

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究 B

研究期間：2009～2011

課題番号：21760318

研究課題名（和文） コウモリの音響センシング行動に基づいたナビゲーションアルゴリズムの提案

研究課題名（英文） Navigation strategy of acoustical sensing by bats.

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

研究成果の概要（和文）：本実験では、動く標的に対するコウモリの超音波パルスの放射方向及び視野に相当するビーム幅の制御に関して、マイクロホンアレイを設置した室内の飛行実験より計測した。その結果、(1)獲物が逃避行動を開始する 1m 以内まで接近すると、ビーム幅を拡大させること、(2)ビーム幅の拡大は、獲物の移動角度よりも常に大きく、獲物の動きが音響視野内に収まること、(3)超音波パルスの周波数は一定であったことから、ビーム幅の拡大は放射部分である鼻孔やその周辺の鼻葉の形状変化による可能性がある、ことを明らかにした。

研究成果の概要（英文）： We investigated how CF-FM bats adjust pulse direction and beam width according to prey position using 31-ch microphone array system. When the bat started terminal phase at approximately 1 m from the moth, *G. pryeri* sometime showed distinctive evasive flight. At the same time, the bats broadened the beam width of some emissions in both horizontal and vertical planes. When the moth starts evasive flight, tracking accuracy of echolocation by the bat would decrease compared to that during the approach phase. However, in 97% of emissions during the terminal phase, the beam width of the pulse was wider than the misalignment (target direction – pulse direction) as well as during search and approach phase. These findings indicate the bats actively adjusted their beam width to retain moving target in spatial window of echolocation at final stage of capturing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：コウモリ・超音波センシング・生物ソナー

1. 研究開始当初の背景

コウモリは、自ら発した超音波音声（パルス）とそのエコーを比較・分析することで、周囲環境を把握している（エコーロケーション）。これにより、コウモリは暗闇の中でも微小な飛翔昆虫を検知し、捕獲を実現している。このような高度なセンシング能力を持つコウモリのソナー機構は、空間認識能力、システムの大きさ、汎用性など既存の音響センシング技術と比べ卓越している点が多いと考えられる。我々はコウモリの生物ソナー機構を解明し、センシングやソナー技術などの工学分野に新たな設計思想を提案することを目標に研究を行っている。

2. 研究の目的

空中を不規則に動く昆虫の捕獲を実現するには、飛翔昆虫の情報をリアルタイム且つ正確に把握する必要がある。しかし、放射パルスのビーム幅により、検知可能な空間範囲が限られることから、コウモリが得ることのできる標的の空間情報は離散的である。従って、コウモリは状況に応じて、注目する方向（パルス放射方向）やその範囲（ビーム幅）を効果的に調節し、そのエコーから標的の情報を効率よく抽出していると予測される。そのため、捕獲飛行時におけるパルス放射方向と指向性に注目することで、コウモリの移動標的に対するアクティブソナー戦略に関する新たな知見獲得が期待される。

そこで本報告では、観測室内にマイクロホンアレイを構築し、飛翔蛾の捕獲飛行時における CF-FM コウモリの放射パルスの計測を行った。計測した音声から放射方向およびビーム幅を算出し、コウモリが動く標的に対してどのようにパルス放射方向とビーム幅を制御しているのか、検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 観測対象種

本実験では、CF-FM コウモリのニホンキクガシラコウモリ (*Rhinolophus fermequinum nippon*) を用いた。パルスは周波数一定の CF 成分とその前後に周波数変調する iFM (initial FM) 及び tFM (terminal FM) 成分から構成されている。また、調波構造を成しており、音圧が最大となる第 2 倍音の CF 部の周波数は約 70 kHz である (Fig. 1)。標的となる蛾はヤガ科のプライヤキリバ (*Goniocraspidum pryeri*) を用いた。体長は約 2 cm、開張 (翅を広げた大きさ) は約 4 cm である。この蛾は聴覚を持ち、コウモリの接近に伴い時折逃避飛行を示す。

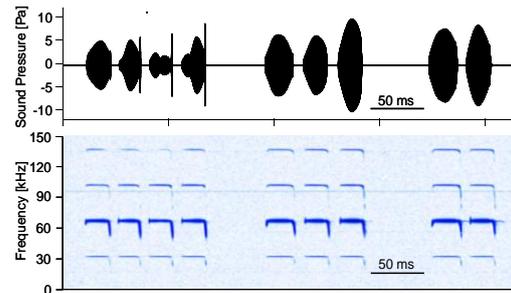


Fig. 1 Typical echolocation pulses of *Rhinolophus fermequinum nippon* in resting state recorded at 1 cm from nostril. (A) Amplitude pattern. (B) Spectrogram.

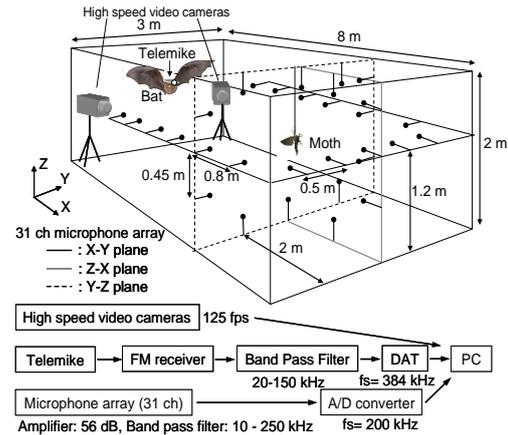


Fig. 2 Microphone array system for measurements of direction and directivity of emitted pulses by the bat during intercepting a fluttering moth in the flight

(2) 実験系

実験系を Fig. 2 に示す。観測室 (8 m × 3 m × 2 m) 内でコウモリが飛翔蛾の捕獲飛行を行う様子を計測した。蛾は観測室の長手方向の正面壁から約 2 m 離れた位置で天井から糸で吊り下げており、糸の拘束範囲内では自由に移動が可能であった。コウモリ及び蛾の 3 次元飛行軌跡は、2 台の高速度ビデオカメラ (MotionPro X3, 125 fps) で撮影した 2 方向画像から算出した。コウモリの音声は、頭部に搭載した小型 FM ワイヤレスマイクロホン (テレマイク, Knowles, FG-3329)^[3] 及び、観測室内に配置した 31 ch マイクロホンアレイ^[5] (水平面: 17 ch, 垂直面: 17 ch, Knowles, FG-3329) を用いて採取した。採取した音声は、それぞれ DAT (SONY, SIR-1000W, fs=384 kHz, 16 bit), A/D コンバータ (NI PXI-6250, fs=200 kHz, 16 bit) を用いて PC に記録した。なお、外部トリガにより音声と画像は同期させた。

(3) パルス放射方向及びビーム幅の算出

マイクロホンアレイの各チャンネルに入力された音響信号より、各放射パルスの tFM 成分の最大音圧値を算出した。tFM 成分は時間長が約 3 ms と短く、壁などからのエコーと tFM 成分が重畳することなく正確に音圧値の算出が可能であった。音圧値はコウモリ

と各マイク間の大気中の音波の伝搬減衰及び、各 ch 間のマイク感度差を考慮し補正を行った。算出した音圧値に比例した長さでコウモリから各マイク方向にベクトル線を引き、この和からパルス放射方向を算出した (Fig. 3A 黒矢印)。また、ベクトル線の先端を結ぶ包絡線上で、パルス放射方向から音圧値が -6 dB となる 2 点の角度差をビーム幅として算出した (Fig. 3A 両矢印)。

実験に先立って、マイクロホンアレイによる放射方向及びビーム幅の計測誤差をラウドスピーカー (Pioneer, PT-R7, Tokyo, Japan) を用いて測定した。水平面、垂直面における放射方向及びビーム幅の計測誤差をそれぞれ Figs. 3B, C に示す。これより、観測室正面壁から 1 m 以遠では放射方向は約 5° 以内、ビーム幅は約 10° 以内の誤差で計測可能であることが示された。観測室の長手方向の正面壁を 0° と定義し、パルス放射方向 (Pulse direction)、コウモリに対するガの方向 (標的方向; Target direction)、飛行方向 (Flight direction) をそれぞれ数値化した (Fig. 3D 参照)。なお、飛行方向は飛行軌跡の接線方向とし、数値化したパルス放射方向と標的方向の角度差を $\Delta\phi$ (Fig. 3D 参照) と定義した。

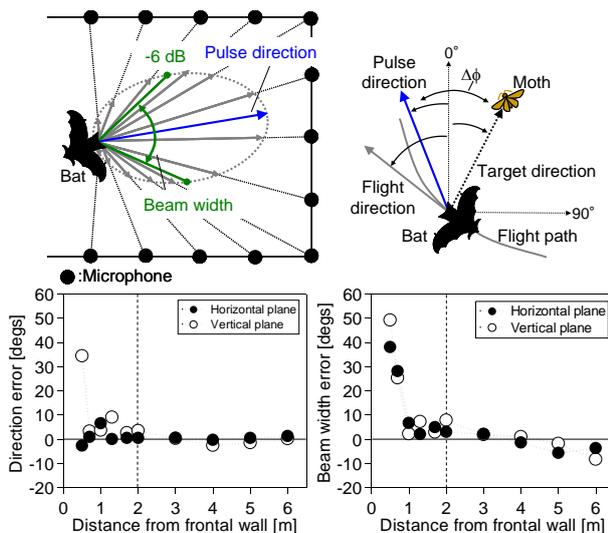


Fig. 3 (A) Calculation methods of the pulse direction and beam width estimated from sounds received by microphones. Pulse direction was calculated by adding up vectors which were proportional to sound pressure of each channel. Beam width was calculated by -6 dB (half-amplitude) angles from pulse direction. (B) Measured pulse direction error and (C) beam width error by microphone array system. Dashed line indicates the position of the moth tethered by a string from the ceiling. (D) Definitions of angular components.

4. 研究成果

Figure 4A および B は、コウモリ (灰実線) 及び蛾 (白プロット) の水平面及び垂直面における飛行軌跡、パルス放射方向 (矢印) を

示す。キクガシラコウモリは蛾を検知した直後より、蛾の羽ばたき情報 (1 周期約 30 ms) を繰り返し獲得するために、パルスの CF 成分を 100 ms 程度まで伸長させることが報告されている。図中*印は CF 伸長パルスを示しており、コウモリが計測開始直後より蛾を検知し、追跡していたことが分かる。コウモリは蛾を検知した直後から蛾への接近を開始したが、蛾はコウモリが約 1 m 以内に接近すると、突如旋回しコウモリから遠ざかる方向に逃避飛行を行った (図中開矢印)。他の飛行も同様に、コウモリが約 1~2 m 以内に接近した際に、蛾は突如飛行方向や飛行速度を変化させて逃避飛行する様子が確認された。

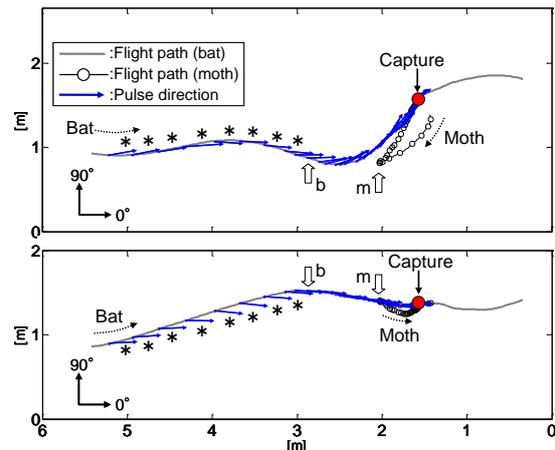


Fig. 4 Horizontal (top) and vertical (bottom) flight trajectories of the bat (gray line) and the moth (open plots) during intercepting flight. Arrows indicate direction of each pulse. Open arrows indicate positions of bat (b) and moth (m) when the moth started evasive flight.

Figures 5A, B は上述の飛行におけるパルス放射方向 (プロット)、標的方向 (点線)、飛行方向 (実線) の変化をコウモリ-蛾間距離 (標的距離) を横軸に示している。コウモリは標的方向の変化に対応してパルス放射方向を変化させていることが確認された。コウモリが蛾を検知し接近を行っていた標的距離 1 m 以遠 (approach phase) では、コウモリは水平、垂直面共に $\Delta\phi$ を約 5° 以内で、蛾に対して音響的に追尾していた。コウモリがパルス放射頻度を急激に増加させた標的距離 1 m 以内 (terminal phase) では、蛾は逃避飛行を開始し (図中開矢印)、標的方向が急激に約 60° 変化した。このときの $\Delta\phi$ は水平面、垂直面共に最大約 20° まで増加した。一方で、プロット上の垂直線の長さは各パルスのビーム幅に対応しており、ビーム幅は approach phase のパルスと比べて水平面、垂直面共に拡大していた。そこで、ビーム幅の変化について詳細に調べた。

Figures 6A, Cはそれぞれ水平面, 垂直面における approach (閉プロット) 及び terminal (開プロット) phase の放射パルスの指向性パターンを示している. また, 水平面, 垂直面における標的距離に対するビーム幅の変化を Figs. 6B, D に示す. Approach phase において, ビーム幅は水平面約 $\pm 20 \sim 30^\circ$, 垂直面約 $\pm 10 \sim 20^\circ$ (5bats, 10 flight data, $n=99$) であった. Terminal phase ではビーム幅が拡大したパルス数が急増し, 拡大時のビーム幅は水平面約 $\pm 30 \sim 45^\circ$, 垂直面約 $\pm 25 \sim 45^\circ$ (5bats, 10 flight data, $n=137$) を示した.

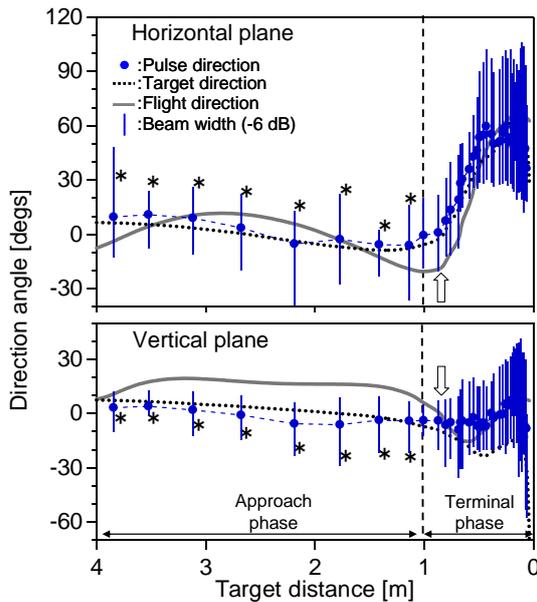
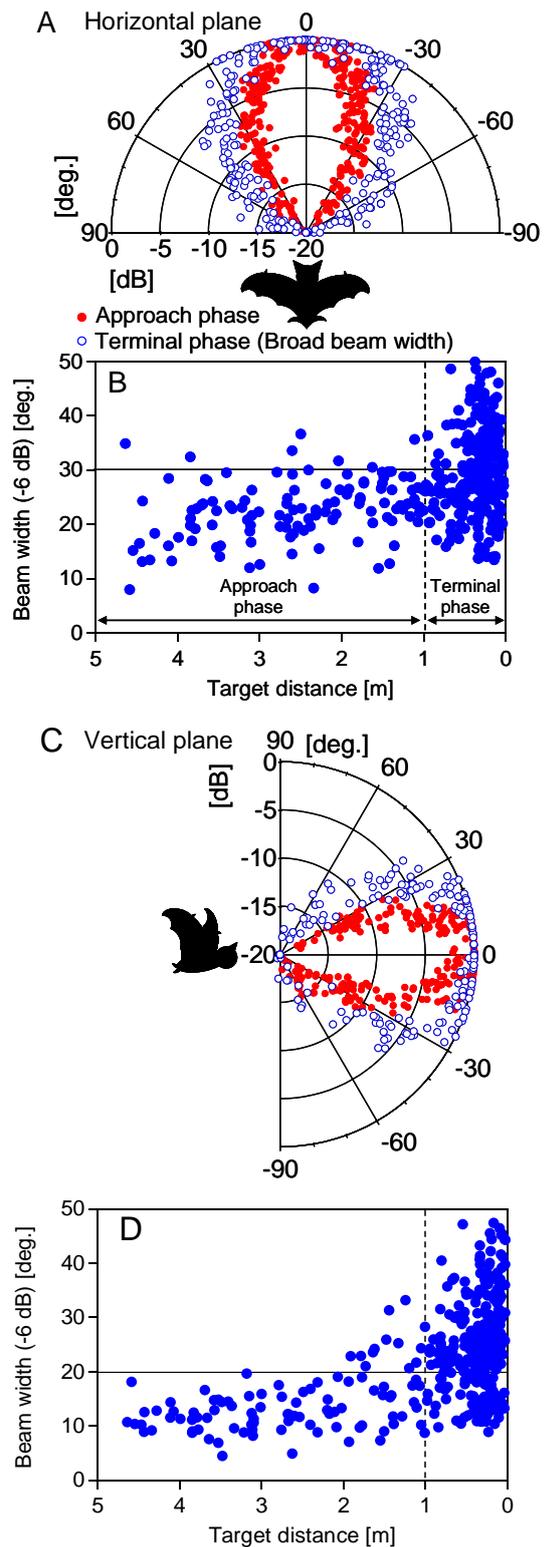


Fig. 5 Changes in pulse, target and flight directions as a function of target distance in horizontal (A) and vertical (B) planes. Data was taken from Fig. 4. The length of vertical lines correspond beam width (-6 dB).

FM コウモリでは, 捕獲直前に放射パルスの中心周波数を約 55 kHz から約 27.5 kHz まで低下させ (terminal buzz), 結果としてビーム幅が拡大することが報告されている. しかしキクガシラコウモリでは, approach phase における tFM 成分の周波数帯域は約 55 ~ 68 kHz であったのに対し, terminal phase においての周波数帯域は約 56 ~ 68 kHz となり, tFM 成分の周波数の低下は確認されなかった. ビーム幅拡大の機構としては, パルスの発声部分である鼻孔の周辺 (鼻葉) の形状変化や鼻葉内の複雑な構造による音の干渉^[10]が可能性として挙げられるが, 更なる検討が必要である.

Fig. 6 (A) Horizontal and (C) vertical directivities of echolocation pulses during approach (filled plots) and terminal (open plots) phases (5 bats). (B), (D) Relationship between beam width (-6 dB) and target



distance in horizontal (B) and vertical (D) planes (5 bats).

Terminal phase において, 蛾の逃避飛行により標的方向が急激に変化し, パルス放射方向と標的方向との角度差 $\Delta\phi$ は 30° 以上に拡大する状況が見られた (Fig. 7). 一方で, terminal phase におけるビーム幅 (图中黒実線: 平均値, 灰区間: 標準偏差) は $\Delta\phi$ より広

い角度に拡大していた。そのため、コウモリは蛾の逃避飛行によって $\Delta\phi$ が大きくなる状況でも、ビーム幅の拡大によって蛾の位置を知覚可能であったと考えられる。これより、コウモリは音響センシングにおいて、標的が逃避飛行を行う場面ではビーム幅を柔軟に拡大させ、注耳する空間範囲を広げることで、不意をつくような標的の動きに対応して標的の位置把握をし続ける戦略を持つ可能性が示唆された。

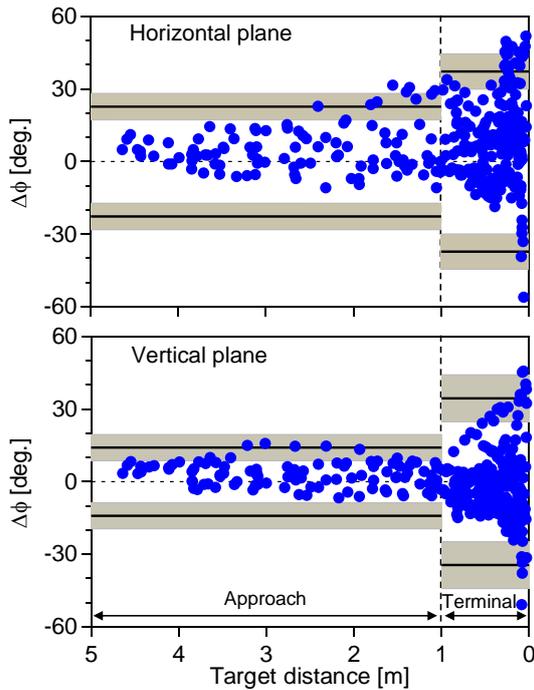


Fig. 7 Relationship between $\Delta\phi$ and target distance in horizontal (A) and vertical (B) planes. Black lines indicate average of beam width during approach and terminal phases. Width of gray lines indicates standard deviation of beam width.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(査読有 計2件)

- [1] Shizuko Hiryu and Hiroshi Riquimaroux, "Developmental changes in ultrasonic vocalizations by infant Japanese echolocating bats, *Pipistrellus abramus*," J. Acoust. Soc. Am., vol.130, pp.147-153, Sep 2011.
- [2] Emyo Fujioka, Shigeki Mantani, Shizuko Hiryu, Hiroshi Riquimaroux and Yoshiaki Watanabe, "Echolocation and flight strategy of Japanese house bats during natural foraging, revealed by a microphone array system," J. Acoust. Soc. Am., vol.129, pp.1081-1088, Feb 2011.

〔学会発表〕(計35件)

- [1] Naohiro Matsuta, Shizuko Hiryu, Hiroshi Riquimaroux and Yoshiaki Watanabe,

"Measurement of controlling directivity of echolocation pulse in Japanese horseshoe bats during intercepting a fluttering moth," ARO midwinter meeting, The Manchester Grand Hyatt Hotel, San Diego, California, USA, Feb, 25-29, 2012

- [2] CF-FM コウモリの移動標的に対するアクティブソナー戦略—飛翔蛾捕獲飛行時における超音波パルスの放射方向及び指向性計測—松田 直大, 木下 由貴, 飛龍 志津子, 太田 哲男, 力丸 裕, 渡辺 好章, 日本音響学会超音波研究会, 東海大学, 2011/11/24.
- [3] 松田直大, 飛龍志津子, 力丸裕, 渡辺好章"CF-FM コウモリの捕獲飛行時における飛翔蛾に対する3次元定位戦略に関する検討," 日本音響学会秋季大会, 島根大学, 2011/9/20-22. 他32件

6. 研究組織

(1)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