

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686050

研究課題名(和文) コウモリのアクティブ超音波センシングによる実時間空間探索アルゴリズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of real-time spatial search algorithms by active sensing of bats using ultrasound

研究代表者

飛龍 志津子(Hiryu, Shizuko)

同志社大学・生命医科学部・准教授

研究者番号：70449510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、コウモリもつ高度に発達した超音波センシングの実態解明を目的とし、室内及び野外においてコウモリの音響行動を計測した。まず室内での障害物回避や標的捕獲中のエコーロケーション行動から、超音波のビーム幅を状況に応じてアクティブに変化、ビーム幅の狭いコウモリは視野を補償するためより頻繁に放射方向のシフトを行う、重要な障害物の方向にパルスを放射する、などがわかった。野生コウモリの採餌飛行では、コウモリが直近の獲物だけでなく、その次の獲物も視野に捉えていること、また flight attentionも先を予測する方向に向けられていること、などを見出した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate the sophisticated behavioral sensing strategies of echolocating bats through the laboratory and field measurements using bats. We found that 1) the bats (*Rhinolophus ferrumequinum nippon*) actively expand their beam width depending on the situation, especially at the final stage of capturing target prey, 2) the bat species with narrow beam width more frequently shift their acoustic gaze during flight to compensate their narrower view sight, 3) the bats direct their pulse emission toward important object during obstacle avoidance flight. Furthermore, the wild bats pay their attention (pulse direction) toward not only immediate prey but also the next prey, which was also suggested by the mathematical modeling describing the flight attention.

研究分野：生物音響工学

キーワード：超音波 ナビゲーション 計測工学 センシング

### 1. 研究開始当初の背景

超音波や光によるセンシングは、ソナーや医療用超音波診断装置など、音の視覚化技術によって実用化されてきた。また自律移動ロボットには<sup>1)</sup>、画像による障害物回避アルゴリズムなども搭載されている。しかし画像処理に依存した物体認識技術は、精度や安全性に応じて情報処理負荷が増大するといった問題がある。

一方コウモリは、生物ソナー (SONAR:SOund NAVigation and Ranging) と呼ばれ、高度に発達した超音波センシング能力を持つ。そのため、コウモリの生物ソナー機構の仕組みやその合理的な運用方法を解明できれば、既存の様々なセンシング技術や自律移動ロボットのナビゲーションアルゴリズムなどに新しい知見を提供すると期待される。しかし従来からのコウモリ研究は、生物学や神経生理学分野を中心に発展してきたことから<sup>2)</sup>、バイオミメティックを指向する研究が少ない。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、コウモリの標的探索や障害物回避行動におけるアクティブセンシングに関して、その音響行動を詳細に解明する。実験は、①再現性の高い緻密な飛行課題が可能な飼育下コウモリに対する障害物回避や標的捕獲などの室内飛行実験、および②広い3次元空間で点在する複数の標的を探索し捕獲を繰り返す野生コウモリに対する野外音響計測、をそれぞれ計画し、障害物や標的群の配置に対して、コウモリが選択する飛行軌跡や視線 (パルス放射方向)、また探索距離 (パルス放射間隔と相関) などの関係を実験的に明らかにする。さらにこれらの行動データに対する理論的な検討を行い、効率的に移動、探索、回避するための合理的な超音波センシングの運用方法やアルゴリズムの検討を目的としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) 室内飛行実験におけるパルス放射方向と飛行軌跡の計測

実験にはニホンキクガシラコウモリ (*Rhinolophus ferrumequinum Nippon*)、アブラコウモリ (*Pipistrellus abramus*) を使用した。室内を自由に飛行する様子のほか、ターゲット (昆虫) を捕食する際の飛行や、また室内に障害物 (プラスチック製チェーン) を複数設置し、それらを回避飛行する様子などを観測した (Fig. 1)。室内には2台の高速ビデオカメラが設置されており、コウモリの飛行を撮影することで3次元飛行軌跡を算出した。またコウモリが飛行中に発する超音波音声は、コウモリの背部に搭載した小型 FM ワイヤレスマイクロホンを用いて採取した。さらに同時に、飛行室内に超音波音声計測用のマイクロホンアレイを構築し、各マイクで録音したパルス音圧のピーク値より、コウモリのパルス

放射方向 (ヒトの視線に相当) やビーム幅 (視野に相当) の計測を行った。

また上記の様々な行動実験で得られたコウモリの行動パターンに基づいて、コウモリと同じ1送・2受信器を搭載した自律走行車を作成し、コウモリのセンシング行動の実装を試みた。モータによるパルス放射方向の制御を、また複数のエコーを検知可能な信号処理方法を検討し、障害物回避走行を行い、そのパフォーマンスを計測した。コウモリの飛行実験の同様にマイクロホンアレイを用いて、自律走行車が放射するパルスの放射方向を計測し、移動軌跡はビデオカメラより算出した。

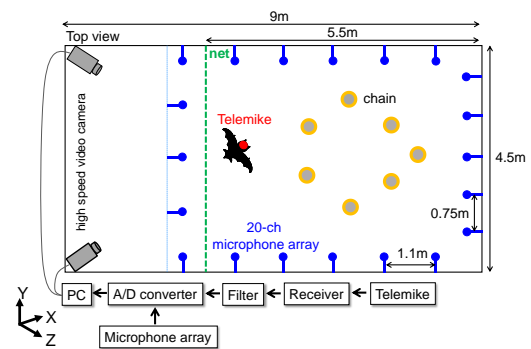


Fig.1 障害物回避飛行実験の実験系。室内にマイクロホンアレイを配置し、パルス放射方向の計測を行う。

#### (2) 大規模マイクロホンアレイシステムによる野外音響計測

観測対象種は、アブラコウモリ (*Pipistrellus abramus*) とした。計測は、京田辺同志社大学付近の普賢寺川沿いにて行った。コウモリが飛行する川の上空は、障害物が少ないオープンスペースとなっている。10 ユニット計 32ch のマイクロホンが川の両岸と橋の上にコの字型に設置した (Fig. 2A)。コウモリの3次元飛行軌跡は4つのマイクロホンで構成されたY字型ユニット (Fig. 2B) 4基を用いて、各マイクに到達するパルスの時間差から音源座標を算出した。さらに、このY字型ユニットの上辺の2つのマイクロホンに加えて、同じ高さの水平方向に 16ch のマイクロホンを配置し、合計 24ch のマイクロホンで受波したパルスから、大気中の伝搬損失と各マイクロホンの感度差を考慮し、水平方向の音圧を算出した。さらに各マイクロホンで計測された音圧をガウス近似し指向性を求め、そのピークから、パルス放射方向を算出した (Fig. 2C)。期間途中からは垂直方向に展開するマイクロホンアレイも追加し、飛行経路と同様に、パルス放射方向も3次元での計測が可能となった。

また上記の野外計測で得られた行動データを定量的に分析する新たな手法として、コウモリが2匹の獲物を連続して捕食する際の飛行方向に関するダイナミクスを表現した数理モデルを構築した<sup>3)</sup>。コウモリの獲物に

に対する飛行の attention（以後，flight attention）をパラメータとして推定し，その時間的な推移について，実験と数理モデルの双方の観点から分析を行った。

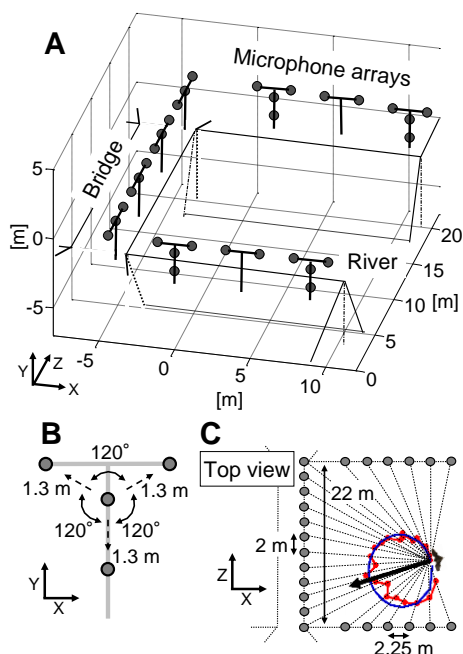


Fig. 2 野外におけるマイクロホンアレイを用いたコウモリの音響計測. コウモリの発する超音波から3次元飛行軌跡を再現.

#### 4. 研究成果

##### (1)室内実験

まずターゲット（昆虫）に向かう際のコウモリのビーム幅について計測した。その結果，獲物を捕獲する直前にビーム幅が有意に拡大していることを確認した。放射頻度や信号長の変化はこれまでも確認されていたが，CF-FM型コウモリにおいてビーム幅のアクティブな変化は本実験で初めて明らかとなった。ターゲットとの距離に応じて変化する実効的な視野の幅を，ビーム幅を積極的に拡大することで補償していることがわかった（業績①）。

また次に，自由飛行中の視野と視線の使い方について，アブラコウモリとキクガシラコウモリの比較を行った。実験には野生より捕獲したコウモリを用い，各個体の first flight のみを分析に用いた。その結果，ビーム幅の狭いキクガシラコウモリは，広いアブラコウモリに比べてより頻繁にパルス放射方向を左右に振ることを確認した。またセンシングのタイミングには両種で違いが見られ，キクガシラコウモリは2つのパルスをセットで用いるダブルパルスの発声が多くみられた。これより視野の幅と視線の使い方に関連があること，また狭い視野はパルス放射方向の調整とセンシング回数によって補償していることがわかった（投稿準備中）。

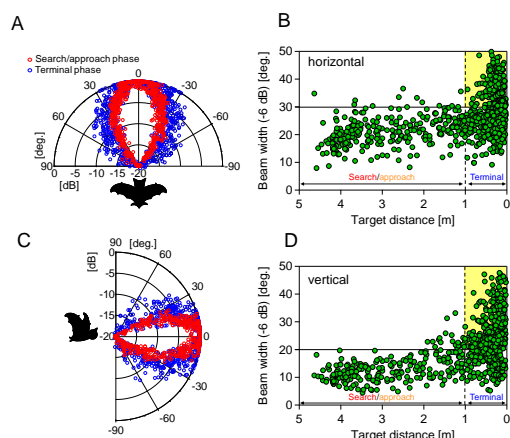


Fig. 3 コウモリのビーム幅の変化. (A,B)水平方向，(C,D)垂直方向. 獲物を捕獲する直前にビーム幅が拡大している。

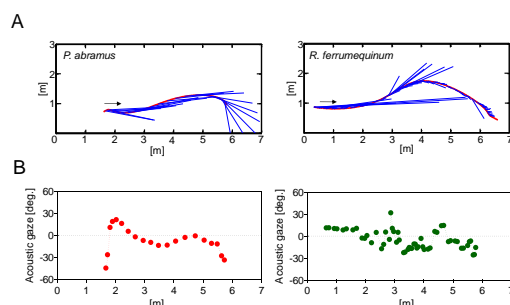


Fig. 4 自由飛行中のパルス放射方向の変化. (左図)アブラコウモリ，(右図)キクガシラコウモリ. キクガシラコウモリは頻繁に視線を変化させている。

次に障害物を回避する際のコウモリのパルス放射方向と飛行の例を Fig. 5 に示す。障害物を配置したような複雑な回避飛行では，飛行経路の選択に重要となる障害物方向にパルス放射方向を向けていることを確認した。また gaze 方向（飛行方向に対するパルス放射方向）は，その直後の飛行の旋回率に関連があることもわかった。視覚動物が移動時において行う視線変化と同様の関係を，音によるセンシングでも行っていることを明らかにした。

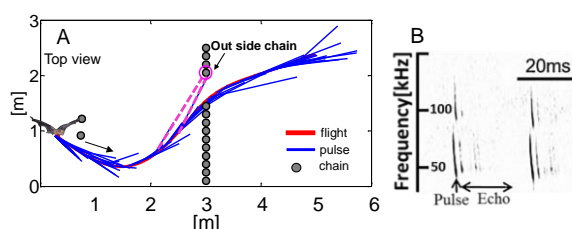


Fig. 5 障害物回避飛行中のコウモリの飛行軌跡とパルス放射方向。

これまでの行動実験で得られたコウモリの行動パターンを，1送信2受信の超音波センサーを搭載した自律走行車に実装し，場外

物回避走行を行った。Fig.6 に一例を示す。障害物を検知するとその方向に視線を移動させる、またセンシングのタイミングを注目するターゲットまでの距離に応じて調整する動作によって、障害物回避のパフォーマンスが向上することを実験により確認した。これらのことから、コウモリの行動を模擬するセンシングによって、障害物をよりスムーズに回避できる可能性が示唆された。

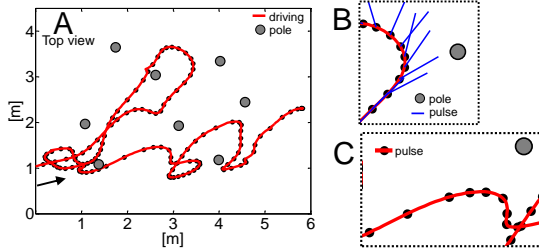


Fig. 6 1送信2受信センサーを搭載した自律走行車による障害物回避走行。(A)top view.(B)パルス放射方向の例(障害物に向けられている). (C)パルス放射タイミングの変化.

## (2)野外実験

野生のアブラコウモリを対象に、飛行軌跡及びパルスの放射方向を大規模マイクロホンアレイを用いた計測した。その結果、1秒毎など極めて短い時間間隔で連続的に捕食する場合は、水平及び垂直方向のビーム幅の中に同時に複数の獲物の角度が収まるようにパルス放射方向をシフトさせていることがわかった(Fig. 7)。これはコウモリが直近の獲物だけではなくその次の獲物も視野に捉えながら獲物に接近飛行することが、複数の獲物を短時間で連続して捕食するための超音波センシング戦略である可能性が示唆された。

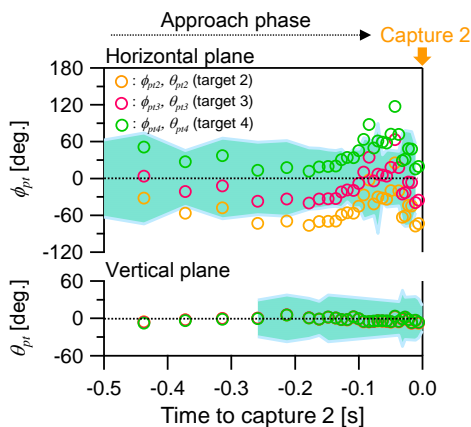


Fig. 7 野生コウモリのビーム幅と捕食位置(3か所)の関係。(上)水平方向。(下)垂直方向。

そこでコウモリの進行方向に対する捕食地点の角度を用いて、コウモリの旋回率を表す数理モデルを設計する。獲物1および2が

それぞれ飛行の旋回率の方向にどの程度影響を与えているのかをパラメータ化し、評価する。実際の野生コウモリの採餌飛行中の飛行軌跡のデータから、パラメータを抽出し、その時間変化から、コウモリが複数の獲物を連続して捕食する際の飛行方向について詳細に調べることが可能となった。その結果、コウモリの2匹の獲物に対する flight attention が短い捕食間隔においては次の獲物に向けられている様子がパラメータより確認することができた。

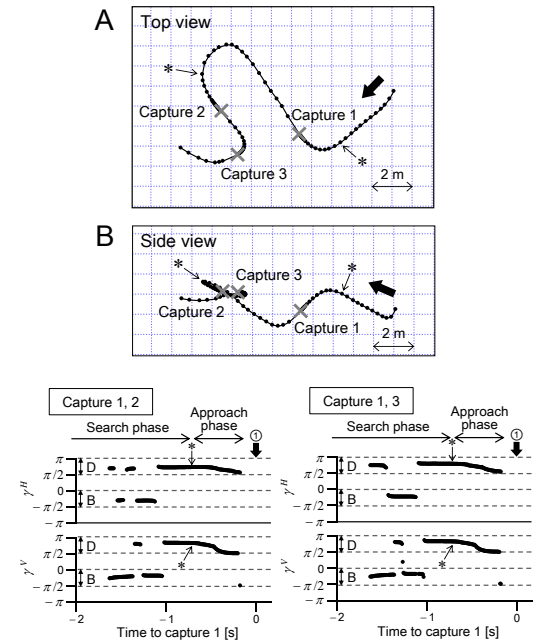


Fig.7 flight attention の時間的推移。(上)飛行軌跡を上から(A)または横(B)から見た図。(下)上記飛行の際の flight attention を3回の捕食地点に対するパラメータを設定し、どちらの獲物に flight attention が向けられていたのか、その時間的推移をみる。

## <引用文献>

- [1] W. H. Huang, B. R. Fajen, J. R. Fink, and W. H. Warren, "Visual navigation and obstacle avoidance using a steering potential function," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, pp. 288-299, 2005.
- [2] A. Suga, "Biosonar and neural computation in bats," *Sci Am*, pp. 60-68, 1990.
- [3] I. Aihara, E. Fujioka, and S. Hiryu, "Qualitative and Quantitative Analyses of the Echolocation Strategies of Bats on the Basis of Mathematical Modeling and Laboratory Experiments," *PloS One*, vol. 8, p. e686235, 2013.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件) すべて査読有

- ① Emyo Fujioka, Shotaro Watanabe, Miwa Sumiya, Ikkyu Aihara, Shizuko Hiryu, James A. Simmons, Hiroshi Riquimaroux,

Yoshiaki Watanabe, "Rapid shifts of sonar attention by *Pipistrellus abramus* during natural hunting for multiple prey," J. Acoust. Soc. Am., Vol.136, pp.3389-3400, 2014.  
DOI: 10.1121/1.4898428

- ② Naohiro Matsuta, Shizuko Hiryu, Emyo Fujioka, Yasufuji Yamada, Hiroshi Riquimaroux, Yoshiaki Watanabe, "Adaptive beam-width control of echolocation sounds by CF-FM bats, *Rhinolophus ferrumequinum nippon*, during prey-capture flight," J. Exp. Biol., Vol.216, pp.1210-1218, 2013. DOI: 10.1242/jeb.081398.
- ③ Ikkyu Aihara, Emyo Fujioka, Shizuko Hiryu, "Qualitative and Quantitative Analyses of the Echolocation Strategies of Bats on the Basis of Mathematical Modeling and Laboratory Experiments," PLOS One, Vol.8, e68635, 2013.  
DOI: 10.1371/journal.pone.0068635

[学会発表] (計 44 件)

- ① Miwa Sumiya, Emyo Fujioka, Ikkyu Aihara, Yoshiaki Watanabe, Hiroshi Riquimaroux, Tetsuo Ohta and Shizuko Hiryu, "Analysis of 3-D acoustic and flight attention of echolocating bats during attacking to multiple target," 11th International Congress of Neuroethology, Sapporo, Hokkaido, Japan, July28-August1 2014.
- ② Emyo Fujioka, Ikkyu Aihara, Shotaro Watanabe, Miwa Sumiya, Shizuko Hiryu Yoshiaki Watanabe, Hiroshi Riquimaroux and Kazuyuki Aihara, "Echolocation strategy for multiple target-preys by foraging bats investigated by field measurement and mathematical modelling," Acoustical Society of America Spring 2014 Meeting, Providence, Rhode Island, May5-9, 2014.
- ③ Yasufumi Yamada, Arie Oka, Shizuko Hiryu, Tetsuo Ohta, Hiroshi Riquimaroux and Yoshiaki Watanabe, "Investigation of acoustic gaze strategy by *Pipistrellus abramus* and *Rhinolophus ferrumequinum nippon* during obstacle avoidance flight," The 21st International Congress on Acoustics, the Palais des congrès in downtown Montréal, Canada, June2-7, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

飛龍 志津子 (SHIZUKO HIRYU)

同志社大学・生命医科学部・准教授

研究者番号：70449510