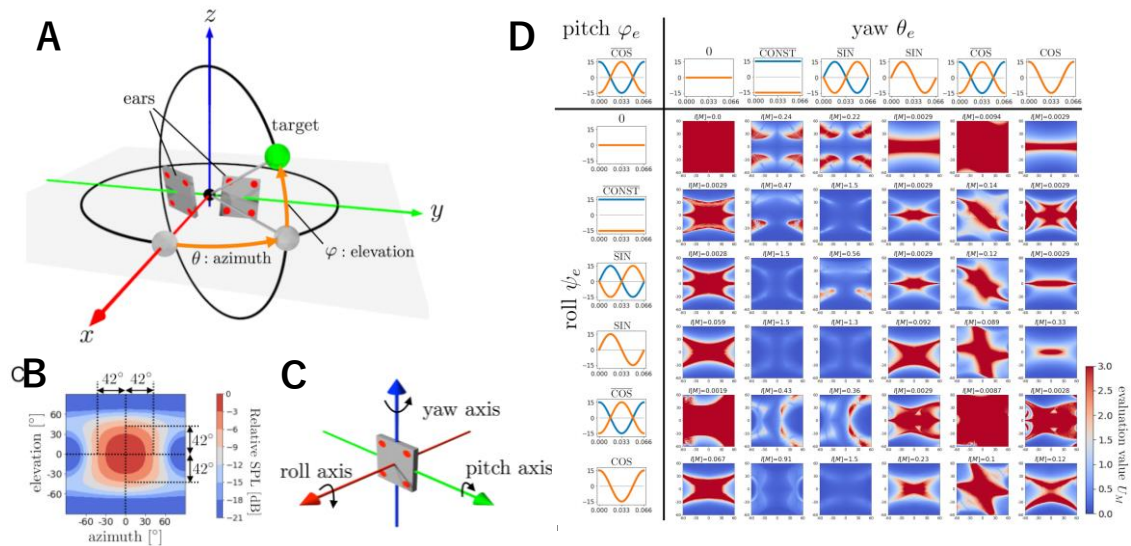


図1 網羅的な耳介動態パターンに対する3次元定位能力の数理分析の一例

(A)ターゲット方向から疑似両耳へと返るエコーを再現し、Targetの水平角(Azimuth)・垂直角(Elevation)を当てる数値シミュレーションを実施。この際、両耳の指向性(感度の方向特性)を(B)のように仮定し、左右両耳で取得したエコーの音圧レベル差情報から3次元的な方向推定を行う。なお、耳介運動については(C)で表すロール・ピッチ・ヨー運動の組み合わせから再現した。(D)はピッチ運動を逆位相に固定した場合の36パターンの耳介運動に対する定位性能の分析例を示している。赤色(白黒印刷の場合は濃黒色)の領域が含まれないロール・ピッチ・ヨー運動の組み合わせが良い運動とみなされる。これらの分析

から、3次元定位に有効な耳介運動について検討した。

[1] Hiraga, T., Yamada, Y., & Kobayashi, R. (2022). Theoretical investigation of active listening behavior based on the echolocation of CF-FM bats. PLOS Computational Biology, 18(10), e1009784.

#### 4-2. “かもしれない飛行”をしているかもしれないコウモリ [2]

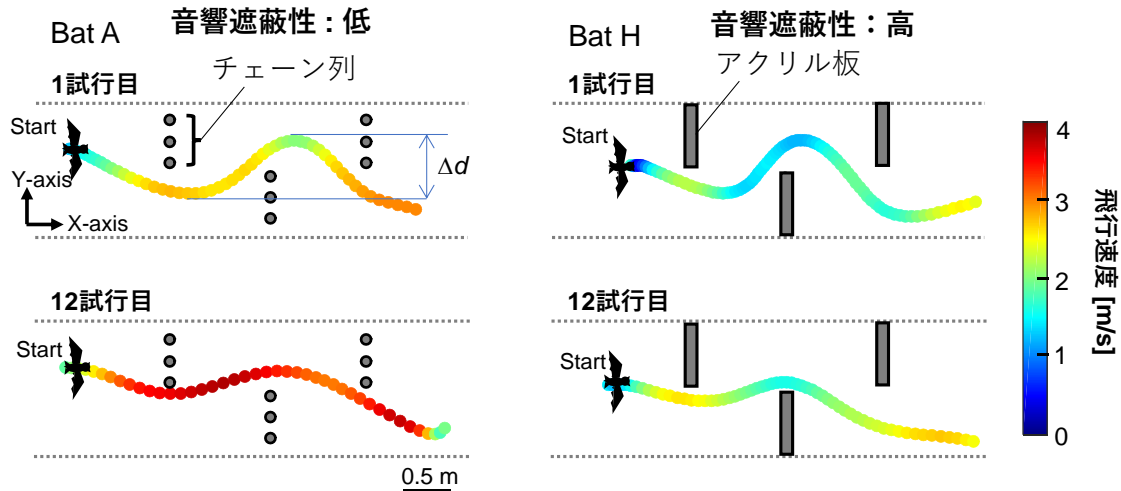


図2 音響遮蔽性の異なる環境を飛行する2個体のコウモリの飛行経路・速度の例（上から見た図）

経路上の色が飛行速度を表す。音響遮蔽性が低い場合は、1試行目から12試行目で飛行速度が大きく上昇しているのに対し、音響遮蔽性が高い場合は、そもそもの1試行目から飛行速度が少し低く、12試行目でもあまり飛行速度が上昇していないことがわかる。

音響遮蔽性の異なる両障害物環境下でコウモリの学習効果によるふるまいの違いを比較した結果、繰り返しの飛行による無駄な蛇行幅の減少は両環境ともに観測されたものの、飛行速度の有意な上昇は音響遮蔽性の低い環境でしか見られなかった。すなわち、音響遮蔽性の高いアクリル板が障害物の環境では、たとえ十分な空間学習が進んでいたとしても、飛行中に音響的死角（アクリル板の裏）の状況が把握できない場合には、飛行速度を上昇させないことがわかった。これは、曲がり角の先に何かある“かもしれない”と思いながら飛行し、リスクマネジメントとして行っている行動の可能性が考えられる。その一方で、センシング回数についてはいずれの環境においても繰り返しの飛行による有意な減少が見られ、特に音響遮蔽性の低い障害物環境下では、障害物と障害物の隙間からより遠くの空間を“覗き見るかのように”、パルス放射する様子も観測された。これらの結果から、空間記憶とセンシングによる瞬時空間把握のバランスを取りながら、飛行やセンシングの最適化を行っていることが定量的に評価できた。

[2] Yamada, Y., Mibe, Y., Yamamoto, Y., Ito, K., Heim, O., & Hiryu, S. (2020). Modulation of acoustic navigation behaviour by spatial learning in the echolocating bat *Rhinolophus ferrumequinum nippon*. Scientific reports, 10(1), 1-15.

#### 4-3. 飛行ノイズに対してロバストな自律センシングシステムの確立

膨大な飛行プロペラノイズが発生する中であっても、約3.4m程度離れた地点から物体の検知ができることを確認できた。現在は、障害物回避飛行について検証を行い、現在論文執筆中である。本研究成果により、世界に先駆けたコウモリ模倣の音響ナビゲーションシステムの土台が出来上がったと言える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Takahiro Hiraga, Yasufumi Yamada, Ryo Kobayashi	4. 巻 18
2. 論文標題 Theoretical investigation of active listening behavior based on the echolocation of CF-FM bats	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1009784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pcbi.1009784	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Teshima Yu, Yamada Yasufumi, Tsuchiya Takao, Heim Olga, Hiryu Shizuko	4. 巻 20
2. 論文標題 Analysis of echolocation behavior of bats in "echo space" using acoustic simulation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 BMC Biology	6. 最初と最後の頁 222-227.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s12915-022-01253-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yasufumi Yamada, Yurina Mibe, Yuya Yamamoto, Kentaro Ito, Olga Heim, Shizuko Hiryu	4. 巻 10
2. 論文標題 Modulation of acoustic navigation behaviour by spatial learning in the echolocating bat <i>Rhinolophus ferrumequinum nippon</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific reports	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-67470-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Yasufumi Yamada, Yuma Watabe, Shizuko Hiryu, Ryo Kobayashi	4. 巻 none
2. 論文標題 3D Acoustic Localization Based on Echolocation Strategy of Bats	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE/SICE Proceedings of International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 pp. 1133-1138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII46433.2020.9025937	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山田恭史, 渡部佑真, 佐々木晋一, 浅田隆昭, 飛龍志津子
2. 発表標題 コウモリの生物ソナーデザインを模倣した自律飛行ドローンによる障害物回避飛行 サーモホンを用いた非線形FM音による空中超音波ナビゲーションの実践
3. 学会等名 日本音響学会 第149回(2023年春季)研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasufumi Yamada
2. 発表標題 Constructive investigation for Bio-sonar strategies employed by bats
3. 学会等名 International Workshop on Biodiversity and Bioinspiration (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田 恭史, 渡部 佑真, 佐々木晋一, 浅田 隆昭, 飛龍志津子
2. 発表標題 コウモリの生物ソナーに学ぶ空中超音波ナビゲーションシステム
3. 学会等名 第35回自律分散システム・シンポジウム, 大阪 2023年1月
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yasufumi Yamada, Kanta Hasegawa, Haruka Nishiyama, Yuma Watabe, Shinichi Sasaki, Takaaki Asada, Shizuko Hiryu
2. 発表標題 Onboarding Simple Sonar System with Thermophone for Autonomous Flying Drone
3. 学会等名 International Ultrasonic Symposium 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 恭史, 長谷川 勲太, 西山 葉瑠花, 渡部 佑真, 佐々木 晋一, 浅田 隆昭, 飛龍 志津子
2. 発表標題 シンプルな生物ソナーデザインに基づく自律飛行ドローンのための音響ナビゲーションシステムの創発 サーマホンをを用いた非線形周波数下降FM音による超音波ナビゲーション の有用性について
3. 学会等名 Robomech2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田恭史, 渡部佑真, 佐々木晋一, 浅田隆昭, 飛龍志津子
2. 発表標題 サーモホンをを用いたコウモリ模倣FM音によるアクティブソナーの検討 ドローンの飛行ノイズに対するロバスト性について
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田 恭史, 竹藤 輝, 平賀 隆寛, 小林 亮
2. 発表標題 コウモリの生物ソナーから数理的に紐解くアクティブセンシングの技
3. 学会等名 数学・数理科学専攻若手研究者のための異分野・異業種研究交流会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasufumi Yamada Kentaro Ito, Shizuko Hiryu, Ryo Kobayashi
2. 発表標題 Acoustic navigation method based on echolocation strategies employed by bats
3. 学会等名 2019 A3 Workshop on Mathematical Life Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 恭史, 渡部 佑真, 飛龍 志津子, 小林 亮
2. 発表標題 コウモリのシンプルな 超 音 波センシングデザインに学ぶ 3 次元 音響定位システ ム
3. 学会等名 Robomech 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 恭史, 渡部 佑真, 飛龍 志津子, 小林 亮
2. 発表標題 コウモリの生物ソナーに学ぶ3 次元音響定位手法
3. 学会等名 第32回自律分散システム・シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関