

広島大学学位請求論文

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

2022 年

広島大学大学院理学研究科

数理分子生命理学専攻

平賀 隆寛

目次

1. 主論文

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
平賀 隆寛

2. 公表論文

Theoretical investigation of active listening behavior
based on the echolocation of CF-FM bats
Takahiro Hiraga, Yasufumi Yamada, Ryo Kobayashi.
PLOS Computational Biology 2022;18(10):e1009784.
<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009784>

主論文

目次

1	イントロダクション	3
1.1	コウモリのバイオソナーシステム	3
1.2	研究のモチベーション	5
2	解析手法	6
2.1	モデルに取り入れたコウモリの行動	6
2.2	モデル耳による方向定位	8
2.3	評価関数と単射度	11
2.3.1	観測に関する一般論	11
2.3.2	本研究における設定	17
2.4	機械学習による逆写像 M^{-1} の構築とその評価	18
2.5	モデル耳の動かし方	19
3	結果と考察	21
3.1	耳の動きによる方向定位の典型例	21
3.2	垂直角が $\overline{\text{COS}}$ であるときの結果	21
3.2.1	モデル耳が ILD を細かく聞き分けられる場合	22
3.2.2	観測誤差鋭敏性に対するロバスト性の評価	25
3.3	垂直角のパターンを固定しない耳介運動における結果	29
3.4	他の指向性耳における結果	33
3.5	マイク数を増やすことによる耳介運動を代替する手法	35
3.5.1	耳介運動を離散的に行うことによる表現	35
3.5.2	定位に必要なマイクの数	40
3.6	実際のコウモリの指向性を用いた学習	46
3.6.1	実コウモリの指向性の再現	46
3.6.2	再現耳介による評価関数と単射度の算出	48
4	まとめと展望	51

1 イントロダクション

1.1 コウモリのバイオソナーシステム

コウモリやイルカは、エコーロケーションシステムと呼ばれる高度に発達したソナー (SONAR: SOund NAvigation and Ranging の頭文字) システムを持っており、超音波パルスを発射し、周囲の物体から返ってくるエコーを分析し、周囲の状況を把握する。このような、生物による音波を用いた探知機能をバイオソナーという。コウモリが超音波を使って定位することは、1950年代に Griffin によって初めて報告された [1]。コウモリはエコーロケーションを行う際に、口や鼻孔から 15kHz から 200kHz 以上の高周波数の短い音を発する [2]。エコーロケーションを行うコウモリは、発する超音波が一定周波数 (CF) の超音波か周波数変調 (FM) の超音波かによって分類される [2][3]。FM 音だけでエコーロケーションするコウモリは FM コウモリと呼ばれる。一方、CF 成分を定位に用いるコウモリの多くは、CF 成分と FM 成分をパルスに組み合わせており、CF-FM コウモリと呼ばれている。これらのコウモリは、進化的な適応によって獲得した洗練されたエコーロケーションシステムにより、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 [4][5]、昆虫を代表とする小さく飛ぶ獲物を狩ることができる [6][7][8][9]。

このような生物の行う知覚に対して、自動車に搭載されるセンサー機構等に用いられるような、現在の工学における電子制御機構は、非常に多数のセンサーを用いて得られた情報をコンピューターによって処理することで、周囲の環境を隈なく把握しようとする。また、機器によっては、自機に搭載されたセンサーのみならず、例えば GPS による位置情報などの外部からの情報をも用いた情報取得を行うことがある。

無論、生物のセンシングにおいて、ある物体の位置をミリメートル単位で正確に知覚するといったことは (例えば、人間の視覚における物体知覚においても) 無いが、それでも障害物に衝突するなどといったことを起こすことなく生活を送ることができる。すなわち、生物の行うセンシングは、自己の持つセンシング機構を用いた不完全な情報をもとに

移動等のタスクをこなすことを可能とするものである。

ヒトにおいては、移動する際には視覚を主に用い、聴覚を併用する。しかし、エコーロケーションを行うコウモリが暗闇の中を飛行する際は、口や鼻から超音波を発生し、返ってきたエコーを左右の耳で検出するという、聴覚を主に用いたセンシングを行う。これは、1つの送信器と2つの受信器という、聴覚による3次元の空間センシングとしては非常にシンプルな系によるセンシングである。音の情報は、物理的には音圧（観測点における空気圧の大気圧からの偏差）の時系列データであり、本質的に1次元のデータである。これは、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、他のコウモリと一緒に飛行したり [1][5]、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いる。このような行動は、コウモリが1送信・2受信というシンプルな系に適応した行動戦略を採用していることを示唆しており、このようなコウモリのセンシングの理論的な理解は、非常に興味深い研究対象であるだけでなく、工学への応用という面でも有用である。

現在までに、聴覚を用いたセンシングのプロセスは、コウモリや他の哺乳類について広く研究されている [10][11][12]。コウモリの行動面においては、飛行中のコウモリが静止物体に対して、エコーロケーションを行う場合に必ず発生するドップラー効果の結果を予測した上で、返ってくるエコーの周波数が一定となるように放射する超音波パルスの周波数を調整したり（ドップラーシフト補償）、障害物があることが予想される状況においては、その障害物の方向にパルスの放射方向を調整するといった行動が報告されている。また、飛行を終えて物体の上に乗るといった場面では、その物体に対して多数のパルスを発射するといった行動も見られる。これは、コウモリが多く情報を必要とする場面において、自らの意思でアクティブにセンシング行動を変化させていることを示している。また、コウモリ自体の身体的な機能の面においても、多数の報告がある。多くの哺乳類に見られるように、コウモリは左右耳における音圧レベル差（ILD）のエンコーディング機構を外側上オリーブ核に持つことが報告されている [12][13][14][15][16][17]。また、コウモリの外側上オリーブ核は比較的大きな容量を持っている [18]。ILDを用いた定位は回折性の低い

高周波音に対して物理的に適していると考えられる。このように、ILD のエンコーディング機構は 3 次元定位に重要な特性であると考えられており、近年の研究では、ILD のメカニズムと頭部伝達関数を組み合わせた、より包括的な解析も行われている [19][20][21]。これらは、エコーの強度がエコー到達方向の関数として表されることを示唆している。また、様々な種のコウモリでの頭部伝達関数測定の結果、物体から反射したエコーに対する受信方向の調整に耳介が利用されていることが示唆されている [19][20][21][22]。

1.2 研究のモチベーション

本研究では、コウモリが採用している行動戦略として、コウモリの耳介運動に着目した。

コウモリのいくつかの種は、3 次元定位に運動的な解決策を採用している。コウモリは、超音波パルスの放射と対応したタイミングで、素早く耳介を前後に動かすことが知られていて [23][24][25][26]、キクガシラコウモリでは、その頻度は 1 秒につき 16 回から 25 回の間で変化するという報告もある [23]。また、このような耳介の動きは、コウモリ自身が知覚するのに十分な量のドップラーシフトを発生させることなども報告された [24]。

このような能動的な聴取行動は、CF-FM コウモリで報告されている (図 1A)。これまでの生理学・動物行動学的研究により、CF-FM コウモリは FM 部を用いてパルス放射からエコー到達までの時間間隔を正確に検出し、対象物までの距離を正確に測定することが明らかになっている [11][27]。また、CF 部は蛾の羽ばたきの検出やドップラーシフト補償に利用されている [28][29][30]。キクガシラコウモリの測定によれば、CF 部のエコーを聞いている間、両耳介は連続的に動いている [24]。このような行動の観察に基づき、数値シミュレーション [31][32] や実際のデモンストレーション [24][33] によって、耳介運動が 3 次元定位に有用であることが検討されているが、適切な耳介運動の本質については未解明である。

このような背景から、本研究では、コウモリの耳介運動がどのようなときに正確な定位を行うことができるのかを、耳介を単純化したモデルを用いて検討した。

2 解析手法

本章では、モデル耳の運動、それに対して観測される ILD（音圧レベル差）の導出と、評価に用いる評価指標の定義を行う。

2.1 モデルに取り入れたコウモリの行動

本節では、モデル耳に反映されているコウモリの行動特性について述べる。

図 1A は、CF-FM コウモリ(キクガシラコウモリ:*Rhinolophus ferrumequinum nippon*)が発するエコーロケーションパルスの典型的な時間と周波数構造の関係を表している。これらのパルスでは、CF 部分の第 2 高調波 (CF_2) にエネルギーの最大値が現れており、コウモリは CF_2 部分を、飛んでいる蛾の定位やドップラーシフト補償に積極的に利用している [28][29][30]。本研究では、エコーの CF_2 成分について振幅変調を計算した。

キクガシラコウモリの耳の動きを測定した先行研究によると、エコーの CF 部分を聞いている間、耳介を連続的に動かしている [24]。また、これらのコウモリは左右の耳介を逆位相で動かしている [24][23]。特に、エコーを聞いているときの耳介は、後ろから前へ、あるいは前から後ろへと動く傾向があり、正弦振動としてモデル化できるような動きをしていた [23]。これらの知見に基づいて、耳介運動モデルを作成し、シミュレーションを行った。

図 1B は、耳介の運動によってエコー中の CF_2 成分が振幅変調される様子を示す模式図である。実際の CF-FM コウモリは、1 回の周期的な耳介運動の間に、2 回のセンシング動作を行う傾向があるため [23]、2 回のセンシング動作から得られるエコー信号をシミュレーションした。

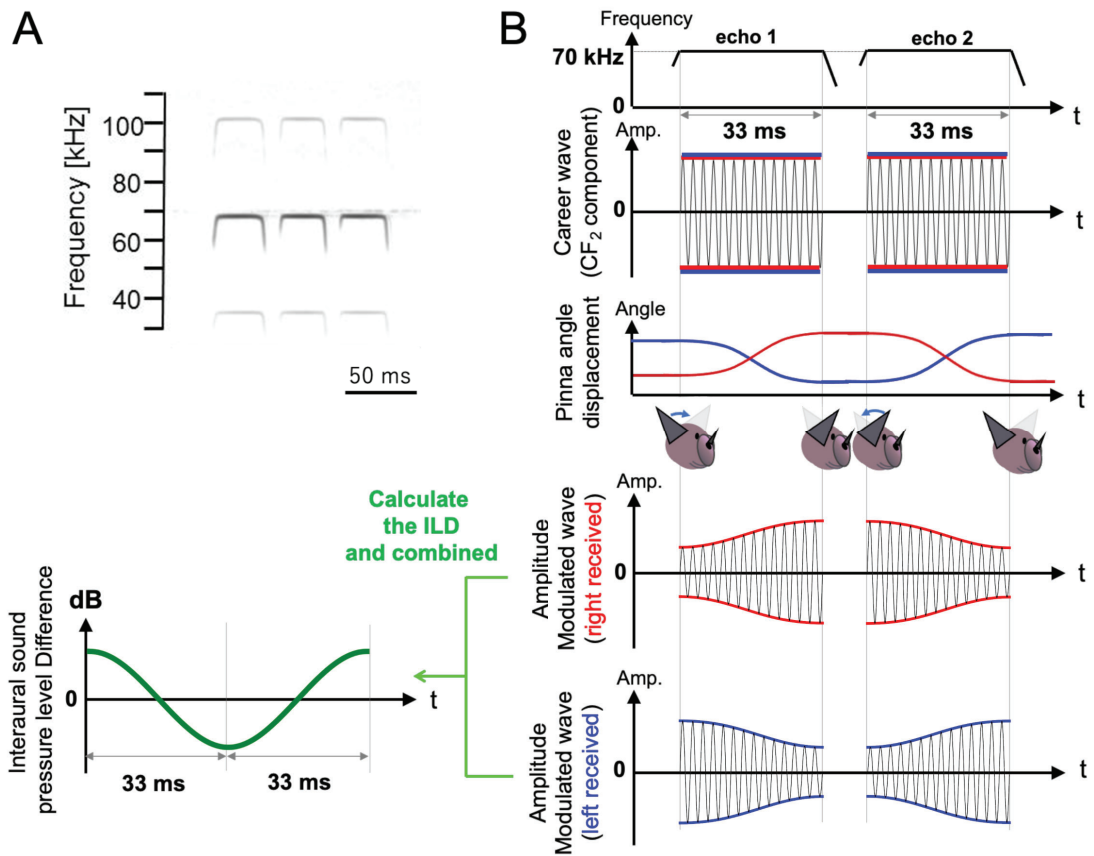


図 1: 発射されるパルスとエコーのパターン

- (A) キクガシラコウモリがエコーロケーション時に発するパルスの典型的な周波数構造。
 (B) 耳介運動によるエコー中の CF_2 成分の振幅変調の模式図。

2.2 モデル耳による方向定位

図 2A は、左右の耳とターゲット（定位対象）の位置関係の模式図である。ターゲットは方位角 θ と仰角 φ で図のように表される方向、すなわち、方向ベクトル $\mathbf{n} = (\cos \theta \cos \varphi, \sin \theta \cos \varphi, \sin \varphi)$ で表される方向にある。本モデルでは、エコーの振幅変調は、指向性を持つ各耳の向きが経時的に変化することにより起こる。図 2B は、左右の耳が、モデルコウモリの正面方向（ x 軸正の方向）に向いている場合の模式図である。指向性のある耳を構成するために、4 個の無指向性マイクロフォンを長方形の頂点に配置し、これらのマイクロフォンから得られる 4 つのエコー信号を合成して、1 つの耳の受信信号を生成した。特に、マイクの水平方向と垂直方向の間隔 (δ_y および δ_z) を調整することで、耳の指向性を制御することができる。図 2C は、本研究で用いた耳の指向性パターンを示している。*Pteronotus parnellii*[21][22]、*Hipposideros pratti*[34]、*Rhinolophus Rouxi*[21] などの CF-FM コウモリの耳の指向性パターンの測定値や計算結果を参考にすると、半値角（最大感度角に対する受信感度が-6dB となる角度）は、水平方向で 40° から 90° に分布する傾向がある。また、指向性パターンは、roll 回転に関して対称でないパターンを形成する。これらの特性を踏まえ、 δ_y 、 δ_z は、エコーの波長 λ の半分よりもわずかに小さくなるよう設定した。その結果、図 2C に示すように、非対称なパターンが生成された。

図 2D に示すように、モデル耳は $(\mathbf{n}_{\text{roll}}, \mathbf{n}_{\text{pitch}}, \mathbf{n}_{\text{yaw}})$ まわりに回転する。

いま、原点にある音源から発射された音波が方向ベクトル $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ で表される方向にあるターゲットに到達し、各マイクでエコーが観測されるとき音波について考える。原点からターゲットまでの距離 r が、耳の水平・垂直方向のマイク間距離 δ_y 、 δ_z や両耳間距離 d より十分に大きい、すなわち、 δ_y 、 δ_z 、 $d \ll r$ を仮定する。原点において観測されたエコーが、振幅 A 、パルスの振動数 f を用いて、 $s(t) = A \sin 2\pi f t$ と表されるとする。いま、左右 4 個ずつ、計 8 個のマイクの位置は $\mathbf{r}_{\pm\pm}^l = \left(0, \frac{d \pm \delta_y}{2}, \pm \frac{\delta_z}{2}\right)$ 、 $\mathbf{r}_{\pm\pm}^r = \left(0, \frac{-d \pm \delta_y}{2}, \pm \frac{\delta_z}{2}\right)$ と表される。いま、ターゲットから左耳の各マイクまでの距離 $d_{\pm\pm}^l$ を考えると

$$\begin{aligned}
d_{\pm\pm}^l &= \|r(n_x, n_y, n_z) - \mathbf{r}_{\pm\pm}^l\| \\
&= \sqrt{r^2 n_x^2 + \left(rn_y - \frac{d \pm \delta_y}{2}\right)^2 + \left(rn_z \mp \frac{\delta_z}{2}\right)^2} \\
&\sim r \sqrt{n_x^2 + n_y^2 - \frac{n_y(d \pm \delta_y)}{r} + n_z^2 \mp \frac{n_z \delta_z}{r}} \\
&= r \sqrt{1 - \frac{n_y(d \pm \delta_y) \pm n_z \delta_z}{r}} \\
&\sim r \left(1 - \frac{n_y(d \pm \delta_y) \pm n_z \delta_z}{2r}\right) \\
&= r - \left(\frac{n_y d}{2} \pm \frac{n_y \delta_y}{2} \pm \frac{n_z \delta_z}{2}\right)
\end{aligned}$$

従って、 $d_{\pm\pm}^l$ から、ターゲットから原点までの距離 r を引いて音速 c で割った

$$\Delta t_{\pm\pm}^l = (d_{\pm\pm}^l - r)/c = -\left(\frac{n_y d}{2} \pm \frac{n_y \delta_y}{2} \pm \frac{n_z \delta_z}{2}\right)/c \quad (1)$$

は、原点での観測に対する各マイクへの音波到達の時間遅れを表す。従って、左耳が観測する音波は、4個のマイクの信号を足し合わせて、

$$s^l(t) = s(t - \Delta t_{++}^l) + s(t - \Delta t_{+-}^l) + s(t - \Delta t_{-+}^l) + s(t - \Delta t_{--}^l) \quad (2)$$

これを、和積公式等を用いて整理すると、

$$\begin{aligned}
s^l(t) &= \{s(t - \Delta t_{++}^l) + s(t - \Delta t_{+-}^l)\} + \{s(t - \Delta t_{-+}^l) + s(t - \Delta t_{--}^l)\} \\
&= 2A \cos \frac{\pi n_z \delta_z}{\lambda} \sin \left(2\pi f t + \frac{\pi n_y (d + \delta_y)}{\lambda}\right) \\
&\quad + 2A \cos \frac{\pi n_z \delta_z}{\lambda} \sin \left(2\pi f t + \frac{\pi n_y (d - \delta_y)}{\lambda}\right) \\
&= 4A \cos \frac{\pi n_y \delta_y}{\lambda} \cos \frac{\pi n_z \delta_z}{\lambda} \sin 2\pi f \left(t + \frac{\pi n_y d}{2c}\right)
\end{aligned} \quad (3)$$

と書ける。右耳も同様に

$$s^r(t) = 4A \cos \frac{\pi n_y \delta_y}{\lambda} \cos \frac{\pi n_z \delta_z}{\lambda} \sin 2\pi f \left(t - \frac{\pi n_y d}{2c}\right) \quad (4)$$

と計算できる。これらは、観測信号の低周波成分(エンベロープ)が $4A \cos \frac{\pi n_y \delta_y}{\lambda} \cos \frac{\pi n_z \delta_z}{\lambda}$ であり、高周波成分が $\sin 2\pi f \left(t \pm \frac{\pi n_y d}{2c}\right)$ であることを表す。また、 $n_y \leq 1$, $n_z \leq 1$ であ

り、 $\delta_y < \lambda/2$, $\delta_z < \lambda/2$ と設定してあるから、式中の低周波成分を表す部分は常に正であることに注意する。ここで、 d は高周波成分にのみ影響を与えている。すなわち、高周波成分における位相のずれにのみ影響を与えている。従って、高周波成分の位相について考えない場合、耳の中心が原点にあると考えても差し支えない。

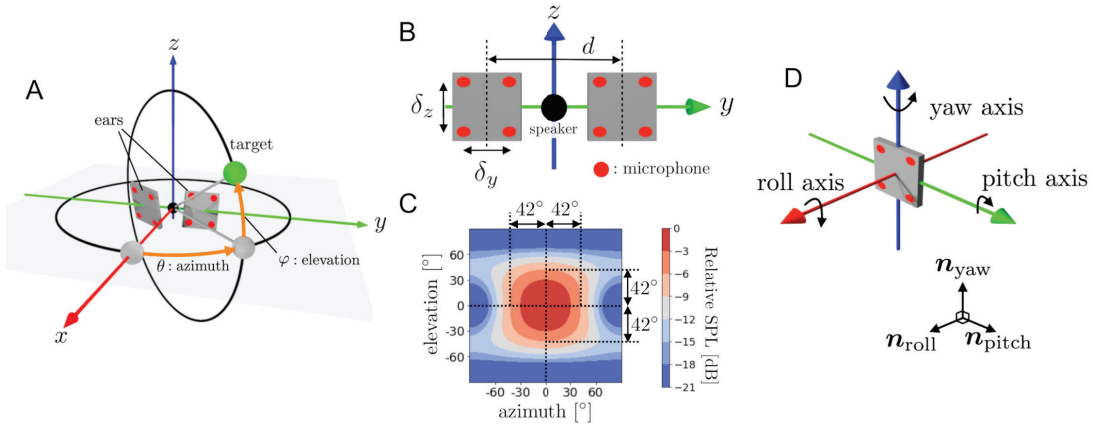


図 2: モデルの模式図

(A) 定位対象の方向。方位角 θ と仰角 φ を用いて図のように定義する。(B) 耳の設定とその位置。両耳はそれぞれが 4 個の無指向性マイクで構成されていて、 δ_y , δ_z は、それぞれ各マイクの水平方向と垂直方向の間隔を表す。また、 d は両耳の間隔を表す。(C) 耳の指向性パターン。(D) 耳の回転を表す 3 軸 (roll, pitch, yaw) と、それに対応する正規直交基底 (\mathbf{n}_{roll} , $\mathbf{n}_{\text{pitch}}$, \mathbf{n}_{yaw})

次に、耳の 3 次元空間内での姿勢について考える。原点にある耳について、3 軸の回転によってその姿勢が定まるので、その姿勢 L は、 $SO(3)$ の元として

$$L = R_z(\theta_e)R_y(-\varphi_e)R_x(-\psi_e) \quad (5)$$

表される。このとき、 $L^{-1} = L^T$ で空間全体を回転させると、正面を向いている耳に対して、ターゲットが $\tilde{\mathbf{n}} := L^T \mathbf{n} = (\tilde{n}_x, \tilde{n}_y, \tilde{n}_z)$ の方向にあることと同一視できる。いま、モデル耳が経時的に向きを変えることを考えるので、 $\tilde{\mathbf{n}}(t) = L^T(t) \mathbf{n} = (\tilde{n}_x(t), \tilde{n}_y(t), \tilde{n}_z(t))$

と書ける。これらを左右それぞれの耳について計算する、すなわち

$$\begin{aligned} L^l(t) &= R_z(\theta_e^l(t))R_y(-\varphi_e^l(t))R_x(-\psi_e^l(t)) \\ \tilde{\mathbf{n}}^l(t) &= (L^l(t))^T \mathbf{n} = (\tilde{n}_x^l(t), \tilde{n}_y^l(t), \tilde{n}_z^l(t)) \\ L^r(t) &= R_z(\theta_e^r(t))R_y(-\varphi_e^r(t))R_x(-\psi_e^r(t)) \\ \tilde{\mathbf{n}}^r(t) &= (L^r(t))^T \mathbf{n} = (\tilde{n}_x^r(t), \tilde{n}_y^r(t), \tilde{n}_z^r(t)) \end{aligned}$$

以上より、モデル耳を用いるコウモリが最終的に受け取る ILD の経時的変化のエンベロープ $P(t; \mathbf{n})$ は

$$S_{\text{env}}^l(t) = 4A \cos \frac{\pi \tilde{n}_y^l(t) \delta_y}{\lambda} \cos \frac{\pi \tilde{n}_z^l(t) \delta_z}{\lambda} \quad (6)$$

$$S_{\text{env}}^r(t) = 4A \cos \frac{\pi \tilde{n}_y^r(t) \delta_y}{\lambda} \cos \frac{\pi \tilde{n}_z^r(t) \delta_z}{\lambda} \quad (7)$$

を用いて

$$P(t; \mathbf{n}) = 20 \log_{10} \left| \frac{S_{\text{env}}^l(t; \mathbf{n})}{S_{\text{env}}^r(t; \mathbf{n})} \right| \quad (8)$$

と書ける。これが、モデル耳が受け取ることのできる情報である。この $P(t; \mathbf{n})$ をもとに、各障害物の方向 \mathbf{n} を推定することができるようなモデル耳の動かし方 $\psi_e, \varphi_e, \theta_e$ を求めることが目標である。

2.3 評価関数と単射度

モデル耳の左右の動きを評価するために、本研究では評価関数・単射度という指標を導入した。

2.3.1 観測に関する一般論

観測対象のとりうる状態の集合を U 、観測によって得られるデータが属する集合を V とし、観測を表す写像を

$$f: U \rightarrow V$$

とおく。ここで、観測によって求めたい状態変数の集合を X として、

$$p: U \rightarrow X$$

を、状態に対し注目する状態変数の値を対応させる写像とする。同値関係 \sim^p を

$$u_1 \sim^p u_2 \stackrel{\text{def}}{\iff} p(u_1) = p(u_2)$$

で定義すると、

$$\begin{array}{ccc} \tilde{p}: U / \sim^p & \longrightarrow & X \\ \Downarrow & & \Downarrow \\ [u] & \longmapsto & p(u) \end{array}$$

が定義でき、これは単射である（要するに、注目する状態変数が同じ状態は同一視するということ）。さらに、 p が全射であるならば \tilde{p} は全単射になり、 U / \sim^p は X と同一視することができる。以下ではこのような場合を考える。

(例 0) : $U = \mathbb{R}^3 \setminus \{0\}$, $X = S^2$ として $p: \mathbf{r} \mapsto \mathbf{r}/\|\mathbf{r}\|$ と定義すると、 $U / \sim^p \simeq X$ である。これは、状態としては位置情報を考えるが、距離は無視して方位だけに注目するという他にない。 X として S^2 の部分集合をとりたい場合は、 $U = p^{-1}(X)$ ととり直せば p の全射性は保証される。

ここでもし、 $q: V \rightarrow Y$ で

$$u_1 \sim^p u_2 \implies f(u_1) \sim^q f(u_2) \tag{9}$$

を、満たすような q, Y があるならば (\sim^q の定義は \sim^p と同様)、写像 \tilde{f} を次のように定義することができる。

$$\begin{array}{ccc} \tilde{f}: U / \sim^p & \longrightarrow & V / \sim^q \\ & & \Downarrow \\ & & [f(u)] \end{array}$$

ここでも $\tilde{q}: V / \sim^q \rightarrow Y$ は単射であるので、 V / \sim^q は $\tilde{q}(V / \sim^q) = q(V)$ と同一視できる。 U / \sim^p を X と同一視し、 V / \sim^q を Y の部分集合 $q(V)$ と同一視することで \tilde{f} は X から Y への写像とみなせる。これをあらためて

$$F: X \rightarrow Y$$

と書くことにしよう。

ここで述べた写像 f, q の存在は、観測データから注目している状態変数にのみ依存する変量が生成できることを意味している。

注：もちろん極端な例を挙げれば、 q を定数関数にすれば V 自体が一つの同値類になるので、条件を満たす q は常に存在するが、それがナンセンスであることは明らかである。当然 q によって生成される変量は、注目している状態変数の情報を十分に含んだ変量でなければならない。

例 1：スピードガンによる球速の計測

スピードガンによる球速の計測においては、球速の集合が X 、スピードガンの受信波の周波数の集合が Y にあたる。電磁波を球道の正面から照射し、反射波のドップラー効果によってボールの速度を知る。ボールの状態を表す変数として、速度以外にも位置、加速度、大きさ、質量、温度などがあり、反射波には振動数以外にも振幅や位相という属性もある。 f をボールの状態に対し、反射波を対応させる写像と考えれば、この場合、 p は速度を取り出す写像、 q は振動数を取り出す写像となる。ここで重要なことは仮定 (9) が成り立つかどうかということであるが、反射波の振動数は速度以外の状態変数にはよらないと考えられるので、この仮定は満たされていると考えてよい。測定器は固定されているとすれば、球速 v に対し観測される振動数は

$$F(v) = f_0 \frac{c+v}{c-v}$$

ただし f_0 は発射波の振動数、 c は光速で、観測器はキャッチャー後方にあるとしている。

例 2：左右のモデル耳を固定して対象物からの反射音を聴くという場合を考え、このとき両耳に届く反射音の振幅のペアを観測値とする。すなわち $V = \mathbb{R}_+^2$ で

$$\begin{aligned} F : U &\longrightarrow V \\ \mathbf{r} &\longmapsto (a^l, a^r) \end{aligned}$$

このとき $Y = \mathbb{R}_+$ として $q: V \rightarrow Y$ を

$$q: (a^l, a^r) \mapsto a^l/a^r$$

と定義する。 $a^l = 4A \cos \frac{\pi \tilde{n}_y^l \delta_y}{\lambda} \cos \frac{\pi \tilde{n}_z^l \delta_z}{\lambda}$, $a^r = 4A \cos \frac{\pi \tilde{n}_y^r \delta_y}{\lambda} \cos \frac{\pi \tilde{n}_z^r \delta_z}{\lambda}$ であり、モデル耳から見た対象物の方位以外の要因（発射パルスの音量、対象物までの距離、対象物の反射率など）の影響は A に含まれるので、 a^l/a^r は対象物の方位のみによって決まる関数になると考えてよい。すなわち $u_1 \stackrel{p}{\sim} u_2 \implies f(u_1) \stackrel{q}{\sim} f(u_2)$ が成立する。よって、上述の U, X, p と組み合わせて $F: X \rightarrow Y$ が定義できる。

例 3：左右のモデル耳を独立して動かして対象物からの反射音を聴くという場合を考え、このとき両耳に届く反射音の振幅 (envelope) のペアを観測値とする。このとき $V = C([0, T])_+^2$, $Y = C([0, T])_+$ として (ただし $C([0, T])_+$ は区間 $[0, T]$ 上の正值連続関数のなす空間)

$$q: (S_{\text{env}}^l, S_{\text{env}}^r) \mapsto S_{\text{env}}^l/S_{\text{env}}^r$$

と定義すると、これは上述の議論より、左右のモデル耳の運動（姿勢履歴）のみによって決まる写像になるので、 U, X, p と組み合わせて $F: X \rightarrow Y$ が定義できる。

さらに、適当な単調増加関数 $g: \mathbb{R}_+ \rightarrow \mathbb{R}$ に対して、

$$q: (S_{\text{env}}^l, S_{\text{env}}^r) \mapsto g(S_{\text{env}}^l/S_{\text{env}}^r)$$

と定義した場合、 $Y = C([0, T])$ として $F: X \rightarrow Y$ が定義できる。以下の議論では $g(\xi) = 20 \log_{10} \xi$ を採用する。

観測データから q により生成された変量を用いて、注目する状態変数を同定するのは、写像 $F: X \rightarrow Y$ の逆写像 $F^{-1}: F(X) \rightarrow X$ を求めることに他ならない。そのためには F が単射であることが必要である。

前述の例 1 では、明らかに F は単射であり、反射波の振動数 f から球速が同定される。

$$F^{-1}(f) = \frac{f - f_0}{f + f_0} c$$

例 2 は確かに F は構築されるが U が 2 次元集合、 V が 1 次元集合であることを考えると、 F は単射でないと考えられる。すなわち、この観測では方位は同定できないということである。

例 3 では V の次元は無限であり、 F が単射となることが期待される。しかし当然のことであるが、左右の指向性マイクの姿勢履歴が同じであれば、 $F(X)$ は一点になるので当然単射ではあり得ない。とすると、左右の指向性マイクにどのような姿勢履歴を持たせれば F が単射になるかということが問題となる。

一般論に戻ると、実際のプロセスにおいては単射性だけでなく、計測の誤差に対する結果のロバスト性が必要である。これは F^{-1} が変数の変化に対し鋭敏すぎてはならないということに他ならない。これは、順方向の写像 F に関して言えば、変数の変化に対する値の変化が鈍感すぎてはならないということである。これらを踏まえて、次のような関数と指標を考える。

定義： d_X, d_Y をそれぞれ X, Y で定義された距離関数とすると、単射指標関数（評価関数） $U_F(x)$ ($x \in X$) を次式で定義する。

$$U_F(x) := \sup_{x' \in X - \{x\}} \frac{d_X(x, x')}{d_Y(F(x), F(x'))} \quad (10)$$

もし $x \in X$ において F の単射性が破れているならば、すなわち $F(x') = F(x)$ となるような $x' \neq x$ が存在するならば、 $U_F(x) = +\infty$ となることは明らかである。さらに、 $U_F(x)$ は x における写像 F の縮退度を定量化している。 F が x において真に縮退しているとき（すなわち x における F の接写像の像の次元が X の次元より真に小さい）、 $U_F(x) = +\infty$ となる。縮退しないまでも、かなり縮退に近いような場合は $U_F(x)$ は大きな値をとることになる。

定義： 写像 $F : X \rightarrow Y$ の単射度 $I[F]$ を次式で定義する。

$$I[F] := \left(\int_{x \in X} U_F(x) dx \right)^{-1} \quad (11)$$

ここで X は通常、有限次元ユークリッド空間の部分集合であるので、積分可能性を仮定している。実際、本研究における $I[F]$ の計算過程においては

$$U_F^*(x) = \min\{U_F(x), R\} \quad (R > 0 \text{ は定数}) \quad (12)$$

を $U_F(x)$ の代わりに用いることで、被積分関数が有界となるから、リーマン可積分である。本研究において、具体的な $I[F]$ の値を用いるときは U_F^* で導出したものを $I[F]$ の値として用いる。

$I[F]$ に関する簡単な例として $F : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ として幾つか考える。

- $F(x) = x$

$U_F(x) \equiv 1$ である。したがって、 $I[F] = 1/2$ である。

- $F(x) = x^2$

明らかに任意の点 $x \neq 0$ で単射性が破れているので $U_F(x) = +\infty$ である。また $x = 0$ においては $U_F(0) = \sup_{x \neq 0} \frac{|x|}{|x^2|} = +\infty$ である。この例では $U_F(x) \equiv +\infty$ である。したがって、 $I[F] = 0$ である。

- $F(x) = x^3$

この関数は単射であり、逆関数 $F^{-1}(y) = y^{\frac{1}{3}}$ が存在する。 $x \neq 0$ に対しては $\frac{|x'-x|}{|x'^3-x^3|} = (x'^2 + x'x + x^2)^{-1} = \left(\left(x' + \frac{x}{2}\right)^2 + \frac{3}{4}x^2 \right)^{-1}$ より、 $U_F(x) = \frac{4}{3x^2}$ である。 $U_F(0) = \sup_{x \neq 0} \frac{|x|}{|x^3|} = +\infty$ である。このことは $F(0) = 0$ の近傍において F^{-1} が誤差に対し非常に鋭敏であることを示している。前例同様、 $x = 0$ においては、単射性は破れていないものの微分が 0 であることから、真に縮退が起きているということである。単射度に関しても、前例同様 $I[F] = 0$ である。

- $F(x) = \epsilon x \quad (0 < \epsilon \ll 1)$

この関数は単射であり、逆関数 $F^{-1}(y) = \frac{y}{\epsilon}$ が存在する。さらに、 $U_F(x) = \frac{1}{\epsilon} > 0$ は $0 < \epsilon \ll 1$ の仮定より、非常に大きな値をとる。これは前例同様、この F が誤

差に対し非常に鋭敏であることを示している。これは、 $0 < \epsilon \ll 1$ の条件下では、 F が大域的にほとんど縮退しているということである。また、 $I[F] = \epsilon/2$ である。これは正の値だが、非常に小さな値である。

2.3.2 本研究における設定

本研究では、エコーのILDの時系列データをもとに、ターゲットの方向を定位することを目標とする。従って、状態空間 X は単位球面 S^2 の部分集合として

$$X = \{\mathbf{n} = (\cos \theta \cos \varphi, \sin \theta \cos \varphi, \sin \varphi) \in S^2; |\theta| < \theta_{\max}, |\varphi| < \varphi_{\max}\} \quad (13)$$

と定義する。また、 X 上の距離関数 d_X は、 \mathbb{R}^3 内の通常距離 (2-norm) であるとする。また、観測データ空間 Y は、ILD (実数) の経時変化であるから、 $Y = C^0([0, T])$ と書ける。 T は耳介の動きの1周期分の時間とする。この Y において、距離関数 d_Y は sup-norm とする。すなわち、 $f_1, f_2 \in Y$ に対して

$$d_Y(f_1, f_2) = \|f_1(t) - f_2(t)\|_\infty = \sup_{t \in [0, T]} |f_1(t) - f_2(t)| \quad (14)$$

である。いま、観測 F は、左右のモデル耳の姿勢変化によって決まる。それは、周期 T を持つ2つの $SO(3)$ 値関数 $L^l(t), L^r(t)$ で表される。このペアを $M = (L^l(t), L^r(t))$ とし、姿勢変化によって得られるILD信号を $P_M(t; \mathbf{n})$ と表記する。観測について、同じ記号 M を用いて $M : X \rightarrow Y$ を

$$M : \mathbf{n} \mapsto P_M(\cdot; \mathbf{n}) \quad (15)$$

と定義する。

いま、 $P_M(\cdot; \mathbf{n})$ は左右の音圧レベルの差の時系列変化であり、これはターゲットの材質やターゲットまでの距離等による影響を吸収すると考えられることから、観測 M は \mathbf{n} を $P_M(\cdot; \mathbf{n})$ に移す写像として定義できることを確認しておく。

以上より (10) 式の評価関数は

$$U_M(\mathbf{n}) = \sup_{\mathbf{n}' \in X \setminus \{\mathbf{n}\}} \frac{\|\mathbf{n} - \mathbf{n}'\|_2}{\|P_M(\cdot; \mathbf{n}) - P_M(\cdot; \mathbf{n}')\|_\infty} \quad (16)$$

と書くことができ、これを用いて、単射度を

$$I[M] = \left(\int_X U_M(\mathbf{n}) d\mathbf{n} \right)^{-1} = \left(\iint_X U_M(\theta, \varphi) \cos \varphi d\theta d\varphi \right)^{-1} \quad (17)$$

と定義する。これらの指標を用いて、様々なモデル耳の運動に対する観測 M の評価を行う。

2.4 機械学習による逆写像 M^{-1} の構築とその評価

前節の指標によるモデル耳運動の評価に加えて、教師あり機械学習を用いた定位学習も併せて行う。

教師あり機械学習は、解析的な逆写像の表現が困難な場合に、数値的に逆写像を構築するのに便利である。適切なモデル耳の運動を採用すれば、観測 M の逆写像を適切に構築できることを確認するために、全結合型のニューラルネットワークを用いた3次元方向検出のテストを行った。図3は、エコーの聴取からニューラルネットワークでの処理を経て、出力を行うまでの一連の流れを表した概略図である。ネットワークへの入力データは、モデル耳の運動とターゲットの角度ペア (θ, φ) から導出される離散化されたILDのデータであり、出力データはターゲットの角度ペアの推定結果 $(\theta_{\text{guess}}, \varphi_{\text{guess}})$ である。学習結果の評価指標として、学習誤差 $E[M]$ を以下で定義する。

$$E[M] = \max_{(\theta, \varphi) \in X} \{ |\theta - \theta_{\text{guess}}| + |\varphi - \varphi_{\text{guess}}| \} \quad (18)$$

学習においては、方位角 θ と仰角 φ は $\pm 60^\circ$ 以内に制限した。すなわち、 $X = \{ \mathbf{n} = (\cos \theta \cos \varphi, \sin \theta \cos \varphi, \sin \varphi) \in S^2; |\theta| \leq 60^\circ, |\varphi| \leq 60^\circ \}$ である。ニューラルネットワークによる学習は計5000ステップ実行し、最後の5%に当たる250ステップでは各ステップごとにテストケースによるテストを行った。テストケースは X を θ, φ それぞれについて約 5.45° ごとに分割した 23×23 点とし、それぞれの学習誤差を評価した。これは X を 22×22 に (角度の大きさの点で) 等分割する際にできる格子点に相当する。これら250ステップのテスト結果を集計し、その出力データの中央値をその学習における $(\theta_{\text{guess}}, \varphi_{\text{guess}})$ の最終的な出力とした。上記の学習誤差 $E[M]$ の計算には、この出力を用いた。

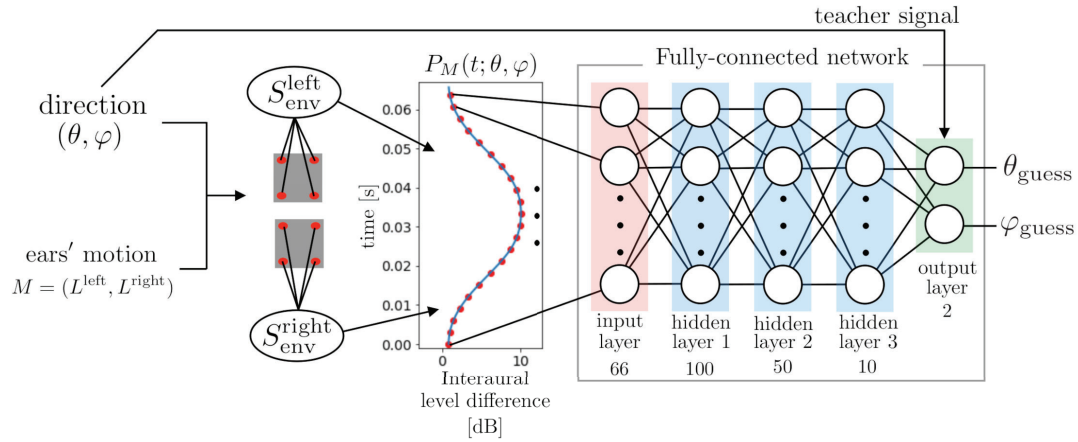


図 3: 教師あり学習の流れの模式図

ILD の信号は、モデル耳の運動を定めると各 $(\theta, \varphi) \in X$ について計算できる。これを 1 ミリ秒の時間間隔で離散化し、ニューラルネットワークの入力層に渡す。ニューラルネットワークでは、隠れ層 1,2,3 で活性化関数として ReLU を、出力に対しては平均二乗誤差を誤差関数として用いた。

このような設定で学習を行うことで、 M の逆写像の構成を試みるが、 M が単射でない場合には誤った定位結果を学習結果として出力する。いま、この誤った定位結果の出力先について考えると、誤差関数が二乗和誤差であることから、学習ステップで X 内の点が一様に学習されると仮定すると

$$P_M(\cdot; \theta, \varphi) \rightarrow \text{average of } \{(\theta', \varphi') \in X; P_M(\cdot; \theta', \varphi') = P_M(\cdot; \theta, \varphi)\} \quad (19)$$

となる。ここでの "average" は、同じ観測信号を検出する点すべての点の $\theta - \varphi$ 平面上の重心を表す。

2.5 モデル耳の動かし方

まず、モデル耳の姿勢の決定方法について述べる。 $SO(3)$ の元の表現には、様々な方法があるが、本研究では次のような順序での回転の合成として表す。

- (1) Yaw 軸まわりの θ_e 回転
- (2) Pitch 軸まわりの $-\varphi_e$ 回転 (正の角度で「仰角」となるよう、正負反転)

(3) Roll 軸まわりの $-\psi_e$ 回転（正の角度で外側に傾くよう、正負反転）

従って、 α 軸まわりの ζ の回転を表す行列を $R_\alpha(\zeta)$ と書くとする、

$$L = R_z(\theta_e)R_y(-\varphi_e)R_x(-\psi_e) \quad (20)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ 0 & \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_e & 0 & -\sin \varphi_e \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_e & 0 & \cos \varphi_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \psi_e & \sin \psi_e & 0 \\ -\sin \psi_e & \cos \psi_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (21)$$

と書ける。いま、 $\psi_e^l, \psi_e^r, \varphi_e^l, \varphi_e^r, \theta_e^l, \theta_e^r$ を、周期 T の周期関数とする。このとき、左右のモデル耳の姿勢は

$$L^l(t) = R_z(\theta_e^l(t))R_y(-\varphi_e^l(t))R_x(-\psi_e^l(t)) \quad (22)$$

$$L^r(t) = R_z(\theta_e^r(t))R_y(-\varphi_e^r(t))R_x(-\psi_e^r(t)) \quad (23)$$

と書ける。本研究のモデルにおいては、実際のコウモリの耳介が複雑な動きを見せない [24][23] ため、耳の動きの関数は定数と基本周期 T （振動数 $f_e = T^{-1}$ ）の周期関数の和として表されると仮定する。

いま、モデル耳の動かし方を、表 1 に示す左右の耳の角度の関係の組で定義する。この

表 1: 左右耳の角度関係 $(\psi_e^l, \psi_e^r), (\varphi_e^l, \varphi_e^r), (\theta_e^l, \theta_e^r)$

角度関係	左耳の角度関数	右耳の角度関数
0	0	0
$\overline{\text{CONST}}$	C	$-C$
SIN	$C \sin(2\pi f_e t)$	$C \sin(2\pi f_e t)$
$\overline{\text{SIN}}$	$C \sin(2\pi f_e t)$	$-C \sin(2\pi f_e t)$
COS	$C \cos(2\pi f_e t)$	$C \cos(2\pi f_e t)$
$\overline{\text{COS}}$	$C \cos(2\pi f_e t)$	$-C \cos(2\pi f_e t)$

モデル耳の動かし方から、モデル耳の運動 $M = (L^l(t), L^r(t))$ が決定する。これを前節までの評価指標によって評価する。

3 結果と考察

本章では、前章で定義したモデル耳の運動 M を評価関数 U_M 、単射度 $I[M]$ 、学習誤差 $E[M]$ を用いて評価を行う。

3.1 耳の動きによる方向定位の典型例

まず、耳の運動の有用性を見るために、耳の動きがある場合とない場合の2パターンを比較した。

図4に耳介運動のない $[\varphi_e : \mathbf{0}, \varphi_e : \overline{\text{CONST}}, \theta_e : \overline{\text{CONST}}]$ と、耳介運動のある $[\varphi_e : \mathbf{0}, \varphi_e : \overline{\text{COS}}, \theta_e : \overline{\text{CONST}}]$ の2パターンについて評価と学習の結果を示した。図4-A2,A3,B2,B3に示すように、評価関数 $U_M(\theta, \varphi)$ はニューラルネットワークによる検出誤差の分布を反映していることがわかる。単射度 $I[M]$ は、モデル耳が不動の場合は0.001未満、モデル耳が動く場合は0.24であった。また、学習誤差 $E[M]$ は不動の場合 109.4° 、動く場合は 16.9° であった。

定位結果が優秀であった例も図5に示す。これらの例におけるモデル耳の動かし方は、 $[\varphi_e : \overline{\text{SIN}}, \varphi_e : \overline{\text{COS}}, \theta_e : \overline{\text{CONST}}]$ および、 $[\varphi_e : \overline{\text{SIN}}, \varphi_e : \overline{\text{COS}}, \theta_e : \overline{\text{SIN}}]$ である。これらの例では、評価関数 U_M の値は大域的に小さく、単射度 $I[M]$ の値も、それぞれ1.52, 1.35であった。学習誤差もそれぞれ $2.1^\circ, 2.5^\circ$ と、高精度な定位を行うことができていた。これらの結果は、正確な3次元方向定位には、roll, pitch, yawの各軸の回転を適切に組み合わせることの必要性を示唆している。さらに、図4および図5の結果から、単射度が方向定位の性能に強く関係していることがわかる。

3.2 垂直角が $\overline{\text{COS}}$ であるときの結果

roll, pitch, yawの各軸の回転の適切な組み合わせを決定するために、いくつかのパターンについて学習を行う。まず、2.1節で述べたような実際のコウモリの耳介運動に基づき、pitch(φ_e)を $\overline{\text{COS}}$ に固定した36パターンの解析結果について、(i) モデル耳がILDを詳細に聞き分けられる場合、(ii) 観測誤差鋭敏性に対するロバスト性を見るために、モデル

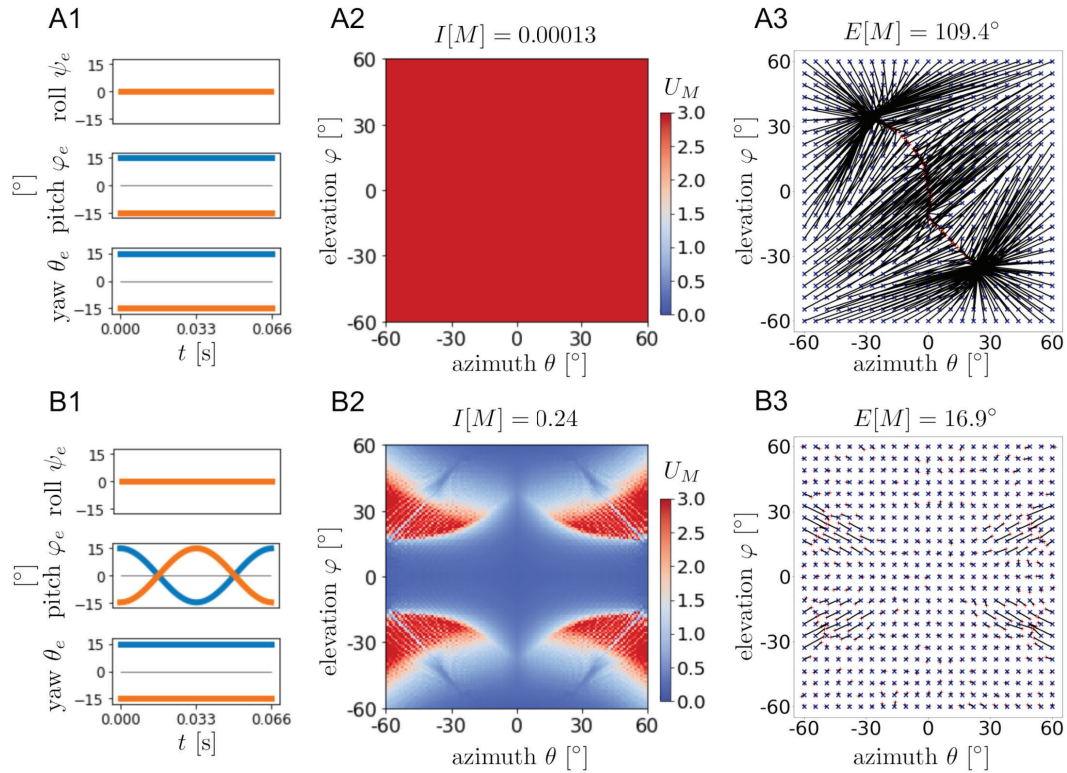


図 4: 耳介運動の有無による定位結果の例

A1,B1 はモデル耳の各軸の回転量を表す。A2,B2 は評価関数 $U_M(\theta, \varphi)$ のカラーマップと単射度 $I[M]$ の値。A3,B3 は教師あり学習の学習結果と学習誤差 $E[M]$ の値である。図中の青い \times 印は各テストデータ (θ, φ) を表し、赤い $+$ 印はそれぞれのテストデータに対する出力 $(\theta_{\text{guess}}, \varphi_{\text{guess}})$ を表す。黒い線は各 (θ, φ) と対応する $(\theta_{\text{guess}}, \varphi_{\text{guess}})$ を結んだ学習による結果の誤差である。

A は常に回転量が一定であり、モデル耳が動かない状態であるのに対し、B は Pitch を時間変化させている。

耳の ILD の聞き取り精度を下げた場合の 2 つに分けて述べる。

3.2.1 モデル耳が ILD を細かく聞き分けられる場合

図 6 は、pitch を $\overline{\text{COS}}$ に固定した場合の 36 パターンすべてにおける評価関数のカラーマップである。

モデル耳運動を図形的に分類するために、 ψ_e - φ_e - θ_e 空間における $(\psi_e^l(t), \varphi_e^l(t), \theta_e^l(t))$

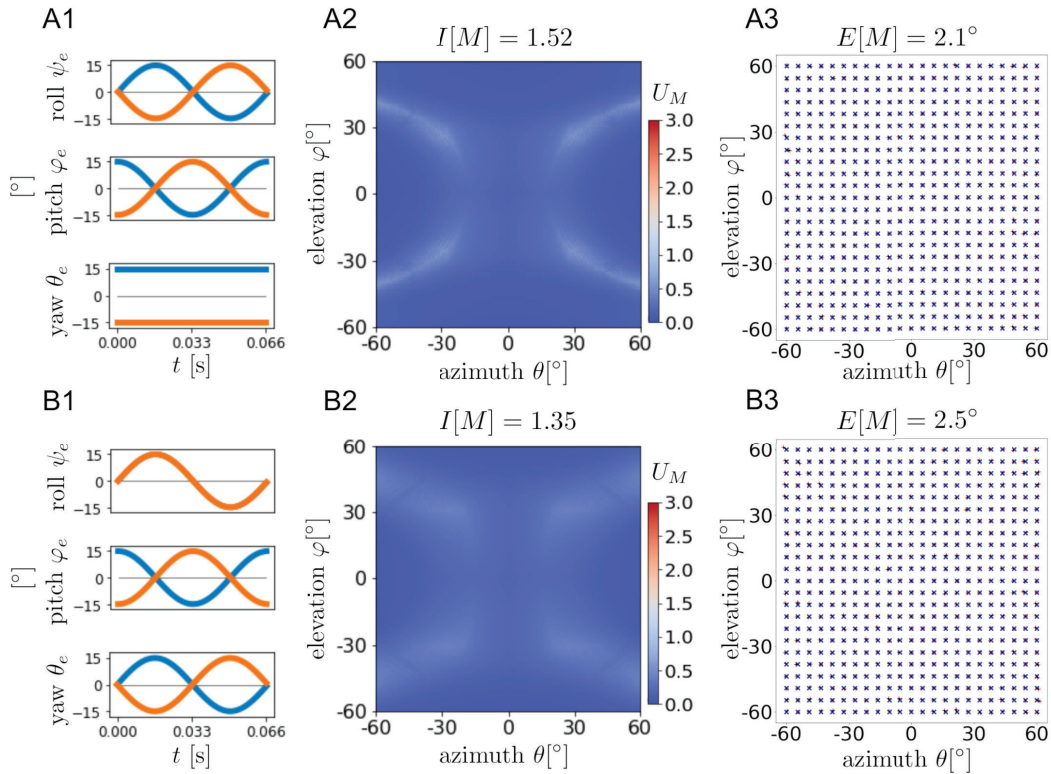


図 5: 高精度な定位を行ったモデル耳運動による学習結果の例

図の構成は図 4 と同じであるが、評価関数のカラーマップが全体的に青く、定位誤差において黒線がほとんど見えないことが、高精度な定位を行うことができたことを表している。

および $(\psi_e^r(t), \varphi_e^r(t), \theta_e^r(t))$ で与えられる回転角度関数の軌道に注目し、また、 $\psi_e - \varphi_e - \theta_e$ 空間における左右耳の軌道の和集合の凸包について考える。凸包の次元と各耳の軌道の次元の組み合わせによって、運動のパターン进行分类する。図 7 に示すように、次元のペアは、両耳の軌道の凸包-各耳の軌道の次元の組み合わせとして、3-2, 3-1, 2-2, 2-1, 1-1 の 5 パターンに分類される。

図 8 は、36 パターンの運動について、両耳軌道の和集合の凸包と各耳の軌道の次元ペア、単射度 $I[M]$ および学習誤差 $E[M]$ を示したものである。高精度な方向検出を実現した (青色で塗られた) パターンは 12 パターンあり、単射度が大きい (赤線で囲まれた) パ

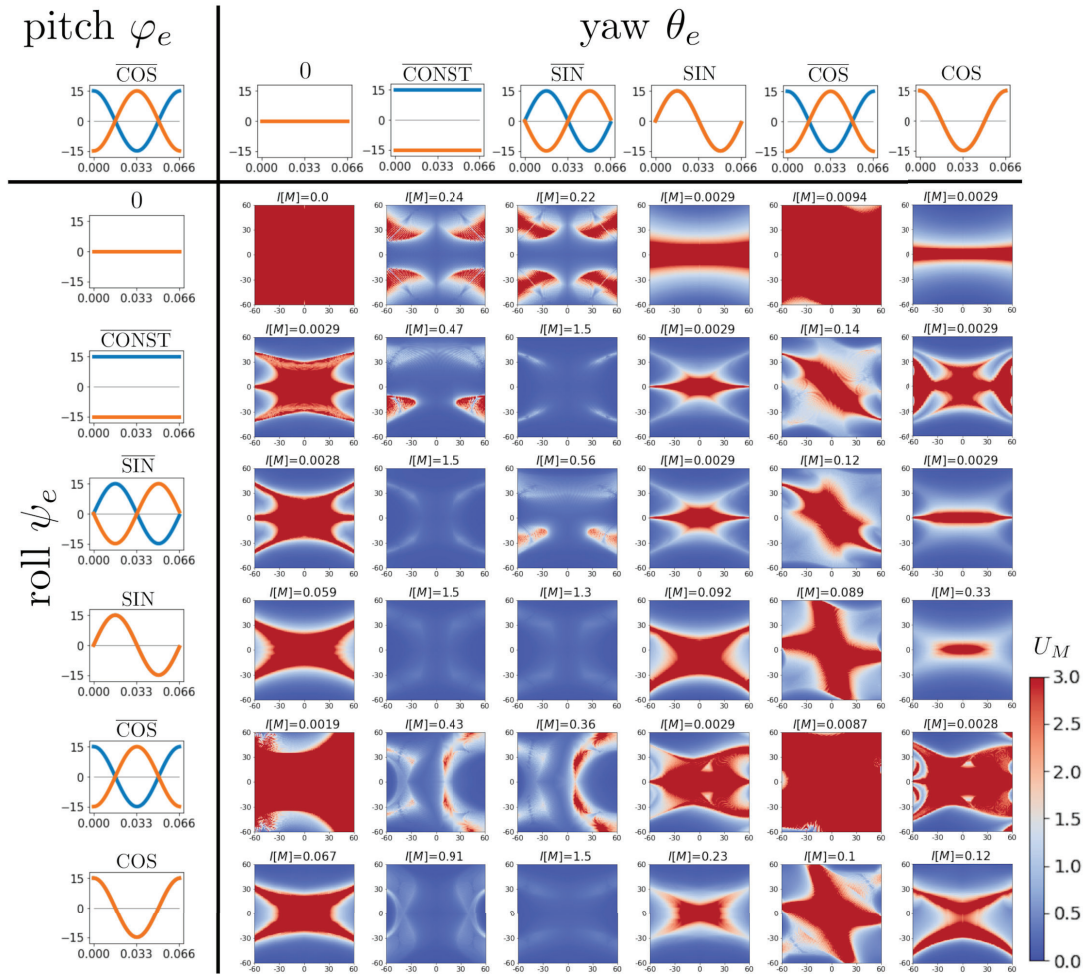


図 6: pitch が $\overline{\text{COS}}$ であるときの $U_M(\theta_e, \psi_e)$ のカラーマップと単射度

pitch(φ_e) の関数として $\overline{\text{COS}}$ を選んだとき、roll, pitch(ψ_e, θ_e) の角度の関数それぞれに対する評価関数のカラーマップと単射度の値。青線と橙線はそれぞれ左耳と右耳の回転角度の時間変化を表す。

ターンは 5 パターンあった。単射度が大きいパターンはすべて方向検出の精度が高いことがわかる。次の節で示すように、これらの単射度の高いパターンは本質的に良い運動のパターンである。

いま、これらの「良い運動」が満たすべき条件を分析したところ、これら 5 パターンを抽出するための 3 つの条件が分かった。

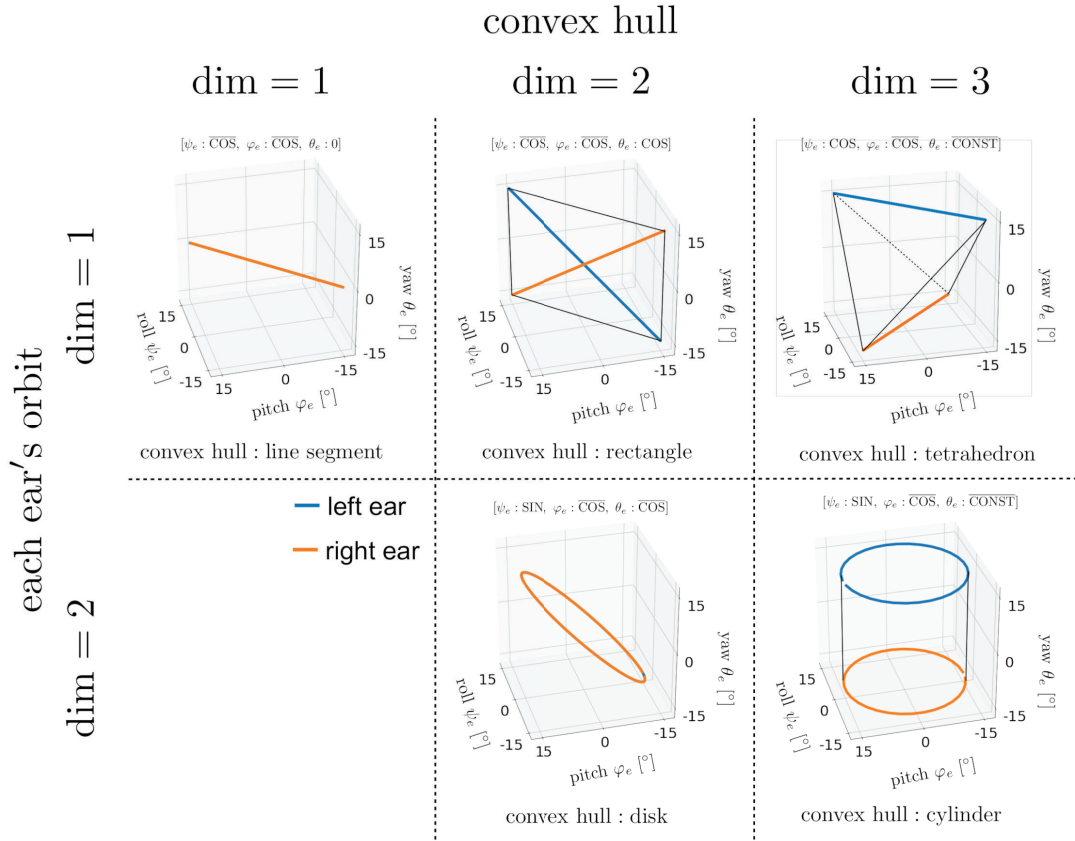


図 7: 両耳軌道の和集合の凸包と各耳の軌道の次元ペア 5 パターン

青線は左耳の軌道 $(\psi_e^l(t), \varphi_e^l(t), \theta_e^l(t))$ 、橙線は右耳の軌道 $(\psi_e^r(t), \varphi_e^r(t), \theta_e^r(t))$ を表す。両耳の軌道が一致する場合は橙線の軌道が表示されている。また、両耳軌道の和集合の凸包がなす図形も黒い補助線を用いて示している。

- (i) 両耳軌道の和集合の凸包が 3 次元である。
- (ii) 各耳の軌道が 2 次元である。
- (iii) 両耳の $\text{yaw}(\theta_e)$ が同位相でない。

3.2.2 観測誤差鋭敏性に対するロバスト性の評価

観測誤差に対する鋭敏性の評価を行うために、ILD の分解能を劣化させることを考える。

図 9A は、ILD の分解能が劣化していない場合の 36 パターンの耳介運動について、単

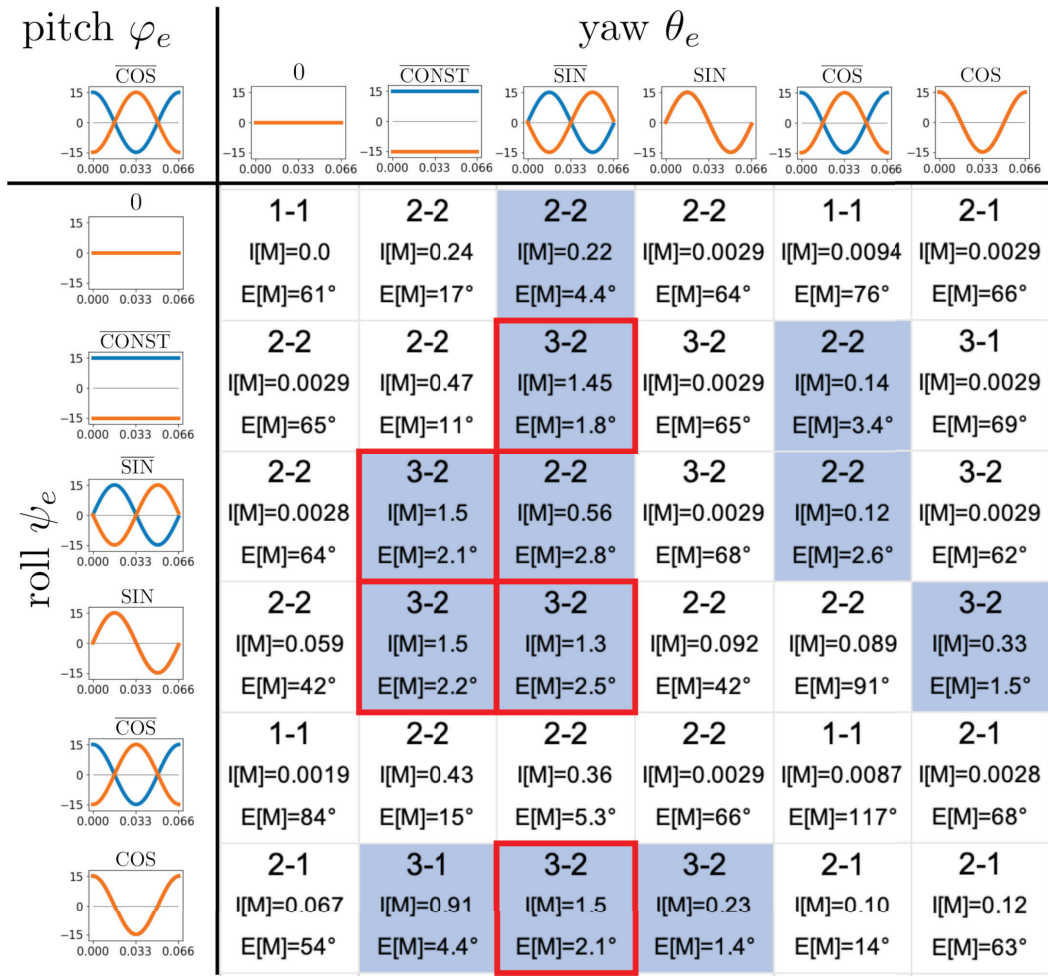


図 8: 36 パターンの次元ペア・単射度・学習誤差

各セルには、上段に両耳軌道の和集合の凸包と各耳の軌道の次元ペア、中段に単射度、下段に学習誤差を示している。各運動のうち、青で塗られたセルは高精度な学習が行えたこと ($E[M] < 5^\circ$) を表し、赤線で囲まれたセルは単射度が大きい ($I[M] > 1$) ことを表す。

射度と学習誤差の関係を示したものである。図 8 をもとに導出した 3 条件を満たす運動では、図のように単射度が相対的に大きく、学習誤差も小さくなっている。また、単射度は大きくないものでも、学習誤差が小さい例もいくつか見られる。これらの違いについて見るために、学習誤差が比較的小さい ($E[M] < 20^\circ$) のものについて、図 9B に示すように、ILD 分解能を 1dB と 3dB に劣化させ、入力信号を離散化して教師あり学習を行った。そ

の結果が図 9C である。図のように単射度が大きいパターン ($I[M] > 1$) では学習誤差が小さいままであったのに対して、他のパターンでは学習誤差が大きく増加した。この結果から、 $I[M] > 1$ を満たす 5 つの運動は、正確な方向検出が可能であるだけでなく、ILD 分解能の低下に対してロバストであることが示唆された。これらの結果と図 8 から、上述の 3 条件は、少なくとも耳介運動の垂直角が $\overline{\text{COS}}$ であるときの 36 パターンについては、確かに正確でロバストな方向検出を可能にする 3 つの耳の運動の条件であることが分かった。

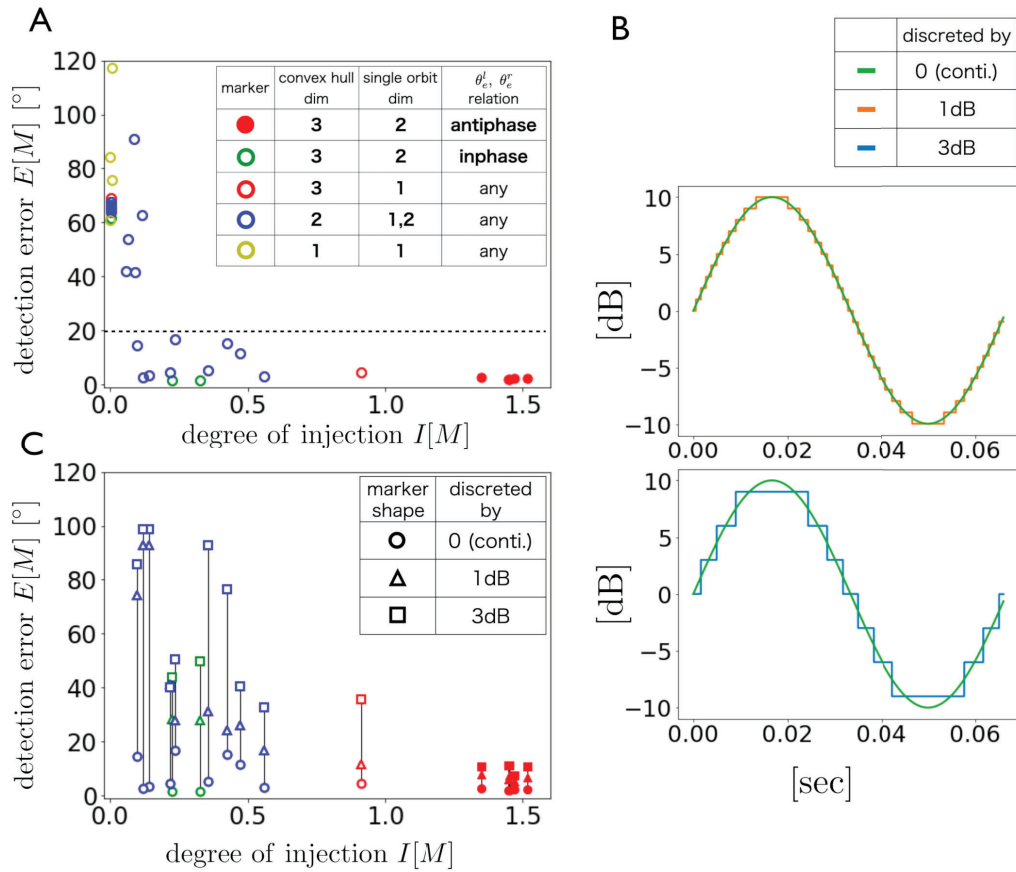


図 9: ILD 分解能を変化させたときの単射度と学習誤差の関係

(A)ILD の分解能を劣化させない（高精度な聞き分けを行う）状態での単射度と学習誤差の関係。各運動に対応するマーカーは表に基づいて色分けされている。(B)ILD の分解能の劣化度合いごとに正弦波信号を観測したときの受信信号の時間変化の例。(C)劣化した ILD 分解能ごとの単射度と学習誤差の関係。この評価は、無劣化状態 (A) において、学習誤差が比較的小さい耳介運動 ($E[M] < 20^\circ$) を抽出して行った。縦の黒線の長さは、離散化のレベル (ILD 分解能の劣化レベル) が 0dB から 3dB に変化したときの学習誤差の増加量に対応する。

3.3 垂直角のパターンを固定しない耳介運動における結果

耳介運動の垂直角 (pitch: φ_e) が $\overline{\text{COS}}$ である場合に満たすべき 3 条件を前節で示した。本説では pitch が $\overline{\text{COS}}$ という条件を外し、本研究で考えられる $6^3 = 216$ 通りのすべてのパターンについて考察する。これらすべてのパターンについて図 10 のように単射度を算出した。この解析の結果、 $\theta_e^l \equiv \theta_e^r$ または $\varphi_e^l \equiv \varphi_e^r$ が成立するとき、単射度が低くなることがわかった。従って、単射度 $I[M] > 1$ を満たす条件は以下の 4 条件である。

- (i) 両耳軌道の和集合の凸包が 3 次元である。
- (ii) 各耳の軌道が 2 次元である。
- (iii) 両耳の yaw(θ_e) が同位相でない。
- (iv) 両耳の pitch(φ_e) が同位相でない。

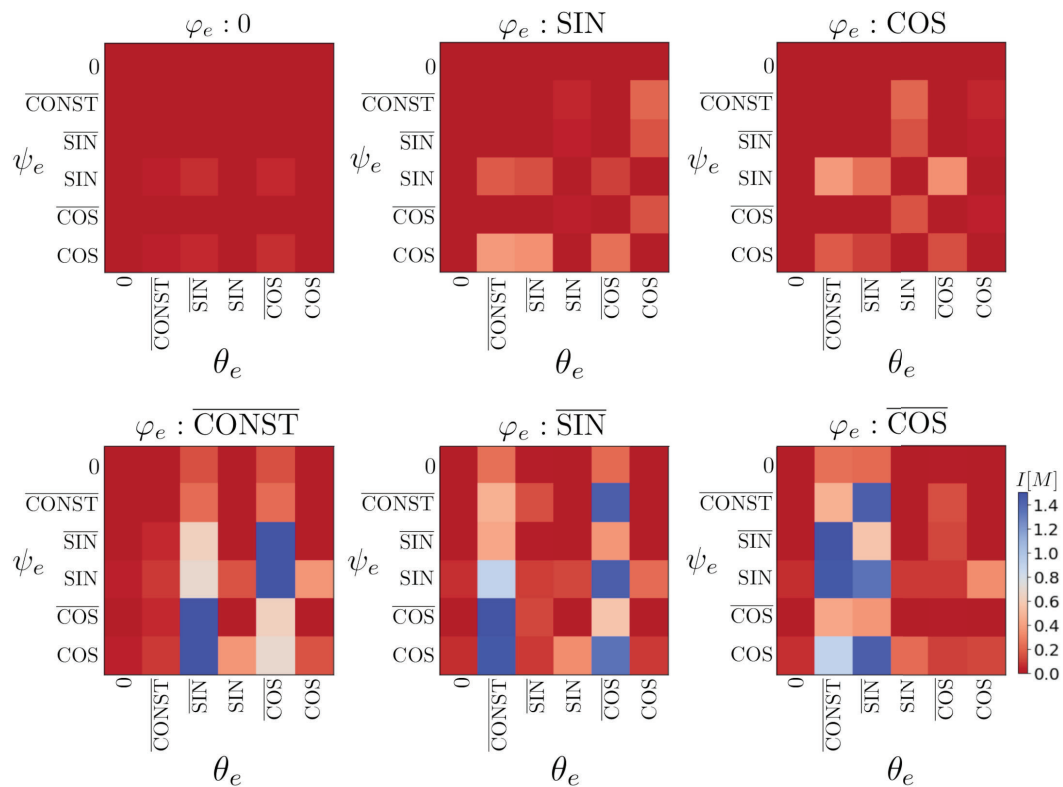


図 10: 全 216 パターンにおける単射度 $I[M]$ のカラーマップ

垂直角 (pitch: φ_e) が $\overline{\text{COS}}$ である条件を課さない、 $6^3 = 216$ パターン全てについて単射度を算出した。

これらの4条件を満たすパターンは216パターン中14パターンであった。これらが真に良い運動パターンであることを確認するために、前節の36パターンと同様に教師あり学習を行った。その結果、図11が得られ、 $I[M] > 1$ を満たす14のすべてのパターンについて、高精度の方向定位が（ILD分解能の劣化まで込めて）可能であることが確かめられた。従って、観測誤差鋭敏性へのロバスト性まで考慮した上で高精度な方向定位可能性と、 $I[M]$ の値が大きいことの対応が確認できた。

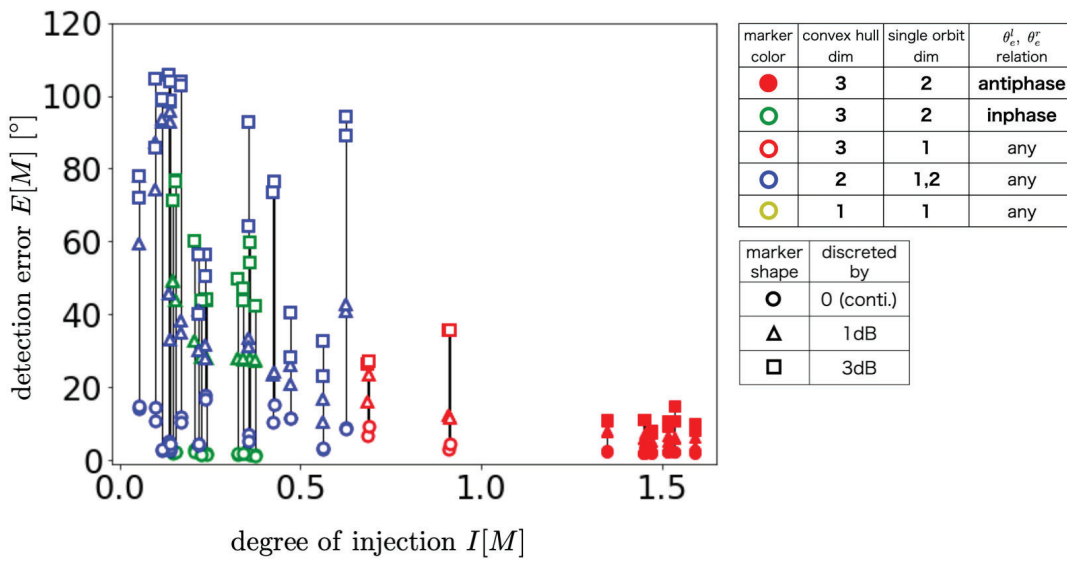


図 11: 全 216 パターンを対象とした単射度と学習誤差の関係

図 9C と同様に、全 216 パターンのうち、ILD 分解能を劣化させない条件で学習誤差 $E[M] < 20^\circ$ を満たすものに制限した上で、ILD 分解能ごとに単射度と学習誤差の関係を示した。

ここまでで、観測誤差鋭敏性へのロバスト性まで込めた高精度定位を実現するための4条件を導出したが、条件「(iii) 両耳の yaw(θ_e) が同位相でない。(iv) 両耳の pitch(φ_e) が同位相でない。」については、パターンの生成の都合上、逆位相についてのみ述べているに過ぎなかった。もし、「同位相でない」が「ちょうど反位相であることが必要」を意味

するならば、実際の Koumori が実現できるとは考えづらい。

図 12 は、左右耳の位相差をいくつか試した結果である。これより、左右耳位相が「同位相でない」というのが、「ちょうど反位相でなければならない」という意味ではなく、「ある程度以上の差をもって推移する」ことであることが確かめられた。

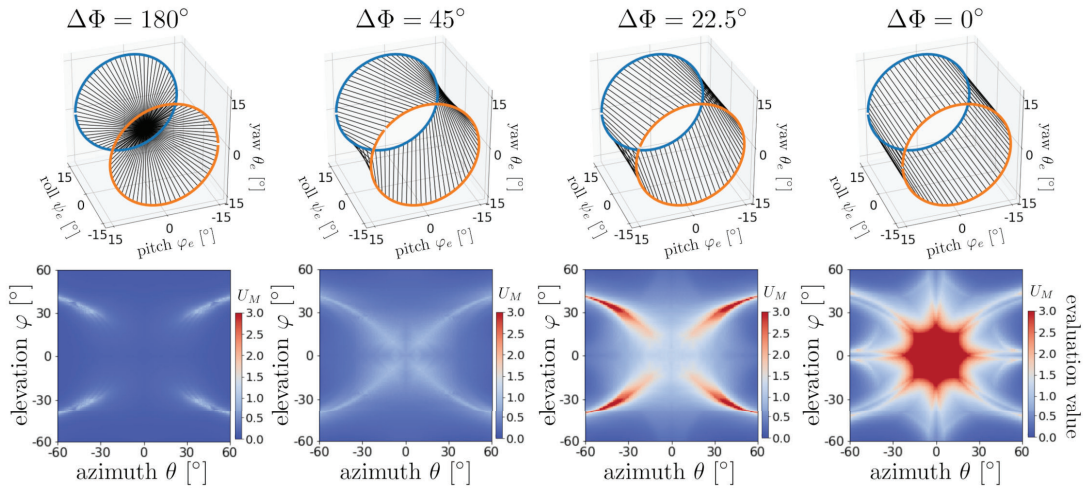


図 12: 両耳の運動位相差による方向定位への影響

図の上段は、青線が左耳の軌道 $(\psi_e^l, \varphi_e^l, \theta_e^l) = (C, C \cos(2\pi f_e t), C \sin(2\pi f_e t))$ 、橙線が右耳の軌道 $(\psi_e^r, \varphi_e^r, \theta_e^r) = (-C, C \cos(2\pi f_e t + \Delta\Phi), C \sin(2\pi f_e t + \Delta\Phi))$ を表す。黒線は左右耳の同時刻の点を結んだものである。いま、 $\Delta\Phi = 180^\circ$ のとき、その運動は $[\overline{\text{CONST}}, \overline{\text{COS}}, \overline{\text{SIN}}]$ 、 $\Delta\Phi = 0^\circ$ のとき、その運動は $[\overline{\text{CONST}}, \text{COS}, \text{SIN}]$ をそれぞれ表す。

3.4 他の指向性耳における結果

前節までの結果によって、単射度 $I[M]$ を用いた耳介運動の評価は、定位精度および観測誤差に対するロバスト性を評価するための指標とすることができることも裏付けられたと言える。

式 (8) までで導出した ILD は、4 個の無指向性マイクを正方形に並べたものを仮定した。これは、工学応用の面で、モデル耳を再現することが容易である点で有用である。一方、これらの結果がこの指向性に特有のものであるわけではないことを確かめるために、式 (6) を変更し、意図的に作り出された指向性によっても同様の結果が得られるかを確認する。

まず、マイクの指向性を設定する。図 13 はこれまでに扱った 4 個の無指向性マイクを並べたモデル耳および、新たに設定した Roll 回転の影響を受けない (Roll 対称) 耳介および、Roll 回転の影響を受ける (Roll 非対称) 耳介の、合わせて 3 つの指向性を表した図である。Roll 回転の影響を受けないマイクの指向性は、マイクの向いている方向と音源とのなす角 α によってその減衰が表されるものとして設定した。

これらのマイクを用いて、前節までで行った単射度を導出した結果が図 14 である。モデル耳で上位であった 5 パターンの耳介運動は、図 13C で示した指向性マイクを利用した定位においても、単射度 I は上位 7 位までに入ることがわかった。また、Roll の影響のないマイクによる定位は θ_e が $\overline{\text{CONST}}$, $\overline{\text{SIN}}$ であるものが高い単射度を実現することが読み取れる。これは、前述の 5 パターンをすべて含む。図 14 から分かるように、Roll 方向の回転の影響のないマイクによる定位が、高い単射度を実現することがわかった。これは、指向性の Roll 方向への非対称性が、情報量の増加に必ずしも寄与しないことを示す結果である。しかし、実在する動物の耳介指向性が、このような真に対称な指向性を実現するような耳介構造を達成することは困難であり、実際にそのようにはなっていない (後述) ことから、現実のコウモリの実現するべき耳介の運動の条件という観点においては、なおよく考慮されるべきであるといえよう。

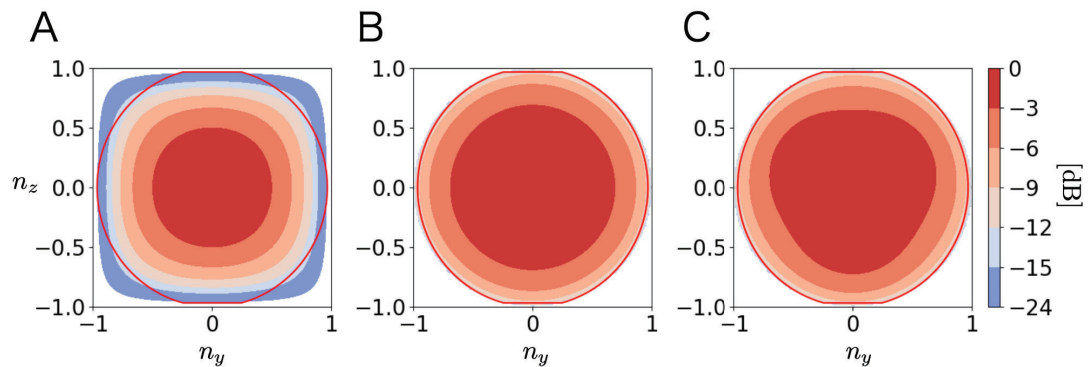


図 13: これまでのモデル耳と新たに設定した 2 つのマイクの指向性

(A) 4 個の無指向性マイクを並べたモデル耳の指向性。横軸を n_y 、縦軸を n_z としたときの指向性で、図 2C での設定とマイク間距離は同じであり、指向性は同じである。(B) 指向性を $20 \log_{10}(1 + \cos(b\alpha))$ で与えた指向性の図。指向性の等高線は同心円状に並んでおり、耳介の Roll 方向への回転の影響は完全に消失する耳介である。(C) 指向性を $20 \log_{10}(1 + \cos(b\alpha)(1 + \epsilon \sin m\alpha))$ で与えた指向性の図。これは、Roll 回転の影響を受ける耳介である。ただし、(B),(C) において、 $b = 1.5$, $\epsilon = 0.05$, $m = 3$ とした。

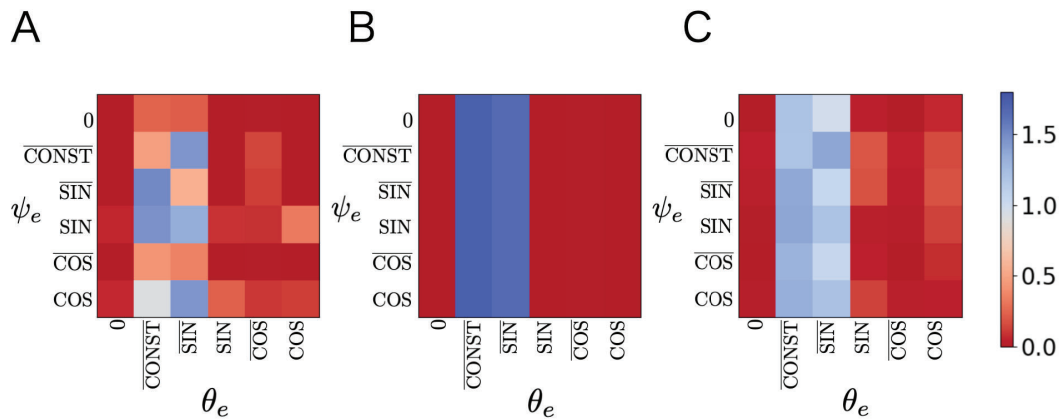


図 14: 3 通りの指向性パターンにおける $I(M)$ のカラーマップ

(A) モデル耳 (B) Roll 回転の影響を受ける耳介。(C) Roll 回転の影響を受けない耳介。それぞれにおける $I(F)$ の値のカラーマップ。

3.5 マイク数を増やすことによる耳介運動を代替する手法

3.3 節までで、高精度な定位を行う条件として、少なくとも 2 軸に関して時間的に運動する必要があることが分かっている。このように運動するロボットを実際に作成することも可能であろうが、他方、モデル耳を複数作成し、運動する耳介の各時刻の姿勢に対応する方向に固定したマイクから、信号を順番に受信して処理するという方法も考えられる。

本節は、このようにマイクの数を増やすことによって、耳介を時間的に運動させるのではなく、複数の固定されたマイク列から順々に信号を受け取って処理を行うことでも、定位が可能であるかについて考察を行う。

3.5.1 耳介運動を離散的に行うことによる表現

マイク数を増やすことの表現を、耳介運動を離散的に行うことで表現する。すなわち、 $\psi_e, \varphi_e, \theta_e$ に与える回転の角度関数を階段関数状に不連続に変化させることで、異なる角度に固定された耳介を用いて順に音波の観測を行ったことに相当するデータを得られる。このような観測を、本論文では「多マイク測定」と呼ぶことにする。

(本研究で取り扱う例)

Roll にあたる ψ_e は $\mathbf{0}$ と $\overline{\text{CONST}}$ のいずれかとし、Pitch と Yaw にあたる φ_e, θ_e は図 15 のように設定する。

ψ_e が $\overline{\text{CONST}}$ の場合、図 15 の 3 次元図中の立方体の 8 頂点に対応する方向にマイクを取り付け、黒線で結ばれた 2 個のマイクの組を用いて音圧レベル差を観測し、定位を試みることに対応する。また、 ψ_e が $\mathbf{0}$ の場合、 ψ_e - φ_e - θ_e 空間内での凸包は正方形であるが、マイクの指向性によっては高精度定位が可能であることは、前節で確認したとおりである。したがって、この条件も考察対象とする。さらに、 $|\varphi_e^l| = |\theta_e^l| = 15^\circ$ は、これまでの左右耳の角度関数の組を用いた耳介運動では実現しない角度である。これによる影響を見るため、図 15 上段の設定において、各回転角度を $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍 (約 10.6°) にしたものについても考察対象とする。

こうして設定した耳介で実際に学習と評価関数の計算を行った結果が図 16 である。

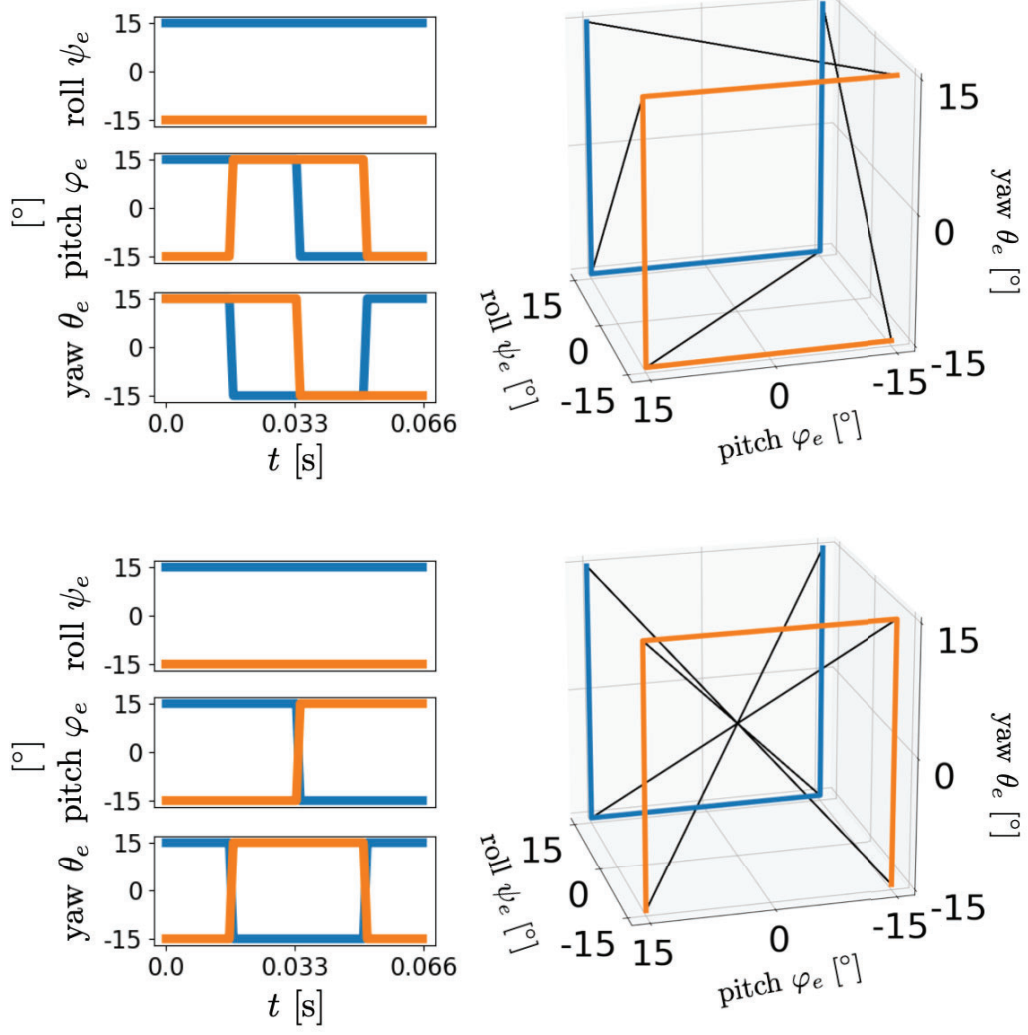
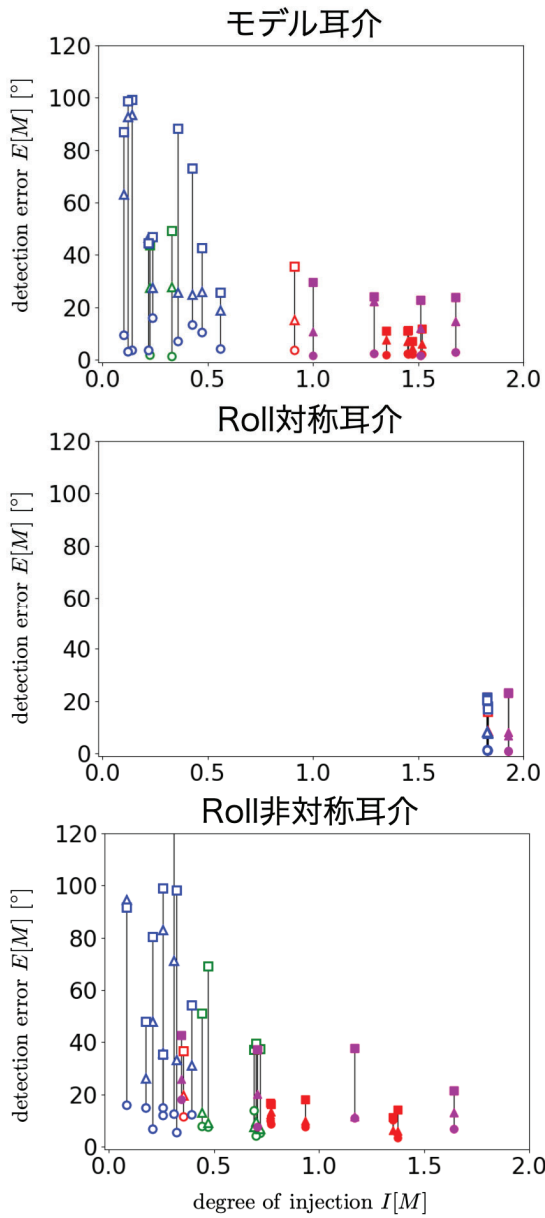


図 15: φ_e, θ_e の設定と、これらによる ψ_e - φ_e - θ_e 空間内の凸包

青線は左耳、橙線は右耳の角度、軌道を表す。3次元図中の黒線は左右耳の同時刻での点を結んだものである。どちらのパターンも、軌道の凸包は立方体をなし、3.3節で示した、高精度定位のための4条件をすべて満たしている。

赤・緑・青の3色は図9での設定をそのまま使い、本節で導入した多マイク測定を紫色で追加した。図から、連続運動に比して多マイク測定は入力情報の離散化に対する定位精度の劣化が顕著に見られる。



marker	convex hull dim	single orbit dim	θ_e^l, θ_e^r relation
●	3	2	antiphase
○	3	2	inphase
◌	3	1	any
◌	2	1,2	any
●	多マイク測定による結果		

marker shape	discreted by
○	0 (conti.)
△	1dB
□	3dB

図 16: 多マイク測定を追加した単射度と学習誤差の関係

図 9C に、本節で導入した多マイク測定による結果を紫色で追加した図。

このような定位精度の劣化の要因を確かめるために、モデル耳における ILD 分解能が 3dB である学習結果のうち、単射度 $I(M)$ がほぼ等しい、 $[\varphi_e : \overline{\text{SIN}}, \varphi_e : \overline{\text{COS}}, \theta_e : \overline{\text{CONST}}]$ ($I(M) \sim 1.52$, $E(M) \sim 11.9^\circ$) と、図 15 上段 ($I(M) \sim 1.51$, $E(M) \sim 23.0^\circ$)、さらに、比較のために $[\varphi_e : \overline{\text{SIN}}, \varphi_e : \overline{\text{COS}}, \theta_e : \overline{\text{SIN}}]$ ($I(M) \sim 0.56$, $E(M) \sim 25.8^\circ$) の学習結果を図 17 に示す。

まず、多マイク測定と定位精度の高い連続運動の学習結果を比較する。これらは、単射度 $I(M)$ がほぼ等しいが、学習誤差 $E(M)$ に 2 倍程度の差がある (約 11.9° と約 23.0°)。図を一見すると明らかなように、多マイク測定では全体的に障害物検知位置の誤りを示す黒い線が見られるのに対し、連続運動においては目立つものは中央の 1 箇所のみと言える。

次に、多マイク測定と定位精度の低い連続運動を比較する。これらは、学習誤差はほぼ等しいが、単射度が大きく異なる (約 1.51 と約 0.56) ものである。多マイク測定においては中央付近ではより顕著であるが、ある領域での定位結果はすべてその領域の中心付近に集中している。これは、観測信号が類似しているのがその領域周辺に限られることを示す。これに対し、連続運動においては異なる 2 点からその中心付近に定位結果の誤りを示す黒線が集まっている。これは、前述の通り観測信号が単射でないことに起因する定位誤りである。単射度の値の比較からもこのような定位の誤りの種類を見極めることができる。

単射度が定位誤りの種類を表すことを確認した。立ち戻って、単射度がほぼ等しい多マイク測定・高定位精度の連続運動の比較において、学習誤差に差が出たことの解釈を与えるために、水平角と仰角が (θ, φ) である障害物 A と、 $(\theta + \Delta\theta, \varphi + \Delta\varphi)$ である障害物 A' の、ニューラルネットワークによる判別可能性について、今一度考察する。

耳介運動による観測 M は単射であると仮定する。また、ILD 分解能は十分小さな正の数であるとする (ILD 分解能が無限精度の場合は M の単射性から判別可能である)。障害物 A と障害物 A' における観測される音圧レベル差 $P_A, P_{A'}$ が等しくないことを検出できるならば、障害物 A と障害物 A' は判別可能である。いま、観測開始時刻 t_0 と観測終了時刻 $t_0 + T$ において、障害物 A と障害物 A' における観測される音圧レベル差が等しいとする。 M の単射性と、ILD 分解能が十分小さいという仮定から $P_A(t) \neq P_{A'}(t)$ なる

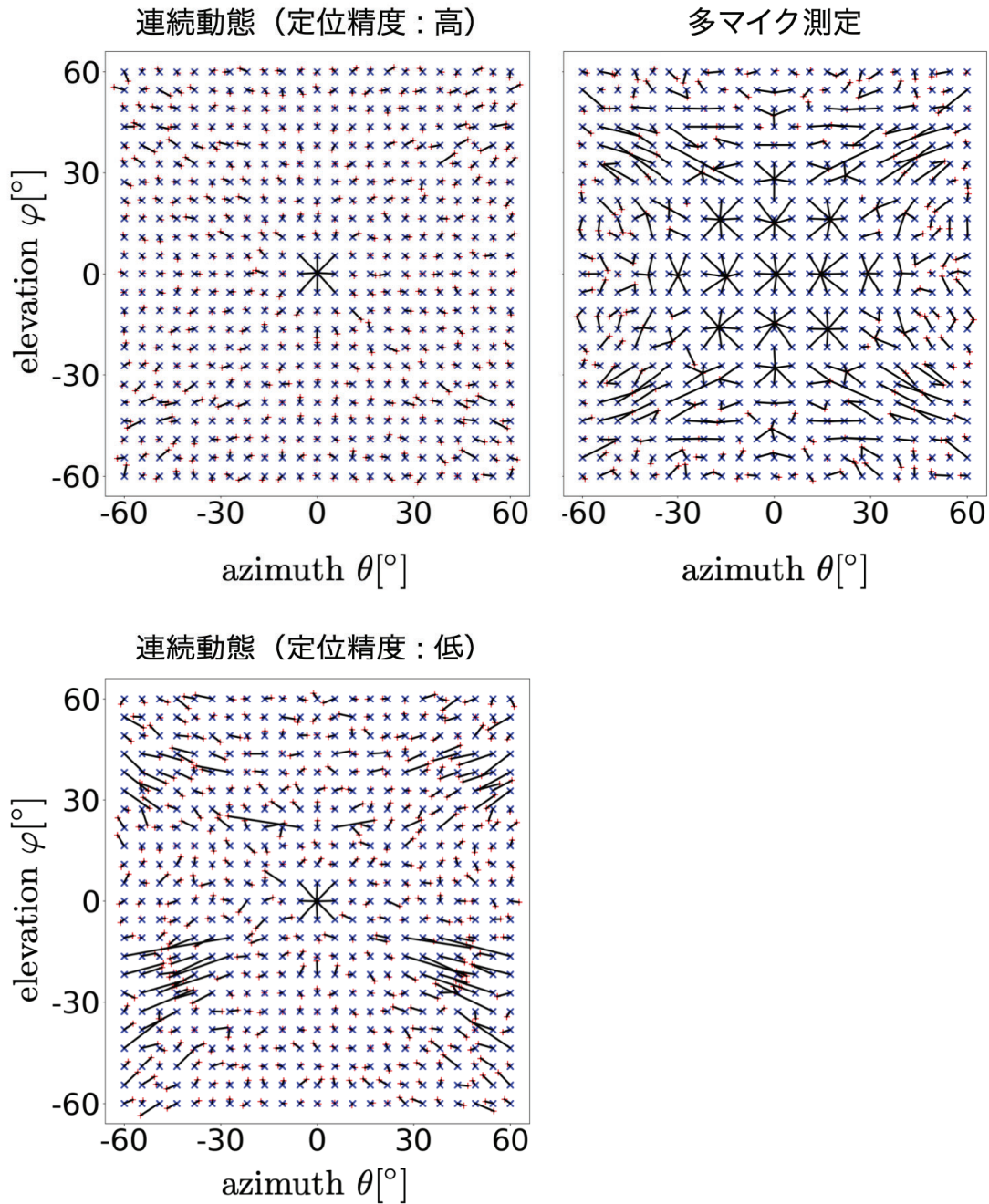


図 17: 高単射度の多マイク測定と耳介運動における学習結果の比較

ILD 分解能 3dB における学習結果。多マイク測定を基準として、定位精度の高い連続運動は単射度 $I(M)$ がほぼ等しいが学習誤差 $E(M)$ が小さい

$[\varphi_e : \overline{\text{SIN}}, \varphi_e : \overline{\text{COS}}, \theta_e : \overline{\text{CONST}}]$ 、定位精度の低い連続運動は、学習誤差がほぼ等しいが単射度が小さい $[\varphi_e : \overline{\text{SIN}}, \varphi_e : \overline{\text{COS}}, \theta_e : \overline{\text{SIN}}]$ である。

時刻の区間 $[t_1, t_2]$ が存在する。したがって、音圧レベル差の測定が区間 $[t_1, t_2]$ 内で行われれば、障害物 A と障害物 A' は判別可能である。ニューラルネットワークへは 1 ミリ秒ごとの音圧レベル差を測定して入力信号として渡していた。この測定の瞬間のいずれかが区間 $[t_1, t_2]$ に属していることが障害物 A と障害物 A' を判別するための条件である。

このことから、測定頻度を高くすることが、ある障害物とその近くの障害物を判別するための情報量の増加に寄与することが導かれる。多マイク測定と連続運動の比較に立ち戻ると、多マイク測定における測定は 4 点のみで行われるのに対し、連続運動では 66 点での測定が行われるという点で大きく異なる。以上により単射度がほぼ等しいものであっても、多マイク測定においては連続運動よりも情報量が少ないことが、学習誤差が大きくなることの要因であると考えられる。

多マイク測定は、運動耳介と比較して細かい定位が行えないことによって学習誤差が大きくなることは分かったが、単射度が高いことは、依然として、定位結果が実際とは見当違いの方向に外れることがないことを保証するといえる。したがって、障害物回避飛行のためなど、定位の用途が決まっている場合には、障害物定位の精度がどれほど必要なのかを判断した上で、多マイク測定を応用することは十分に考えられることであろう。

3.5.2 定位に必要なマイクの数

前節では、多マイク測定によって、精度のある程度の低下を許容すれば定位を行うことができることがわかった。本節では何本以上の固定マイクがあれば高い単射度を実現できるのかについて考察する。

マイク n 本による定位について、定位に用いることのできる音圧レベル差情報について考える。

いま、 n 本のマイクを M_1, M_2, \dots, M_n と名付けると、得られる音圧レベル差情報は $(M_1, M_2), (M_1, M_3), (M_1, M_4), \dots, (M_1, M_n)$ の各マイクの組による $n - 1$ 通りである。他の組のマイクの組による音圧レベル差情報は、この $n - 1$ 通りの音圧レベル差情報から導かれる。例えば、 $(M_1, M_2), (M_1, M_3)$ の組による音圧レベル差が $a_{1,2} = a_1 - a_2, a_{1,3} = a_1 - a_3$ (a_1, a_2, a_3 は、各マイク M_1, M_2, M_3 による音圧レベル)

であるとき、 (M_2, M_3) の組による音圧レベル差 $a_{2,3}$ は、

$$\begin{aligned} a_{2,3} &= a_2 - a_3 \\ &= (a_1 - a_{1,2}) - (a_1 - a_{1,3}) \\ &= a_{1,3} - a_{1,2} \end{aligned}$$

と表される。

これをもとに、各マイクを固定する条件のもと、定位に必要なマイクの数について考察する。用いるマイクは 3.4 節で成績の良かった Roll 回転の影響を受けないマイクとする。

・4本のマイクによる定位

4本のマイクによる定位は、Roll 回転の影響を受けないマイクにおいては、前項の耳介運動を離散的に行うことによる表現と同等である。図 15 において ψ_e 軸方向が潰れているのと同様のため、これは 8 マイクによる測定ではなく、4 マイクによる測定と同義である。したがって、図 16 中段の結果が 4 本のマイクによる定位の可能性について示した図でもあるといえる。この結果より、4 本のマイクによる測定は高い単射度を実現することが分かる。

・2本のマイクによる定位

2本のマイクによる定位は、得られる音圧情報は 1 情報のみである。したがって、1 つの実数（音圧レベル差）をもとに (θ, φ) の組、すなわち、2 次元情報を推定する問題である。理論上、1 次元の単位区間から 2 次元の単位正方形への全射連続写像の存在は、空間充填曲線として知られているが、本研究で取り扱う音圧レベル差は物理量であり、2 次元空間全体を覆うことは考えにくい。実際、図 18 に示すように、単射度は約 1.0×10^{-4} 、学習誤差も約 101.5° と、高精度定位ができていないことが分かる。2本のマイクによる定位は、これらのマイクの向いている方向ベクトルのなす角の差を除いて本質的に 1 種類である。この結果により、2本のマイクによる定位は高精度な定位が行えないことが分かる。

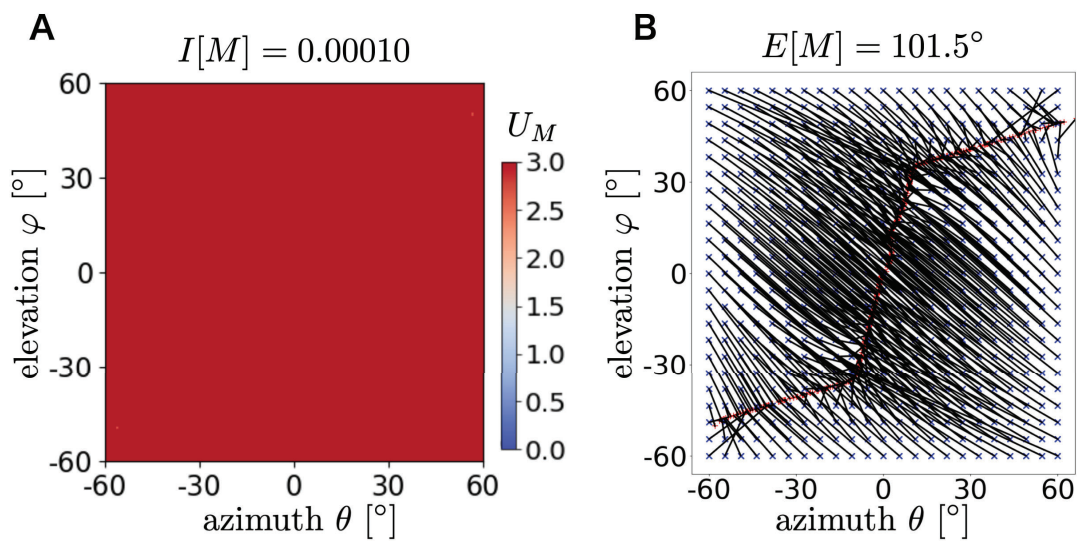


図 18: 2 本のマイクによる定位の結果

2 本のマイクによる定位での評価関数のカラーマップと教師あり学習の結果。マイクの配置は $(\theta_e, \varphi_e) = (-C, -C), (C, C)$ である。

・3本のマイクによる定位

3本のマイクによる定位について、異なる4パターンのマイク配置に対して評価関数と単射度を計算した。図19はそれぞれのマイクの配置とその配置での定位におけるこれらの計算結果を示した図である。マイクの配置は

$$(\theta_e, \varphi_e) = \{(-C, -C), (0, C), (C, -C)\}, \{(-C, 0), (0, -C), (C, C)\}, \\ \{(-C, 0), (C, -C), (C, C)\}, \{(-C, -C), (C, -C), (C, C)\}$$

とし、いずれの配置においても、単射の崩れる点が存在することがわかった。

この4パターンにおいて、評価関数の値が大きくなった領域は $|\theta|, |\varphi|$ が大きな領域であることもわかった。これは、障害物の存在する範囲がこのような領域を含まない範囲に制限されている場合に、高い単射度を示すことを示唆する結果である。これを確かめるために、障害物の存在範囲を $|\theta|, |\varphi| < 30^\circ$ に制限した上で、評価関数と単射度の導出および、教師あり学習による定位学習を行った結果が図20である。定位に紛らわしい点を除いたため、評価関数の値は大域的に低くなり、単射度の値も向上した。この結果、ILD分解能に劣化がない場合の学習では、4つの配置パターンに全てにおいて高精度な定位を達成した(図の左から $E[M] = 0.38^\circ, 0.28^\circ, 0.35^\circ, 0.35^\circ$)。また、ILD分解能を1dBに落とした学習においては、前節および本節冒頭で述べたように、利用できる情報の量が少なくなるために精度の低下は見られるが(左から $E[M] = 25.4^\circ, 11.5^\circ, 9.6^\circ, 16.0^\circ$)、高単射度での特徴として前節で述べた、定位結果の見当違いな方向への間違いは、やはり発生しなかった。

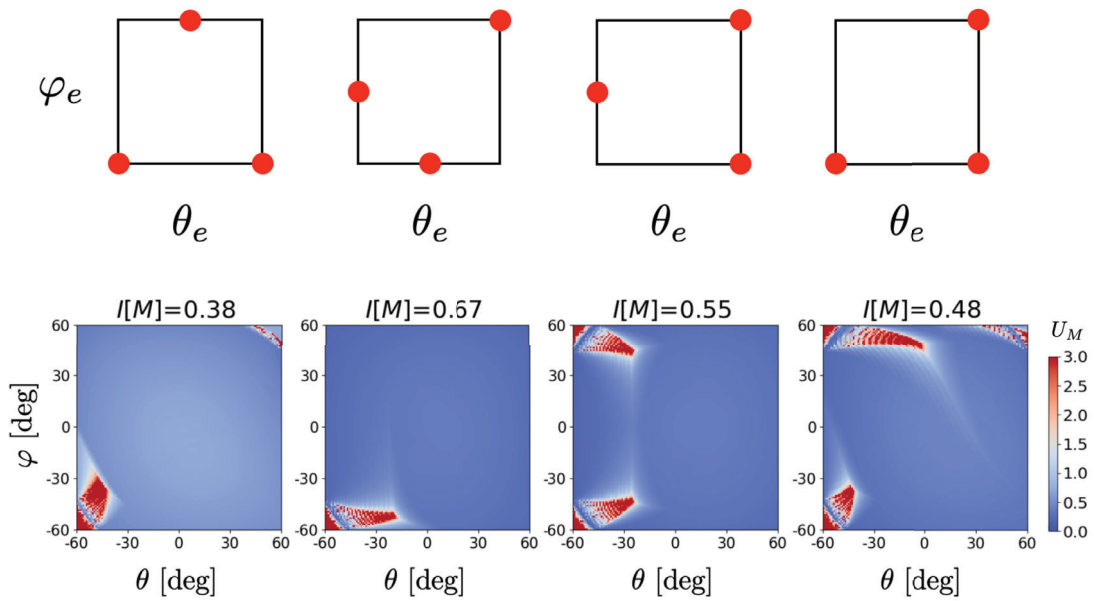


図 19: 3 本のマイクによる定位における評価関数と単射度

3 本のマイクの配置と、それぞれによる定位での評価関数のカラーマップ。マイクの配置は左から $(\theta_e, \varphi_e) = \{(-C, -C), (0, C), (C, -C)\}$, $\{(-C, 0), (0, -C), (C, C)\}$, $\{(-C, 0), (C, -C), (C, C)\}$, $\{(-C, -C), (C, -C), (C, C)\}$ である。

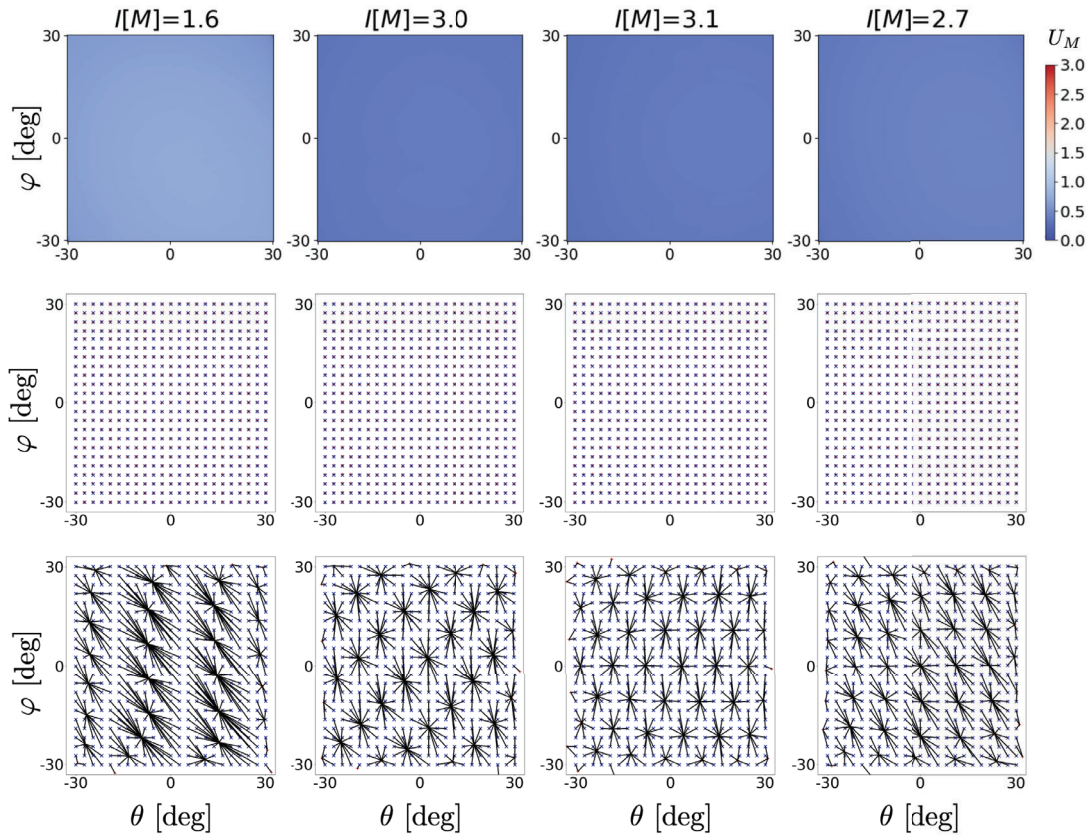


図 20: 3 本のマイクによる定位 ($|\theta|, |\varphi| < 30^\circ$ に制限) の結果

障害物の存在範囲を $|\theta|, |\varphi| < 30^\circ$ に制限した上での、3 本のマイクによる定位での評価関数のカラーマップと教師あり学習の結果。マイクの配置は図 19 と同様に左から、 $(\theta_e, \varphi_e) = \{(-C, -C), (0, C), (C, -C)\}, \{(-C, 0), (0, -C), (C, C)\}, \{(-C, 0), (C, -C), (C, C)\}, \{(-C, -C), (C, -C), (C, C)\}$ である。中段は ILD 分解能に劣化がないもの、下段は ILD 分解能を 1dB としたものである。

3.6 実際のコウモリの指向性を用いた学習

実コウモリの頭部伝達関数 (HRTF : The head-related transfer function) の測定の報告をもとに、報告された指向性を再現した「再現耳介」を作成し、3.2 節までの運動シミュレーションを実行した。

3.6.1 実コウモリの指向性の再現

図 21 は、Uwe Firzlaflaff らによる測定の結果 [21] と、これを本研究において使用するために再現した再現耳介の指向性である。

再現耳介生成のために、まず図 21A の緯線 (Azimuth) と経線 (Elevation) それぞれについて、 $\pm 60^\circ$ の範囲での交点の値、すなわち、Azimuth, Elevation の 7.5° ごとの値を大まかに読み取り、その範囲外の点および、範囲内の点であっても読み取った値が -23 以下のものについては -23 に置き換えたデータを作成し、これを教師データとして教師あり学習を行うことで、これらの点以外について補完した。図を読み取ったデータに関しては、耳介運動のシミュレーションを行う都合上、値が最大となる点が原点に来るように Azimuth について -15° 、Elevation について 7.5° ずらしたものを作成した。

こうして作成したデータを教師データとして用いて学習を実行することで、図 21B に示す指向性を持つ再現耳介を生成した。

3.6.2 再現耳介による評価関数と単射度の算出

前項で作成した再現耳介を用いて評価関数、単射度を算出した結果がそれぞれ図 22 と図 23 である。

図 6 と比較して赤色の部分、すなわち、評価関数 $U_M(\theta, \varphi)$ の値が大きな部分が全体的に少ないことが分かる。すなわち、モデル耳による定位と比べて再現耳介による定位のほうが定位に混乱を起こしづらいことが分かる。また、前節までの Roll 方向回転の影響を受けないマイクでの定位と再現耳介での定位の単射度 $I[M]$ の値を比較すると、Roll 回転の影響のない再現耳介での定位 (θ_e : $\overline{\text{CONST}}$, $\overline{\text{SIN}}$ いずれも約 1.7) を上回る耳介運動が存在することもわかった。

この結果は、コウモリの耳介形状による指向性が、ある特定の耳介運動においては前節で優秀であった Roll 回転の影響のないマイクでの定位を凌ぐほどに最適化されていることを示唆する結果である。

本節までで、無指向性マイクを 4 個並べて作成したモデル耳のような、ごく単純な指向性を持つ耳介においては、3.3 節で挙げた 4 条件をすべて満たす必要があった。また、Roll 回転の影響のないマイクのような、指向性が完璧な対称性を持つ耳介では、条件をすべて満たす場合以外においても高精度定位が可能な場合が存在することもわかった。これは、耳介が持つ指向性の緻密さと、耳介運動が満たすべき条件の複雑さの両方を必ずしも満たさずとも高精度な定位ができることを表している。本節で取り上げた再現耳介においては、Roll 回転の影響のないマイクの成績を上回るような耳介運動も存在した。これらの結果を工学的に応用する場面を考えると、マイクの持つ指向性の緻密さと、耳介運動の複雑さのいずれかが技術的に実現困難な場合であっても、他方を解決すれば高精度な定位を実現しうるということが、本研究によって示されたといえよう。

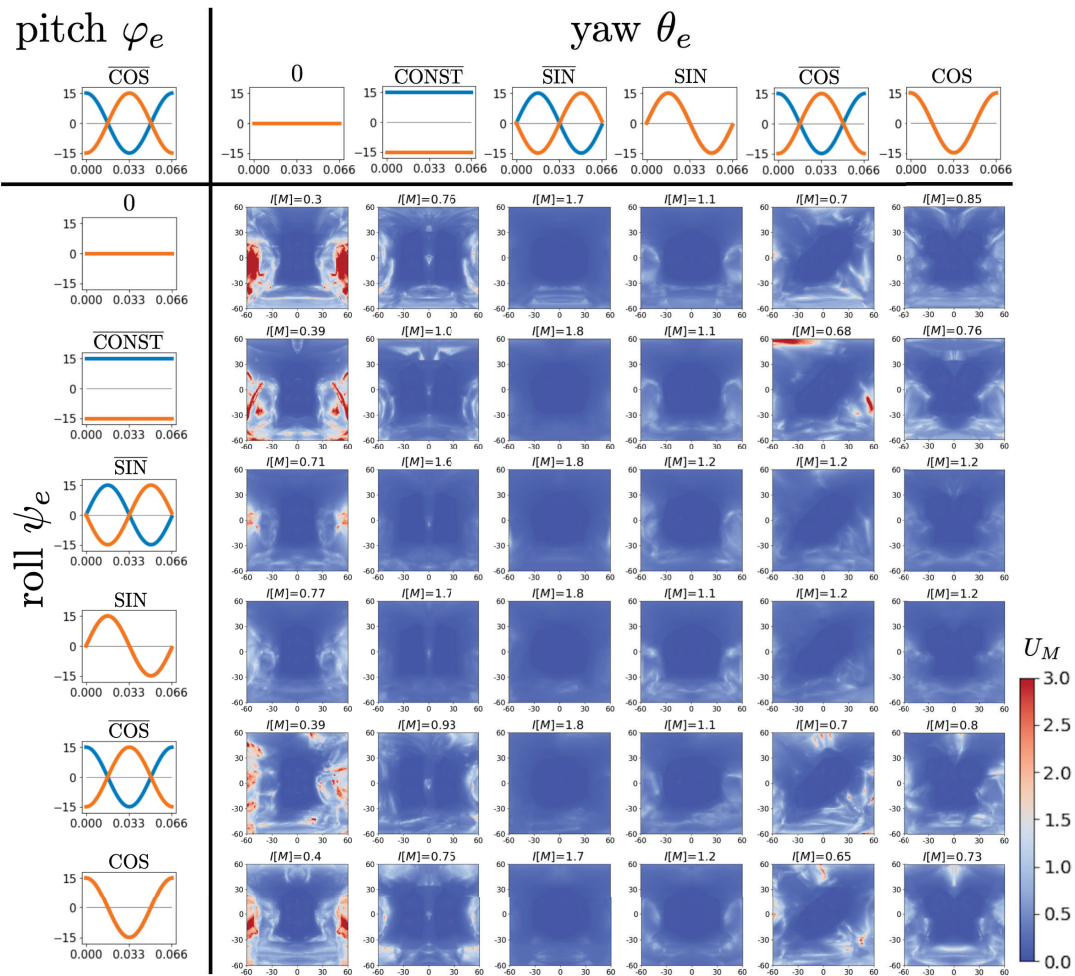


図 22: 再現耳介を用いた評価関数のカラーマップ

再現耳介を用いた、pitch が $\overline{\text{COS}}$ であるときの $U_M(\theta, \varphi)$ のカラーマップと単射度。

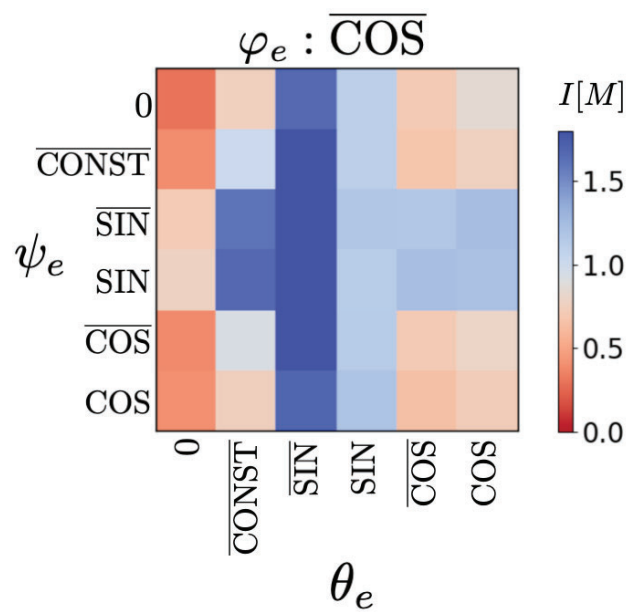


図 23: 再現耳介を用いた単射度の耳介運動別カラーマップ

再現耳介を用いた、pitch が $\overline{\text{COS}}$ であるときの単射度 $I[M]$ の耳介運動別カラーマップ。

4 まとめと展望

本研究では、モデル耳においては、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次元方向検出を正確（図 8,10）かつロバスト（図 9,11）に行えることを数理モデルを用いて示した。実際のコウモリにおいては、CF-FM コウモリが高速な耳介運動を定位に用いており、エコーロケーションのプロセスにおいて、耳介運動に大きな利得がきちんと存在していることを示唆したと言えよう。

これまでの数理的な研究 [31][32] や実証実験 [33] では、耳介運動が特定の運動パターンにおいて有用であることが示されている。これに対し本研究では、網羅的な運動パターンの評価により、これらの耳の運動の理論的根拠を考察した。このように、コウモリの耳介運動戦略の基礎となる理論について検討した研究は前例がない。Pitch 角を $\overline{\text{COS}}$ に限定しない運動についての結果（図 10,11）、3次元方向検出には3軸の回転（ $\overline{\text{CONST}}$ を含む）が必要であることがわかった。

特に、図 10 で示すように、ピッチ角関数 φ_e^l と φ_e^r は少なくとも数十度以上の位相差を持つことが必要である。ピッチ角の逆位相制御は実コウモリで観察されており [23]、本研究の理論は実際のコウモリの行動におけるピッチ角の逆位相制御の必然性を強く支持するものである。また、解析の結果、Yaw 関数 θ_e^l と θ_e^r の間には逆位相制御の制約があるのに対し、Roll 関数 ψ_e^l と ψ_e^r の間にはそのような制約がないことが判明した。これは、Pitch 角と Yaw 角が指向性パターンの中心方向を決定し、Roll 角が方向軸まわりの回転を決定することに起因するものと思われる。このように、本研究はコウモリの行動に対する理論的な裏付けを与えるだけでなく、Roll-Pitch-Yaw の制御に対する新しい解釈も提供するものである。

図 8,9 や図 10,11 に示したように、高精度かつロバストな定位を実現する運動パターンは、Pitch 角を $\overline{\text{COS}}$ に限定しない 216 パターンのうち 14 パターン、限定した 36 パターンのうちでは 5 パターンしかなかった。実際のコウモリが耳介の Pitch 角を $\overline{\text{COS}}$ として運動させていることを考えると、コウモリはこの 5 パターンのうちのどれかを耳介運動に採用している可能性がある。コウモリの体が左右対称に形作られていると考えるのは自然

であろうが、その仮定を入れると、次式が成り立つものと考えられる。

$$\begin{cases} \psi_e^l(t + T/2) = \psi_e^r(t) \\ \varphi_e^l(t + T/2) = \varphi_e^r(t) \\ \psi_e^l(t + T/2) = -\psi_e^r(t) \end{cases} \quad (24)$$

上記の5パターンのうち、上記の式を満たすのは $[\psi_e : \text{SIN}, \varphi_e : \overline{\text{COS}}, \theta_e : \overline{\text{CONST}}]$ である。したがって、実際のコウモリはこのパターンに近い耳の動きをしている可能性がある。

このように、適切な耳介運動パターンを複数見出した (図 10) だけでなく、Roll-Pitch-Yaw 空間における軌道を用いた簡単な判別条件を提案した。このようなグラフを用いた評価方法は、実測データを用いて適用することができるため、動物行動学的な調査にも有効である。また、聴覚の指向性パターンも実測データから近似的に求めることができる。このように、本研究における知見は、理論的な知見を提供するだけでなく、動物行動学的研究の理論解析のフレームワークの提案という面でも有用である。

一方で、本研究においては、耳の指向性自体については包括的に調べ上げたものではないので、実際のコウモリの耳の複雑な指向性をもってすれば、上述の条件を満たさずとも高精度かつロバストな定位ができる可能性もある点で、議論の余地が残る。実際、前章で扱った再現耳介においては、より多くの運動パターンで、高精度な定位ができる可能性があることがわかった。しかしながら、再現耳介の生成には、報告された頭部伝達関数の図を大まかに読み取るという方法を採用したという点で、再現として適切であるのかどうかという点で議論の余地がある。しかし、本研究の意義は、単純な形の指向性と、比較的制約の多い耳介運動で高精度かつロバストな定位が可能であることを示した点にある。これは、例えば工学応用の面で、指向性の緻密さを再現することなく、耳介運動やマイク数の増加 (3.5 節) によってセンシングが実現可能であることを示唆した点での有用性に帰着する。

本研究では、超音波パルスに周波数定常部を含む CF-FM コウモリの CF 部分を用いた定位について取り扱った。一定周波数の音に対して耳介運動を行うことによって、ドップラー効果によりうなりが発生することで左右の耳で観測される音圧レベル差に経時的変化が起こることを観測することによって情報量を増幅できることを示した。これに対し、

FM コウモリは放射する超音波パルスは周波数定常部が無くとも飛行を行うことが可能である。FM コウモリは、CF-FM コウモリのように CF 部の超音波に合わせて耳を動かすといった行動のかわりに、音の高さの経時的変化を情報源として用いている可能性がある。

また、ILD 時系列データからオブジェクトの方向 (θ, φ) 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）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、センシング分野での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。

謝辞

本論文の執筆にあたっては、多くの方々にご指導、ご支援をいただきました。

学部4年次の研究室配属から、退官される博士課程後期の3年次まで指導教員として、また、その後も本論文の執筆に至るまでの長きに渡って、研究に関する様々なご指導をいただきました小林亮名誉教授に御礼を申し上げます。

また、小林亮名誉教授の教授職退官後に指導教員を引き受けてくださり、学生生活、学位審査にかかる調整等をしていただいた坂元国望教授に御礼申し上げます。

さらに、本研究を行うにあたり、実際のコウモリに関する専門知識や文献の提供、研究の進め方や論文執筆に当たっての詳細なご指導等、研究遂行に不可欠な部分でご尽力いただきました山田恭史助教に御礼申し上げます。

そして、本研究の進行中にセミナーやミーティング等、研究内容に関する議論等の場において、研究方針を立てるに当たって助けとなるような重要な意見を出してくださった旧複雑系数理学研究室の教員、研究員および学生の皆様や、現数理生命科学プログラムの皆様に感謝申し上げます。

最後に、博士後期課程にいたるまで、長きに渡って学生として研究活動を行うこととなったにもかかわらず、私生活面で変わらず支援を続けてくださった家族に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Griffin, D. R. (1958). *Listening in the dark: The acoustic orientation of bats and men*. Yale Univer. Press.
- [2] Neuweiler, G. (1984). "Foraging, Echolocation and Audition in Bats," *Naturwissenschaften* 71, 446-455.
- [3] Simmons, J. A. (1979). "Perception of Echo Phase Information in Bat Sonar," *Science* 204, 1336-1338.
- [4] Gustafson, Y., and Schnitzler, H.-U. (1979). "Echolocation and obstacle avoidance in the hipposiderid bat *Asellia tridens*," *Journal of comparative physiology* 131, 161-167.
- [5] Jen, P. H.-S., and Kamada, T. (1982). "Analysis of orientation signals emitted by the CF-FM bat, *Pteronotus p. parnellii* and the FM bat, *Eptesicus fuscus* during avoidance of moving and stationary obstacles," *Journal of comparative*

physiology 148, 389- 398.

- [6] Griffin, D. R., Webster, F. A., and Michael, C. R. (1960). "The echolocation of flying insects by bats," *Animal behaviour* 8, 141-154.
- [7] Novick, A., and Vaisnys, J. R. (1964). "Echolocation of flying insects by the bat, *Chilonycteris parnellii*," *Biological Bulletin* 127, 478-488.
- [8] Schnitzler, H.-U., and Kalko, E. K. (2001). "Echolocation by Insect-Eating Bats We define four distinct functional groups of bats and find differences in signal structure that correlate with the typical echolocation tasks faced by each group," *Bioscience* 51, 557-569.
- [9] Ghose, K., and Moss, C. F. (2006). "Steering by hearing: a bat's acoustic gaze is linked to its flight motor output by a delayed, adaptive linear law," *J Neurosci* 26, 1704-1710.
- [10] Carr CE, Konishi M. Axonal delay lines for time measurement in the owl's brainstem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1988;85(21):8311-5.
- [11] Suga N. Cortical computational maps for auditory imaging. *Neural networks*. 1990;3(1):3-21.
- [12] Park TJ, Grothe B, Pollak GD, Schuller G, Koch U. Neural delays shape selectivity to interaural intensity differences in the lateral superior olive. *Journal of Neuroscience*. 1996;16(20):6554-66.
- [13] Joris PX, Yin T. Envelope coding in the lateral superior olive. I. Sensitivity to interaural time differences. *Journal of neurophysiology*. 1995;73(3):1043-62.
- [14] Park T, Monsivais P, Pollak G. Processing of interaural intensity differences in the LSO: role of interaural threshold differences. *Journal of Neurophysiology*. 1997;77(6):2863-78.
- [15] Goldberg JM, Brown PB. Functional organization of the dog superior olivary complex: an anatomical and electrophysiological study. *Journal of neurophysiology*. 1968;31(4):639-56.
- [16] Tsuchitani C, Boudreau JC. Single unit analysis of cat superior olive S segment with tonal stimuli. *Journal of Neurophysiology*. 1966;29(4):684-97.
- [17] Kulesza Jr RJ. Cytoarchitecture of the human superior olivary complex: medial and lateral superior olive. *Hearing research*. 2007;225(1-2):80-90.
- [18] Irving R, Harrison J. The superior olivary complex and audition: a comparative study. *Journal of Comparative Neurology*. 1967;130(1):77-86.

- [19] Aytekin M, Grassi E, Sahota M, Moss CF. The bat head-related transfer function reveals binaural cues for sound localization in azimuth and elevation. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2004;116(6):3594-605.
- [20] Obrist MK, Fenton MB, Eger JL, Schlegel PA. What ears do for bats: a comparative study of pinna sound pressure transformation in Chiroptera. *Journal of Experimental Biology*. 1993;180(1):119-52.
- [21] Firzlaflaff U, Schuller G. Directionality of hearing in two CF/FM bats, *Pteronotus parnellii* and *Rhinolophus rouxi*. *Hearing research*. 2004;197(1-2):74-86.
- [22] Jen PH-S, Chen D. Directionality of sound pressure transformation at the pinna of echolocating bats. *Hearing research*. 1988;34(2):101-17.
- [23] Griffin D, Dunning D, Cahlander D, Webster F. Correlated orientation sounds and ear movements of horseshoe bats. *Nature*. 1962;196(4860):1185-6.
- [24] Yin X, Müller R. Fast-moving bat ears create informative Doppler shifts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019;116(25):12270-4.
- [25] Qiu P, Müller R. Variability in the rigid pinna motions of hipposiderid bats and their impact on sensory information encoding. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2020;147(1):469-79.
- [26] Pye J, Roberts L. Ear movements in a hipposiderid bat. *Nature*. 1970;225(5229):285-6.
- [27] Simmons JA. The resolution of target range by echolocating bats. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1973;54(1):157-73.
- [28] Mantani S, Hiryu S, Fujioka E, Matsuta N, Riquimaroux H, Watanabe Y. Echolocation behavior of the Japanese horseshoe bat in pursuit of fluttering prey. *J Comp Physiol A Neuroethol Sens Neural Behav Physiol*. 2012;198(10):741-51. doi: 10.1007/s00359-012-0744-z. PubMed PMID: 22777677.
- [29] Schnitzler H-U, Denzinger A. Auditory fovea and Doppler shift compensation: adaptations for flutter detection in echolocating bats using CF-FM signals. *Journal of Comparative Physiology A*. 2011;197(5):541-59.
- [30] Hiryu S, Shiori Y, Hosokawa T, Riquimaroux H, Watanabe Y. On-board telemetry of emitted sounds from free-flying bats: compensation for velocity and distance stabilizes echo frequency and amplitude. *Journal of Comparative Physiology A*. 2008;194(9):841-51.
- [31] Vanderelst D, Reijnders J, Steckel J, Peremans H. Information generated by the

- moving pinnae of *Rhinolophus rouxi*: tuning of the morphology at different harmonics. *PloS one*. 2011;6(6):e20627.
- [32] Vanderelst D, Holderied MW, Peremans H. Sensorimotor model of obstacle avoidance in echolocating bats. *PLoS computational biology*. 2015;11(10):e1004484.
- [33] Walker V, Peremans H, Hallam J. One tone, two ears, three dimensions: A robotic investigation of pinnae movements used by rhinolophid and hipposiderid bats. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1998;104(1):569-79.
- [34] Gao L, Balakrishnan S, He W, Yan Z, Müller R. Ear deformations give bats a physical mechanism for fast adaptation of ultrasonic beam patterns. *Physical review letters*. 2011;107(21):214301.