

# 学位論文要旨

## コウモリの耳介運動を伴うエコーロケーションにおける 3 次元定位の数理的解析

氏名 平賀 隆寛

コウモリは、超音波パルスを発射し、周囲の物体からの反響音を聴く、エコーロケーションにより周囲の状況を把握する。これらのコウモリは、視覚情報が得られないような完全な暗闇の中でも、障害物を避けながら自由に飛行することができ、昆虫等の小さな獲物を空中で狩るなどといった高度なタスクを 1 つの送信器（口や鼻）と 2 つの受信器という、非常にシンプルな系によって行っている。

音の情報は、一見すると、視覚を用いて得た 2 次元の画像情報を用いたセンシングに比べて情報量が少なく、3 次元空間の定位は困難であるように思われる。しかし、コウモリはランダムに配置された障害物を避けたり、多数のコウモリと一緒に飛行したり、飛行中の獲物を狩るなどの高度なタスクを実際にこなしており、これらを実現するために何らかの情報量増幅の工夫をしていることが考えられる。

本研究では、超音波パルスに周波数定常部を含む、CF-FM コウモリと呼ばれる種のコウモリがエコーの受信と同期した高速な耳介運動を行っていることに注目し、この耳介運動が 3 次元空間内の物体の定位に関してどのような意義を持つのかについて、その耳介運動の方法まで込めて数理モデルおよび、その評価指標を作成し、解析を行った。

### 解析手法

3 次元空間内の物体の位置は、自己からの距離、方位角  $\theta$ (azimuth) および仰角  $\varphi$ (elevation) の 3 情報が決まれば一意に特定できる。このうち、距離については超音波パルスの放射からエコー受信までの時間から求まる。本研究では、仰角と方位角の特定に耳介運動を用いているという仮説のもと、左右で観測される音圧レベル差 (ILD) をもとにした方向定位の可能性を検証した。

モデル耳は、Roll, Pitch, Yaw の 3 軸まわりの回転の合成で表される運動を行なうとし、したがって左右耳の姿勢履歴のペアは 2 つの  $SO(3)$  値関数のペア  $M = (P^l(t), P^r(t))$  ( $t \in [0, T]$ :  $T$  は耳介運動の周期) で表せる。この運動と指向性により、左右耳の受信信号の振幅  $S_{\text{env}}^l, S_{\text{env}}^r$  が時間変化し、音圧レベル差信号  $P_M(t; \mathbf{n}) = 20 \log_{10} \left| \frac{S_{\text{env}}^l(t; \mathbf{n})}{S_{\text{env}}^r(t; \mathbf{n})} \right|$  が生成される。同定すべき方位の集合を  $X \subset S^2$  とし、次の写像を考える。

$$\begin{aligned} M : X &\longrightarrow C^0([0, T]) && \text{(姿勢履歴と同じ } M \text{ を使う)} \\ \mathbf{n} &\longmapsto P_M(\cdot, \mathbf{n}) \end{aligned} \quad (1)$$

我々が知りたいのは、どのような  $M$  (左右の耳介運動) が性質の良い  $M^{-1}$  を与えるかということである。ここでまず問題となるのは、写像  $M$  が単射であるかどうかである。また、単射であったとしても、ある点で縮退している、または、ほとんど縮退している (物体の方向の差に対して音圧レベル差信号の変化がごく僅かである) と、ノイズや観測誤差に非常に弱い観測といえる。 $M^{-1}$  の性質の良さを評価するために、以下の評価指標を導入する。

定義：単射指標関数  $U_M(\mathbf{n})$  を次式で定義する。

$$U_M(\mathbf{n}) = \sup_{\mathbf{n}' \in X \setminus \{\mathbf{n}\}} \frac{\|\mathbf{n} - \mathbf{n}'\|_2}{\|P_M(\cdot; \mathbf{n}) - P_M(\cdot; \mathbf{n}')\|_\infty} \quad (2)$$

定義：  $M$  の単射度  $I[M]$  を次式で定義する。

$$I[M] = \left( \int_X U_M(\mathbf{n}) d\mathbf{n} \right)^{-1} = \left( \iint_X U_M(\theta, \varphi) \cos \varphi d\theta d\varphi \right)^{-1} \quad (3)$$

本研究では、モデル耳の Roll, Pitch, Yaw に関する回転量が基本周期  $T$  をもつ周期関数で書けるという仮定のもと、左右耳の Roll, Pitch, Yaw の関数形の組み合わせとしてそれぞれ 6 パターン ( $\mathbf{0}$  : 振らない,  $\overline{\text{CONST}}$  : 定数で反符号,  $\text{SIN}$  : 正弦関数で同位相,  $\overline{\text{SIN}}$  : 正弦関数で反位相,  $\text{COS}$  : 余弦関数で同位相,  $\overline{\text{COS}}$  : 余弦関数で反位相) の計  $6^3 = 216$  パターンにおいて解析を行った。

また、実際に音圧レベル差信号から、物体の方向定位を行う逆写像  $M^{-1}$  の構築に関しては、4 層ニューラルネットワークを用いた教師あり学習によって行った。評価関数と教師あり学習の学習結果を比較した結果、学習がうまく行えない点と評価関数  $U_M$  の値が大きくなる点がきちんと対応していることが確認された。

## 解析結果と考察

モデル耳を用いた 216 パターンの耳介運動うち、評価指標と教師あり学習の結果を解析すると、高精度かつロバストな定位が実現できる耳介運動の条件は以下の 4 条件をすべて満たす場合に限ることが明らかになった。

(i) 両耳軌道の和集合の凸包が Roll-Pitch-Yaw 空間内で 3 次元である。(ii) 各耳の軌道が 2 次元である。(iii) 両耳の Yaw に関する回転が反位相である。(iv) 両耳の Pitch に関する回転が反位相である。

これらの条件をすべて満たしたのは、216 パターンのうち 14 パターン、実際のコウモリの耳介運動に対応した Pitch 方向の回転の組み合わせが  $\overline{\text{COS}}$  である 36 パターンのうち 5 パターンであった。また、これらのパターンの測定誤差に対するロバスト性の高さも検証することができた。

同様の解析を、他のタイプの指向性を持つモデルについても行ったが、上記の 5 パターンはつねに性質の良い  $M^{-1}$  をもつことを確認することができた。また、工学的応用に向けて、固定された多数のマイクを用いても方位同定が可能であることも確認した。

## まとめと展望

本研究では、モデル耳において、3 軸回転からなる特定の条件を満たす耳介運動のみが、3 次元方向検出を高精度かつロバストに行えることを数理モデルを用いて示した。特に Pitch 方向の回転が反位相であることが必須 (条件 (iv)) であることから、実際のコウモリの耳介の Pitch 方向の反位相運動の解釈を与えたと言えよう。また、CF-FM コウモリがかなり大きなエネルギー負担をしながら、エコーに完全に同期させて耳介を動かしていること、さらにコウモリの脳において ILD をエンコードする部位である上オリーブ核がかなり大きな比率を占めているという事実、これらと本研究で得られた結果から、彼らが耳介運動を定位に用いているということの高い蓋然性を持って示せたと考える。

また、本研究では、ILD 時系列データからオブジェクトの方向  $(\theta, \varphi)$  を推定する方向 (本研究においては教師あり学習のフェーズ:  $M^{-1}$  の構築) の計算を行うことなく、オブジェクトの方向から ILD 時系列データを取得する「順方向」の計算のみによって、高精度かつロバストな逆写像の存在性について判断できる指標 (単射度) を提案した。これは、センシング分野、特にアクティブセンシングにおける汎用的な評価システムに応用されることが期待できる指標となっている。このような点も、本研究の知見の大きな意義といえよう。