

博士学位論文審査要旨

2018年2月14日

論文題目： A Fundamental Study on Biomimetic Sensory Augmentation Based on Bat Biosonar (コウモリの生物ソナーに基づいた生物模倣型感覚拡張に関する基礎的研究)

学位申請者： 角谷 美和

審査委員：

主査： 生命医科学研究科 教授 渡辺 好章

副査： 生命医科学研究科 教授 飛龍 志津子

副査： 産業技術総合研究所 主任研究員 蘆原 郁

要 旨：

コウモリが超音波を用いて行っているエコーロケーション機能は、1送信器（鼻口）2受信器（耳）という3次元空間を計測するうえで最小限のデバイスで構成されている。しかしながらコウモリは、光の届かない複雑な地形環境中においても、飛翔する多数の他の個体と衝突することなく、生体活動に必要な採餌行動などのタスクを実現させており、この仕組みを解明することは、次世代の周囲環境センシング手法への展開として工学的にも非常に興味深い。これに対して、ヒトはコウモリほど高度ではないが聴覚による周囲環境センシング機能はある程度は有していると推定されるが、基本的には視覚優位動物であるため、視覚が作用できない環境下では周囲情報の取得は通常出来ないとされている。しかしながらその一方で、視覚障害者は、舌打ちや杖によるアクティブな音響放射を用いてその反射音から周囲の空間イメージング像を得ていることが知られており、さらに、一部の視覚障害者においては、エコーを聴くことによって視覚野が腑活され、エコーロケーション情報が脳内で視覚を代行していることが近年発見されている。

このような事実を踏まえて、著者は、生物の持つ高度なセンシング能力をヒトは取得可能かという挑戦的な課題に対してさまざまな観点からの検討を行っている。論文中において著者は、野外における採餌活動時のコウモリの高度なエコーロケーション手法のモデル化を試みると同時に、生物が持つこのようなセンシング能力のヒトへの還元を焦点をあて、ヒト視覚の聴覚による代行実現性の検討を通じた感覚拡張について論じている。特に、健常者においても、「音で見る」という新たな感覚知覚を取得できる可能性があるとの仮説に対する検討手法は、極めて独創的でありその成果も興味深い。すなわち著者は、エッジ構造は異なるが視覚からはその違いが分かりにくいターゲット群の聴覚による弁別について検討し、超音波エコーをピッチ変換して聴くことで、エコーロケーション未経験者であってもターゲットの持つエッジ形状の滑らかさを約90%の確率で知覚でき、さらには訓練を行っていない物体間においてもこのような弁別が可能であることを見出している。

本論文で得られた成果は、潜在化しているヒトの「音で見る」知覚能力を顕在化させる可能性を示唆しており、ヒトの知覚機構研究に新たな方向性を与えている。また、従来のセンシングシステムの工学手法に新たな重要な知見を与えると同時に、動物行動学の成果としても学術的に高く評価できる。よって、本論文は博士(工学) (同志社大学) の学位論文として十分に価値あるものと認める。

総合試験結果の要旨

2018 年 2 月 14 日

論文題目： A Fundamental Study on Biomimetic Sensory Augmentation Based on Bat Biosonar (コウモリの生物ソナーに基づいた生物模倣型感覚拡張に関する基礎的研究)

学位申請者： 角谷 美和

審査委員：

主査： 生命医科学研究科 教授 渡辺 好章

副査： 生命医科学研究科 教授 飛龍 志津子

副査： 産業技術総合研究所 主任研究員 蘆原 郁

要 旨：

本論文提出者は、2015 年 4 月に本学大学院生命医科学研究科医工学・医情報学専攻医情報学コース後期課程に入学、さらに同時に日本学術振興会の特別研究員 (DC1) にも就任し、各年度において精力的な研究活動を展開してきている。また、本研究科修了に必要な所定の単位を修得するとともに、英語の語学試験にも合格し、学位取得について十分な能力があると認定されている。

本論文の主要部分は、PLOS ONE 誌に既に掲載され高い評価を得ている。さらに、後期課程在学中に、6 報の国際会議ならびに 8 報の国内会議において得られた成果を報告している。また、これらの発表論文のうちの 2 報は、それぞれの学会において優秀発表賞等に選出されていることから分かるように、提出者の研究活動の質の高さは高く評価されている。2018 年 1 月 20 日午後 4 時から約 1 時間 15 分にわたり提出論文に関する学術講演会 (博士論文公聴会) が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明によりいずれも十分な理解が得られた。

さらに公聴会終了後、論文に関係した諸問題について、審査委員による口頭試験を実施した結果、提出者の十分な学力を確認することができた。

よって、総合試験の結果は合格であると判定した。

博士學位論文要旨

論文題目： A Fundamental Study on Biomimetic Sensory Augmentation Based on Bat Biosonar (コウモリの生物ソナーに基づいた生物模倣型感覚拡張に関する基礎的研究)

氏名： 角谷 美和

要旨：

ヒトは五感（視覚・聴覚・触覚・嗅覚・味覚）を用いて周囲環境をセンシングし、取得した様々な情報を脳内で相互に処理することにより、世界を知覚している。一方、ヒト以外の生物は各々が生き抜くために獲得してきた独自のセンシング手法によりヒトとは異なる情報を利用することでその生物にしか分かりえない独自の感覚で世界を知覚している。このような生物が持つセンシング能力を模倣し、ロボット工学などの工学分野へ応用することをバイオミメティクス（生物模倣技術）というが、本研究では、生物のセンシング能力を工学技術ではなくヒトに直接取得させ、感覚代行（障害などで損なわれた感覚の機能を、残された感覚で代行すること）のレベルを超えて、第六感、第七感として新たな感覚を付与することを最終的な目的としている。

ヒトと同じ陸生哺乳類でありながら、視覚情報が欠落した状態でも世界を“音で見る”ことができる生物がいる。それは、生物ソナー（SONAR; SOund Navigation And Ranging）とも呼ばれるコウモリである。コウモリは、ヒトが創造可能な技術を遥かに超える高度な超音波センシング能力を有しており、工学的観点からみるとわずか“1個の送信器（口、又は鼻）・2個の受信器（耳）・豆粒大のCPU（脳）”による非常にシンプルな構造であるにも関わらず、超音波を用いたエコーロケーション（標的からのエコーを分析して標的の存在や位置などを検出）により、周囲環境の把握や標的情報の取得を行っている。一方ヒトの世界にも、独自にエコーロケーション能力を獲得してきた視覚障害者が存在する。彼らが、自身が発する舌打ち音を用いたエコーロケーションを行いながら、バスケットボールのシュートを華麗に決める映像が動画投稿サイトに公開されるなど、世界中でヒトのエコーロケーション能力への関心が急速に高まっている。また、エコーロケーションが堪能な視覚障害者は、エコーを聴くと視覚野が賦活することが2011年に発見され、脳内でエコーロケーションによる“音で見る”という新たな感覚が彼らの失われた視覚を代行していることが明らかになった。これらの事実から私は、“音で見る”感覚知覚をヒトが新たな感覚として取得できる可能性を感じ、生物のセンシング能力をヒトに還元させる本研究の第一歩目として、まず、このエコーロケーションを用いた“音で見る”感覚知覚に着目した。

“音で見る”感覚を視覚障害者のみならず全てのヒトに授けるためには、目的（物体定位、物体同定など）に適したセンシング方法や効率のよい訓練方法を提案する必要があると考えた。エコーロケーションの模範であるコウモリは、より空間分解能の高い超音波を用いたセンシングを行うが、超音波は通常ヒトが聴くことはできない。そこで本報告ではまず、超音波を用いたエコーロケーションをヒトに体験させる音響心理実験システムを構築した。次に、提案した音響心理実験システムを用いて、エコーロケーション未経験者が、超音波でどこまで物体の違いが知覚できるのかを調べ、それぞれのタスクにおいて手掛かりとして有効なエコーの音響パラメータの分析や、その手掛かりを最大限に利用することのできる送信信号の時間周波数構造について検討した。また、上記のヒトを対象とした研究を行うにあたり、超音波を用いたセンシング方法の可能性については、エコーロケーションの模範であるコウモリの行動から学ぶことが必須だと考えた。そこで、コウモリが野外で実際に繰り返している“生物本来の能力”に基づいたユニークかつ高度なソナー行動を高度に計測し、数理モデル分析を用いて定量的に分析を行った。

本論文では上記の内容を7章構成でまとめた。以下に、各章で述べた内容を記す。

第1章では、コウモリの生物ソナー機構に関して紹介するとともに、研究の動機、目的について述べ、本論文で得られた主たる成果をまとめた。

第2章では、研究背景としてコウモリとヒトのエコーロケーションについてまとめた。コウモリのエコーロケーションに関しては、野外において採餌飛行を行うコウモリの基本的なソナー行動や、野外計測技術の発展と共に変化してきたコウモリの野外音響動態計測、さらに数理生物学分野におけるコウモリの数理研究の位置付けについても述べた。ヒトのエコーロケーションに関しては、ヒトのエコーロケーションに関する古典的な研究、舌打ち音および人工音を用いたエコーロケーション研究、コウモリとヒトの距離・角度・形状・大きさ・材質等の弁別能力の違い、デバイスを用いたヒトのエコーロケーション研究について述べた。

第3章では、野性のアブラコウモリ (*Pipistrellus abramus*) が複数の獲物に短い時間間隔で捕食する際の飛行と音響的視野の協調的制御に関する研究結果を示した。先行研究から、コウモリが野外にて短い時間間隔で獲物を捕食する際には、直近の獲物に接近飛行する際においても、複数の獲物を同時に音響的に認識している可能性が示唆されてきた。この仮説を実験的に検証するために、コウモリのエコーロケーションパルスのビーム幅（音響的視野）と獲物の角度の相互関係について検討した。結果、野性コウモリが短い時間間隔で獲物を捕食する際には、音響的視野内に複数の獲物を同時に捉えながら、直近の獲物に接近飛行していることが分かった。また先行研究で構築した数理モデルに基づいたシミュレーションから、複数の獲物を音響的視野内に捉えながら直近の獲物に接近飛行した場合に高確率で複数の獲物を捕食できることも確認できた。以上より、コウモリは音響的視線だけではなく音響的視野を積極的に利用することで、効率良く複数の獲物を捕食している可能性が示唆された。

第4章では、野性コウモリの飛行と超音波センシングの協調的制御を数理モデルとして定式化するため、第3章で得られた知見に基づいて、コウモリが野外において2匹の獲物にアプローチする際の飛行方向とパルス放射方向のダイナミクスを数理モデルとして表現した。第3章にて示した野外計測の結果と、今回構築した数理モデルに基づいて、数値シミュレーションにより実際のコウモリの行動と数理モデルとの整合性の検証を行った。結果、実験データと同様にコウモリが先の獲物に対してパルスを放射しながら接近飛行を行う際には、2匹の獲物を見失うことなく短時間で連続して捕食できることを確認した。加えて、直近の獲物だけにパルスを向けた際には先の獲物を見失うため、2匹の獲物を連続して捕食できないことも確認した。

第5章では、コウモリが行う超音波帯域でのエコーロケーションをより臨場感を持たせてヒトに体験させるために、超音波バイノーラルエコーを用いた音響心理実験システムを確立した。ここで超音波バイノーラルエコーとは、標準サイズのダミーヘッドを縮小したミニチュアダミーヘッド (Miniature Dummy Head, MDH) を用いて超音波帯域でバイノーラル録音したエコーのことを指し、被験者には、MDHの縮小率に合わせて時間軸を伸長後、ヘッドフォンを通して可聴音として呈示する。当該システムに基づいて、材質や表面構造が異なる物体を弁別させる音響心理実験を行ったところ、エコーロケーション未経験者であっても、視覚でも違いが分かる材質や表面構造が異なる物体を広帯域な超音波でも弁別できることがわかった。

第6章では、視覚ではその違いが分かりにくい物体であっても超音波を用いることで弁別ができるのかを調べた。ターゲットとして用いた物体は、陰影の情報がない状態である方向から見ると視覚では全て同じ長方形に見えるような、エッジ形状の異なる木棒とした。結果、超音波を含む高周波帯域のエコーをピッチ変換して聴くことで、エコーロケーション未経験者であってもエッジ形状の滑らかさを約90%の確率で知覚できた。また、訓練を行っていない物体間においても弁別可能であることを見出した。これは、エコーロケーションにおいて重要な能力であると考えられる。次に、物体同定に必要な物理パラメータである形状・テクスチャー・材質それぞれの弁別において、手掛かりとなるエコーの音響特徴量やその音響的手掛かりを効果的に知覚するため

の信号設計に関する考察を行った。結果、全被験者の平均正答率を比較すると、形状弁別、テクスチャー弁別は約 70%、材質弁別では約 50%の平均正答率であった。またエコーの周波数分析および一般化線形混合モデルを用いた統計分析から、形状弁別ではラウドネス、テクスチャー弁別では音色を被験者が手掛かりにすることで弁別できていたことがわかった。材質弁別においては、効果的な手掛かりがなかったことから正答率がチャンスレベル (50%) と同等であった。またラウドネスの手掛かりをなくした状態で形状弁別実験を行ったところ、ラウドネスを手掛かりにできる状態での正答率と比較すると全信号の平均正答率は約 17%低下した。しかし、一部の被験者においては、ラウドネスの手掛かりをなくした状態でも広帯域信号を用いた場合では正答率はチャンスレベルよりも約 10%以上高かった (CF 音はチャンスレベル以下)。これより、ラウドネスを手掛かりにできない状況でも、音色などのラウドネス以外の手掛かりで補うことができる可能性が示唆された。

第7章では、本論文の成果を総括し、その有用性や今後の課題などについて示した。

以上の結果より、本論文に取り組むにあたり、コウモリのエコーロケーションを用いた“音で見る”感覚知覚をヒトに還元させる新たな研究の第一歩目を踏み出すことができたと考えられる。人工知能がヒトの能力を超えようとする現代社会において、本研究をさらに拡張させていくことで、コウモリに限らず様々な生物が生きるために洗練させてきたユニークなセンシング能力をヒトに還元させる新たな研究の一分野を開拓できると考えられる。