

博士学位論文審査要旨

2017年2月14日

論文題目： A Study on Cheap Robust Sensing for Obstacle Avoidance Guidance Based on Bio-Sonar Strategy of Bats (コウモリのソナー戦略を模倣した障害物回避行動のためのチープロバストなセンシングに関する研究)

学位申請者： 山田 恭史

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 准教授 飛龍 志津子

副査： 広島大学大学院理学研究科 教授 小林 亮

要旨：

生物が生来的に有する洗練された優れた機能を詳細に分析・解析することによって得られる新たな知見は、次世代の高度技術社会実現へ向けた基盤技術として期待されている。特に、コウモリの超音波によるエコーロケーション機能は、1送信2受信器という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にもかかわらず、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、次世代センシング技術獲得への展開として非常に興味深い。

本論文において著者は、障害物環境下でセンシング飛行するコウモリの、空間への“慣れ”に着目した分析を行っている。これは脳機能に基づいた生物特有の行動記憶のふるまいをセンシング技術に組み込もうとする提案であり、従来の無機物で構成されるシステムとは一線を画す新たな技術構築への展開が期待できる。著者は、コウモリの飛行においては、時間の経過に伴う行動空間記憶が蓄積され、この情報を用いて周囲環境へ合理的に適応していく行動が最も生き物らしいふるまいの一つであるとの考えに立脚し、未知の空間と既知の空間を飛行するコウモリのセンシング行動の差分を分析している。著者は、未知と既知の空間に対するパルス放射方向のより適切な注意空間の切り替えを要する障害物コースを対象として、繰り返し飛行するコウモリの試行回数増加に伴うふるまいの変化について詳細な分析を行っている。この結果、コウモリは飛行軌道の蛇行を抑え、飛行速度を上昇させるように自身の飛行を適応させていくこと、ならびに最初と最終試行の比較からパルス放射数を約半分まで減らしていることを見出している。

これらを実証モデルとして検討するために著者は、コウモリと同様の1送信、2受信器の超音波センサからなる自律走行車を作成し、未知空間で飛行するコウモリの行動原理を模倣したアルゴリズムを搭載することでその効果を検証している。障害物コースにて走行実験を行った結果、提案アルゴリズム搭載車と従来アルゴリズム搭載車のコースの走破成功率はそれぞれ、73%、13%となることを示し、著者の提案手法の有効性を立証している。

本論文で得られた成果は、従来のセンシングシステム設計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

2017年2月14日

論文題目： **A Study on Cheap Robust Sensing for Obstacle Avoidance Guidance Based on Bio-Sonar Strategy of Bats**

コウモリのソナー戦略を模倣した障害物回避行動のための
チープロバストなセンシングに関する研究

学位申請者： 山田 恭史

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 准教授 飛龍 志津子

副査： 広島大学大学院理学研究科 教授 小林 亮

要 旨：

本論文提出者は、2013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に入学し、それぞれの年度において優れた研究成果を挙げている。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その能力についても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、Journal of Comparative Physiology A誌等の当該分野の有力誌に掲載されている。さらに、後期課程在学中に、3報の国際会議ならびに7件の国内会議で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、その論文内容の質の高さは高く評価されている。2017年1月21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。

博士学位論文要旨

論文題目： A Study on Cheap Robust Sensing for Obstacle Avoidance Guidance
Based on Bio-Sonar Strategy of Bats

コウモリのソナー戦略を模倣した障害物回避行動のための
チープロバストなセンシングに関する研究

氏名： 山田 恭史

要旨：

コウモリは超音波パルスを放射し、周囲から返る反響音を聴取、分析することで空間把握を行っている。特に、1送信2受信器の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にもかかわらず、アットランダムな地形環境の中で同時に飛翔する他の個体と衝突することなく、採餌行動などの野外生活に必要なナビゲーションのタスクを実現させている。本研究の目的は、シンプルなデザインで、柔軟な飛行を実現させるコウモリの“チープロバスト”なセンシングのノウハウを明らかにし、工学的にも有用なシステム、アルゴリズムへと応用することである。この目的を達成するために、本研究では、1)コウモリのふるまいからその行動の真意を探る行動実験と、2)推察された行動原理に基づき数理アルゴリズムを構築し、自律走行車のふるまいからその効果について理解を深める検証実験の両方を実施した。

特に、障害物環境下でセンシング飛行するコウモリの、空間への“慣れ”に着目した分析を行った。時間の経過とともに空間記憶が蓄積され、周囲環境へ合理的に適応していく行動は、最も生き物らしいふるまいの一つであると考えられる。また、未知の空間と既知の空間を飛行するコウモリのセンシングのふるまいの差分を分析することで、両空間に対する本質的なナビゲーションの戦略について検討することが可能となる。生き物の合理的なナビゲーションの意思決定メカニズムを人工システムへ模擬搭載することが可能になれば、現状のシステムでボトルネックとなっているセンシング情報量肥大化等の問題に貢献できると考えられる。

第三章では、障害物環境下において長時間飛行するコウモリの飛行経路、パルス放射タイミング、パルス放射方向を計測し、時間経過に伴う飛行、および、音響センシングの変化について分析を行った。その結果、コウモリは、飛行開始から約20-30秒までに同じ軌道を繰り返すように飛行経路を安定させ、当初のおよそ半分にまでパルス放射頻度を減少させていたことが分かった。このコウモリは、パルス放射時間間隔 (IPI) について長短 (longer IPI, shorter IPI) を繰り返すユニークなセンシングを行い、短い時間間隔でパルス群を連射するマルチプルパルスを頻繁に放射することが報告されている。詳細なパルス放射タイミングの分析の結果、1)longer IPIの伸長、および、2)トリプルパルスをシングルパルスへ置き換えることでパルス放射頻度を減少させていたことが分かった。特に、トリプルパルスがシングルパルスへ置き換わった一場面の比較から、トリプルパルス放射時には、障害物から障害物へと直接オブジェクトを狙うように放射されていたのに対し、シングルパルスに置き換わった後では、複数の障害物を同時に指向性の幅 (音の視野) へ収められる方向へパルス放射する傾向が見られた。これらの飛行経路・パルス放射タイミング・放射方向の分析から、コウモリは周囲空間を記憶し、構築された記憶を用いることで自身の飛行経路、および音響センシングを飛行環境に適応させる戦略を有していることが本報告により示唆された。

第四章では、未知と既知の空間に対するパルス放射方向の具体的なふるまいの違いを明らかにするため、より適切な注意空間の切り替えを要するS字型の障害物コースを作成し、その中を繰り返し飛行するコウモリの試行回数増加に伴うふるまいの変化について詳細な分析を行った。こ

の結果、コウモリはS字飛行軌道の蛇行を抑え、飛行速度を上昇させるように自身の飛行を適応させていくことが分かった。さらに、最初と最終試行の比較から、前章同様にパルス放射数を約半分まで減らしていたことが分かった。特に今回は、1) Longer IPI の有意な伸長は見られず、2) トリプルパルスの減少だけが観測された。また、3) シングルパルスは全コウモリの全試行を通してほとんど放射されていないこともわかった(含有率は全パルス数の1%未満)。本章の実験環境は前章に比べ高密度の障害物環境であったことから、あらゆる障害物からのエコー群が折り重なって返る環境下(クラッター環境下)では、Longer IPI を伸長させる戦略とシングルパルスを放射する戦略は適さないことが示唆される。一方で、両章通じて Shorter IPI の伸長はほとんど見られず、ダブルパルスは環境への慣れの有無にかかわらず高頻度に放射されていた。すなわち、1)ダブル・トリプルパルスは可能な限り短い時間間隔でパルスを連射し、瞬時に得た連射パルス間のエコー情報をやり取りすることで煩雑な複数の障害物群の定位に役立てている可能性が考えられる。特に、2)ダブルパルスはクラッター環境を攻略する際に必要な最小単位のマルチプルパルスであることが示唆される。これらを踏まえてパルス放射方向の分析を進めた結果、最初の試行では放射方向を時分割的に大きく振り分ける傾向が見られたのに対し、最終試行では自身の進路方向の先へ向けて滑らかにパルス放射方向を変化させ、放射するパルス音圧についても最初の試行に比べ平均で約+4dB 強くなっていることが分かった。すなわち、初期試行での探索的なパルス放射により周囲空間を記憶した結果、コウモリは飛行先にあるより遠くの空間へ向けて注意を払うセンシングへと変化していったことが分かる。特に、未知空間を飛行するコウモリは、ダブルまたはトリプルパルスを用いて自身の進路方向先と障害物方向を交互にスキャンする様子が障害物レイアウトによらず共通して頻繁に観測される。これらの結果から、短い時間間隔のマルチプルパルスを1)障害物へ向けることでターゲットの正確な定位を行い、2)進路方向先へ向けることで自身のルート先の安全を確認する、“ハイブリッドなセンシング”が安全な未知空間飛行を実現させるための行動原理であると考えられる。本章の分析により、未知と既知の環境においてコウモリがセンシングする空間を適応的に変化させることを明らかにし、それらの時空間分析から、マルチプルパルスとパルス放射方向の関係性を初めて明らかにした。

第五章では、コウモリのふるまいを模倣した数理アルゴリズムを作成するために、基盤となる障害物回避モデルの構築を行った。特に、コウモリは一度のパルス放射により複数の障害物から返るエコー群を受信しており、障害物から障害物へと選択的にパルス放射方向を切り替える行動が見られることから、受信したエコー群から同時に複数の障害物の定位を行っていると考えられる。そこで、複数の障害物の情報を利用し安全な方向へ回避する数理モデルを構築し、数値計算による数理モデルの評価を行った。その結果、1)実際のコウモリの飛行速度、IPI、ビーム幅をパラメータとして用いてS字の障害物コースを通り抜けるふるまいを再現できること、2)ビーム幅に対して適切な IPI を選択することが未知空間でのナビゲーションにおいて重要であること、さらに、3) モデルを拡張することで移動方向に対してパルス放射方向を先行させるコウモリのふるまいも再現できることが確認できた。これらの結果から、コウモリ模倣アルゴリズムの基盤モデルとしての有用性を示すとともに、コウモリのセンシング飛行の最適性を検討するうえでも有効な分析ツールであることを示した。

第六章では、1 送信、2 受信器の超音波センサからなる自律走行車を作成し、未知空間で飛行するコウモリの行動原理を模倣したアルゴリズム(ダブルパルススキャニングアルゴリズム)を搭載することでその効果を検証した。具体的には、1)進路方向と自身の位置座標から最も近い障害物の方向へ交互にセンシングを行う、2)2 回のセンシングで定位した障害物の情報(重複して定位された障害物も情報加算する)を用いて回避方向の決定を行うアルゴリズムを設計した。比較対象用として作成した従来法のアルゴリズムを併用し、障害物コースにて走行実験を行った結果、コースの走破成功確率は提案法が73%(73/100回)であったのに対し、従来法は13%(13/100回)しか通り抜けられなかった。提案法がロバストなナビゲーションを実現できた効果について

検証した結果、1)提案法は最接近する障害物へ向けたパルス放射により、衝突する危険性が最も高い障害物を見失う確率が低く抑えられたこと、2) 時分割的な放射方向の選択により空間スキヤニング面積が拡大されコースアウトしにくかったこと（空間積分的効果）、3)ダブルセンシングで重複して定位された（すなわち、進路方向付近にある）障害物からより強い斥力の重みがつけられ、その障害物への接近を防いでいたこと（時間積分的効果）が挙げられる。これらの結果から、マルチプルパルスを用いた時分割的な空間スキヤニングを実践することで、その行動に隠された具体的な効果を明らかにするとともに、チープデザインセンシングにおいては少しのルールの差が大きな効果の違いにつながるということが明らかにできた。

第七章では、本研究を総括し、今後の展望について述べた。コウモリの飛行計測から、コウモリには超音波センシングを飛行とともに周囲環境へ適応させる能力があり、未知空間と既知空間では周囲空間のスキヤニング手法に違いがあることを明らかにできた。さらに、ふるまいを推察するだけでは見出すことが困難な具体的な効果について、実機検証により定量的に評価することができた。一連の空間適応メカニズムやマルチプルパルスとその放射方向の選択機序など、今後検討すべき課題は数多く存在する。しかし、一研究者がコウモリの行動計測から実機検証に至るまで検討を行った研究の例はなく、本研究は世界に先駆けたコウモリのナビゲーションに対するバイオミメティクス研究である。