

論文審査の要旨

| | | | |
|--|----------------|-------------|-------|
| 博士の専攻分野の名称 | 博 士 (理 学) | 氏名 | 平賀 隆寛 |
| 学位授与の要件 | 学位規則第4条第①・2項該当 | | |
| 論文題目 | | | |
| 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 | | | |
| 論文審査担当者 | | | |
| 主 査 | 教 授 | 坂元 国望 | |
| 審査委員 | 教 授 | 本田 直樹 | |
| 審査委員 | 教 授 | 飯間 信 | |
| 審査委員 | 教 授 | 中田 聡 | |
| 審査委員 | 教 授 | 内藤 雄基 | |
| 審査委員 | 名誉教授 | 小林 亮 (広島大学) | |
| 〔論文審査の要旨〕 | | | |
| <p>人間を含む多くの動物が主に視覚によって外界の情報を得ているのに対し、コウモリは超音波を使った遠隔探査(エコーロケーション)によってそれを行っている。コウモリは、超音波パルスを発射し、周囲の物体から返ってくる反射音を聴くことより周囲の状況を把握している。エコーロケーションを行うコウモリの発する超音波には、一定周波数(CF)の超音波と大きく周波数の変化する(FM)超音波があり、FM音のみを用いるFMコウモリと、CF音とFM音を組み合わせて用いるCF-FMコウモリに分類される。これらのコウモリは完全な暗闇の中でも、複雑な障害物を避けて飛行し、昆虫などを空中で狩るといった高度なタスクを、1送信器(口や鼻)と2受信器(両耳)というシンプルなシステムにより行なっている。</p> <p>3次元空間内で対象物を定位するには、自身からの距離と方向を知る必要がある。コウモリが超音波パルスの発射からエコーの受信までの時間間隔により、対象物との距離を認知していることは明らかになっている。一方で、方向の認知に関しては、両耳間のエコーの到達時間差、強度差、また耳介での反射による干渉パターンなど諸説があり、明確な解釈が確立していない。</p> <p>著者はCF-FMコウモリが両耳の耳介をCF部の受信に同期するように高速で動かしているという事実に着目した。この耳介運動とそれによって生じる両耳間の音圧レベル差が、対象物の方向の同定に本質的に寄与しているという仮説を理論的に検証したこと、またこのようなエコーロケーションを含むアクティブセンシングを扱う数学的な枠組みを構成したことが本論文の主たる内容である。</p> <p>耳介が運動しその方向が変わると、耳の持つ指向性が変化する。この状況をモデルで表現するために、まず無指向性マイクを複数個同一平面上に配置しその和信号を受信音とすることで一つの指向性マイクを構成した。この指向性マイクを2つ、近距離に配置したも</p> | | | |

のを両耳のモデルとすると、これらの方位を周期的に変化させ、対象物からのエコー音の音圧がどのように変化するかを計算できる。対象物の大きさや材質、距離などによる音の変化の影響を受けないこと、またコウモリの脳において両耳間の音圧レベル差を感知する部位が下オリブ核に大きな部位を占めているという生理学的事実に基づき、両耳間の音圧レベル差の経時データを最終的な受信データとした。

著者はこの問題を以下のように数学的に定式化した。両耳の周期運動 ($SO(3) \times SO(3)$ に値を取る周期関数) を与えたときに、 S^2 の部分集合 (対象物の方向からなる集合) から、同じ周期を持つ連続関数のなす空間への写像 M が与えられたことになる。音圧レベル差の経時データから、対象物の方向を精度良くかつロバストに同定できるかという問題は、観測写像 M が性質のよい逆写像 M^{-1} を持つかどうかということに帰着できる。すなわち M が単射であり、定義域の各点で縮退していなくて、かつ縮退に近い状況もないということが条件となる。この性質の良さを定量化するために、著者は新しく単射指標関数と単射度という指標を導入した。また、具体的に逆写像 M^{-1} を構成するためには、4層ニューラルネットワークを用いた教師付き学習を用いた。

著者は、さまざまな両耳の運動パターンによって生じる観測写像 M を、単射度の指標と逆写像の構成によって検証し、その結果、高精度かつロバストな3次元定位を実現する耳介運動が存在すること、またそのような定位ができるための耳介運動の条件を Roll-Pitch-Yaw 空間における両耳姿勢軌道に関する幾何学的な条件として与えることに成功した。なお、この結果は Pitch 回転が両耳で反位相になるという条件を要求しており、現実のコウモリの耳介運動の反位相性に解釈を与えたといえる。同時に単射度という指標が、観測写像の評価基準として優れたものであるということも示した。

さらに著者は、工学的な応用を見据えて固定された多マイク系による方向同定の解析、また現実のコウモリの耳の指向性を模擬したモデル耳を用いた解析なども行ない、興味深い結果を報告している。

本論文は、コウモリのエコーロケーションにおける耳介運動によるアクティブリスニングの意義を初めて理論的に示したものである。本論文での検証と生理学的な傍証から、CF-FM コウモリが耳介運動によって生じる音圧レベル差の時系列によって、方向を認知しているということが高い蓋然性をもって示された。また、アクティブセンシングによって得られる時系列のような高次元の観測データから状態量を推定する際の、一般的で有効な数学的な枠組みと指標を提案した。これらの成果は、生物のセンシングのメカニズムの理論的理解と、その工学応用を前進させるものとして高く評価できる。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士 (理学) の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

Theoretical investigation of active listening behavior based on the echo location of CF-FM bats,

Takahiro Hiraga, Yasufumi Yamada, Ryo Kobayashi

PLOS Computational Biology (to be published)