

補助事業番号 2024M-419

補助事業名 2024年度 昆虫嗅覚と飛行ロボットの融合による革新的匂いナビゲーション
技術の開発 補助事業

補助事業者名 照月 大悟

1 研究の概要

本事業は、視覚による探索が困難な環境下においても機能する新たな技術として、昆虫の卓越した嗅覚能力と飛行ロボットを融合し、匂いに基づくナビゲーション技術の確立を目指すものである。具体的には、(A) 環境中の複雑な匂い分布を高精度に追従できるバイオハイブリッド型匂いセンサシステムの開発、(B) 匂い情報の効率的な取得と追跡に適した飛行推進構造(回転翼型ドローンを基準)の構築を行う。最終的にこれらを統合し、従来の画像ベースセンサでは困難だった匂い源の特定や追跡を可能とする、新原理の匂いナビゲーション技術を実現する。本技術は、災害時の要救助者探索や危険物質の検出など、幅広い応用が期待される。

2 研究の目的と背景

【背景】

社会インフラの維持管理や災害現場での情報収集では、立ち入りが困難または危険な環境下での作業が求められる場面が多く、高い操作性と機動性を有するドローンの活用が期待されている。特に日本においては、少子高齢化に伴う労働力不足への対応として、ロボットによる点検作業の自動化・効率化は喫緊の課題である。しかし、これらの現場では暗所・湿潤環境・粉塵といった外乱要因が存在し、既存の画像ベースのセンサ(カメラ、LiDARなど)に依存したドローン制御には限界がある。また、画像情報は可視対象の把握には有効だが、ガス漏れなどの不可視リスクには対応できない。一方で生物は、視覚以外の感覚、とりわけ匂いを用いたナビゲーション能力に長けている。例えば、ガルのオスは数百メートル離れた場所からメスのフェロモンを感知し、その匂い情報を頼りに飛翔・到達する行動が知られている。このような匂いに基づく探索能力は、現在の飛行ロボットには備わっておらず、技術的ブレークスルーが強く求められている。

【目的】

本事業の目的は、暗所・湿潤・粉塵など既存の画像ベースセンサが機能しにくい過酷環境においても、飛行ロボットが自律的に移動・探索できるナビゲーション技術の確立である。具体的には、生物由来の匂い検出機構と飛行ロボットの融合により、従来の画像センサ依存の制御方法を補完する匂いベースのナビゲーション技術を実現し、社会インフラ維持や災害対応におけるドローンの運用可能性を飛躍的に拡張することを目指す。

3 研究内容

(1) ゲイン可変EAGセンサの開発とドローン搭載

(https://bio-hybrid.org/research/research_357.html)

環境中の匂い濃度に応じて自律的にゲイン調整が可能な小型EAGセンサ(匂いセンサ)を開発した。本センサは、昆虫の触角両端に電極を接続し、匂い刺激に対する電氣的応答(電圧変化)を計測する触角電図(Electroantennogram: EAG)技術に基づいている。匂いセンサ素子としては、極めて高い感度を持つオスのカイコガの触角を用いた。この小型EAGセンサを飛行ロボットに搭載することで、昆虫の嗅覚機能を統合したバイオハイブリッドドローンを実現した。本事業ではさらに、これを発展させた第2世代の次世代匂い追跡ドローンの開発に至った(図1)。

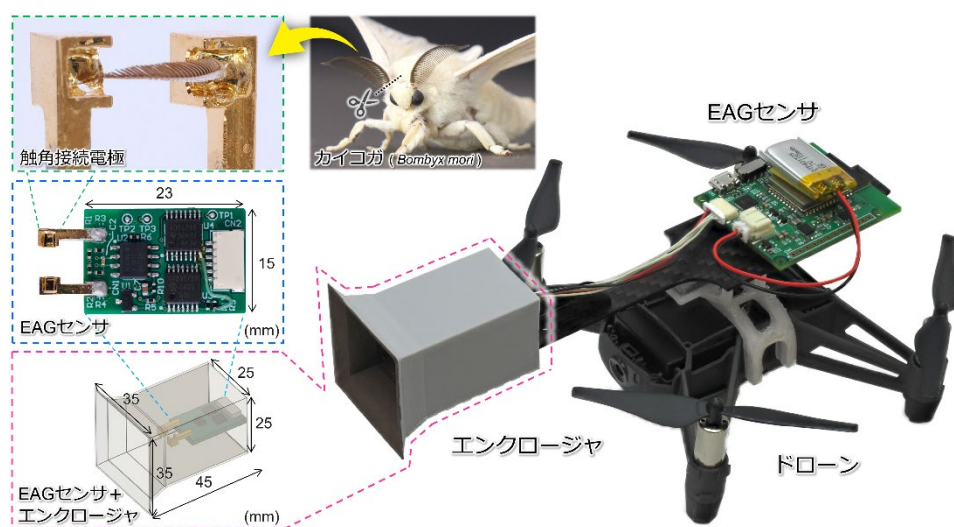


図1 カイコガ触角を搭載した次世代匂い追跡ドローンの全体図

(2) 次世代匂い追跡ドローンによる匂い源探索

(https://bio-hybrid.org/research/research_357.html)

昆虫の匂い源探索行動を参照することで、ドローンの匂い追跡能力を向上させる、2つの重要な要素を明らかにした。

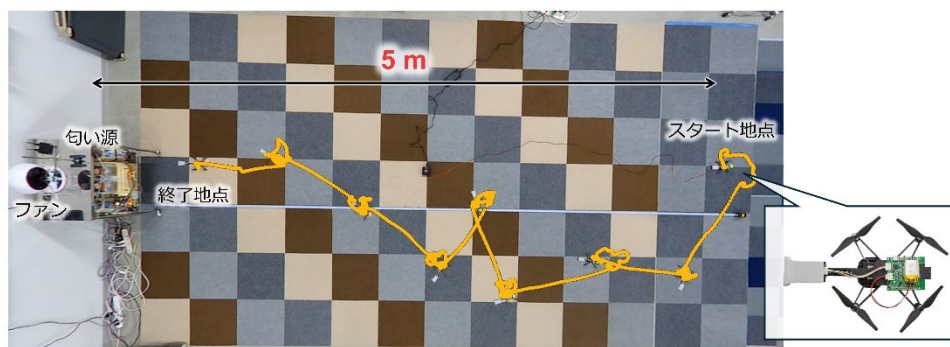


図2 次世代匂い追跡ドローンによる5mの距離からの匂い源探索の飛行軌跡

1. 匂いセンサをエンクロージャに格納し、匂いの方向感知能力を高めること
2. 戦略的に動きを停止する、生物に学んだ「段階的回転アルゴリズム」を導入すること

これらを統合した次世代バイオハイブリッドドローンは、探索精度が2倍以上に向上し、最大5 mの距離から匂い源を探索することに成功した(図2)。

(3)ドローン周囲の流れ解析

(https://bio-hybrid.org/research/research_357.html)

メスのフェロモンを高感度に検出するオスのカイコガは、羽ばたきによって気流を制御し、匂いを含む空気を前方から触角に向けて選択的に導くことが明らかになっている。このメカニズムを飛行ロボットに応用するため、小型EAGセンサをエンクロージャ内に格納し、流れの選択的な誘導とセンサの保護を両立する構造を開発した。これにより、センサの方向感知能力が強化された。スモークによる可視化実験からも、本エンクロージャが気流を乱さず、匂いを安定的に誘導する構造であることが確認された(図3)。

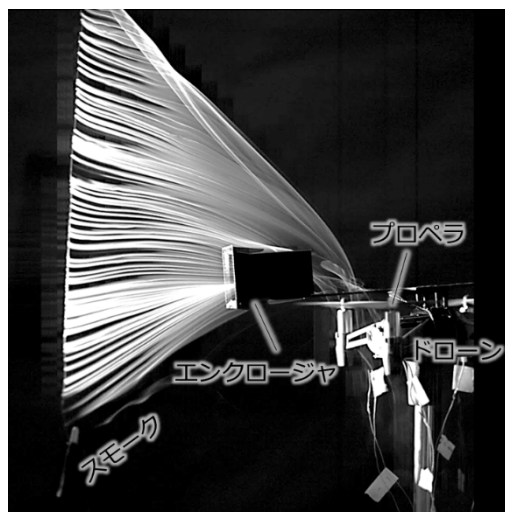


図3 次世代匂い追跡ドローンによる5 mの距離からの匂い源探索の飛行軌跡

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本事業で開発する匂いナビゲーション技術は、画像センサが機能しにくい暗所・湿潤・粉塵環境においても、飛行ロボットが柔軟かつ自律的に移動・探索を行うための新たな手段を提供する。これにより、倒壊建物内などの災害現場での要救助者探索、プラント施設におけるガス漏れ検知など、危険で人の立ち入りが困難な現場における情報収集が大幅に効率化される。また、従来の画像ベースセンサでは捉えきれない匂い情報を活用することで、インフラの維持管理、環境モニタリング、防災など幅広い分野への展開が期待される。さらに、本技術はバイオハイブリッドセンサという新しい技術基盤に立脚しており、今後、センサデバイス産業における新市場の創出やスタートアップによる事業化も見込まれる。本研究は学術的意義にとどまらず、実社会への実装を通じた産業的・社会的波及効果が大きい。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

申請者はこれまで、生物が持つ卓越した感覚機能に着目し、特に昆虫の嗅覚器官である触角を活用したバイオハイブリッド型匂いセンサの開発に取り組んできた。これには、触角応答を電氣的に検出するEAG技術を応用した、電極設計からセンサデバイスの構築、さらには匂い刺激に対する応答の再現性・選択性の定量評価までを系統的に進めてきた。さらに、これらのセンサを小型ドローンに搭載し、匂い源探索を目的とした移動プラットフォームの初期的な実証にも成功している。

本事業では、これまでの匂い検出技術を一步進め、単なるセンシングにとどまらず、匂い情報に基づくナビゲーション技術の構築に挑戦している。具体的には、匂いの濃度勾配や分布変化といった環境中で絶えず変化する匂い情報をリアルタイムに検出し、飛行ロボットがその情報をもとに自律的な経路判断を行うシステムの構築を目指す。センサ、制御、推進の各要素を高度に統合することで、視覚に頼らずに環境を認識して移動可能な新たなナビゲーション原理の確立を図るものであり、本研究は、生物機能とロボティクスを融合させた応用志向型研究への転換点となる重要なステップと位置づけられる。

教育面では、これまでバイオハイブリッド工学を軸とした研究指導を展開しており、学生に対しては、昆虫触角の単離から電極設計、信号計測・データ処理、そしてロボットへの統合に至るまで、一貫した実験・設計プロセスを指導してきた。今回の研究成果は、こうした教育内容の深化にもつながるものであり、将来的には生物機能を活用した次世代の工学教育のモデルケースとして、研究と教育の両面からの波及が期待される。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

【査読付き英語論文】

- [1] C. Fukui, T. Uchida, S. Koizumi, Y. Murayama, H. Liu, T. Nakata*, D. Terutsuki*, Advanced bio-hybrid drone for superior odor-source localization: high-precision and extended-range detection capabilities. *npj Robotics* 3 4 (2025). *Authors for correspondence. **Selected as Hero image.**
- [2] T. Nakata†, D. Terutsuki†, C. Fukui, T. Uchida, K. Kanzaki, T. Koeda, S. Koizumi, Y. Murayama, R. Kanzaki, H. Liu, Olfactory sampling volume for pheromone capture by wing fanning of silkworm moth: a simulation-based study. *Scientific Reports* 14 (2024) 17879. †Double first and corresponding authors.

【招待講演】

- [1] D. Terutsuki (Keynote Speaker), Insect antenna-integrated bio-hybrid drone for odor detection: from fundamental research to practical applications. *2024 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS)*, Nagoya, Japan, 20–22 November 2024.
- [2] 照月大悟, 昆虫の嗅覚を活用した匂いセンサ・嗅覚飛行ロボット, 一般財団法人浅間リサーチエクステンションセンター 第23回産学交流ラウンジ, 長野, 2024年9月4日.
- [3] 照月大悟, バイオハイブリッドを基盤としたロボット・センサ技術の創出, 化学とマイクロ・ナノシステム学会 第49回研究会 (CHEMINAS 49), 東京, 2024年6月2日.
- [4] 照月大悟, 嗅覚飛行ロボットの開発と実環境への適用に向けて, 第36回バイオエンジニアリング講演会, 愛知, 2024年5月12日.

【国際学会発表】

- [1] D. Terutsuki, C. Fukui, S. Murakami, T. Nakata, Basic characterization of a human odor detection sensor utilizing mosquito chemoreceptors, *The 9th International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC 2024)*, Bangkok, Thailand, 26–28 November 2024.
- [2] C. Fukui, T. Nakata, D. Terutsuki, Enhanced bio-hybrid drone for long-range odor source localization, *The 9th International Symposium on Aero-aqua Bio-Mechanisms (ISABMEC 2024)*, Bangkok, Thailand, 26–28 November 2024.
- [3] D. Terutsuki, Bio-hybrid aerial odor-detecting robot for odor source localization, *XXVII International Congress of Entomology 2024 (ICE2024)*, Kyoto, Japan, 25–30 August 2024 (Oral).

【国内学会発表】

- [1] 安藤竜生, 福井千海, 小原慧, 照月大悟, 中田敏是, 高橋英俊, 昆虫の触角に着想を得た気流と匂いが同時計測可能なセンサ, 第41回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 宮城, 2024年11月.
- [2] 村上颯一郎, 福井千海, 中田敏是, 照月大悟, 吸血性昆虫の嗅覚を利用したヒト臭検出センサの基礎特性評価, 日本機械学会 第35回バイオフィロンティア講演会, 神奈川, 2024年12月.
- [3] 寺田拓真, 百瀬俊介, 福井千海, 中田敏是, 照月大悟, 触角電図を用いたアレイ型匂いセンサの開発と基礎特性評価, 日本機械学会 第35回バイオフィロンティア講演会, 神奈川, 2024年12月.
- [4] 福井千海, 近藤匠, 村上颯一郎, 照月大悟, 劉浩, 中田敏是, ヒト探索ロボットのための長距離ヒト臭検出技術の開発, 日本機械学会 第35回バイオフィロンティア講演会, 神奈川, 2024年12月.
- [5] 神崎晃平, 福井千海, 照月大悟, 劉浩, 中田敏是, 追尾型撮影システムによる昆虫の匂い源探索行動の3次元運動解析, 日本機械学会 第35回バイオフィロンティア講演会, 神奈川, 2024年12月.
- [6] 島川星也, 近藤匠, 小枝大桃, 福井千海, 照月大悟, 劉浩, 中田敏是, 雌の蚊の触角形態が匂い分子捕捉性能に及ぼす影響, 日本機械学会 第35回バイオフィロンティア講演会, 神奈川, 2024年12月.

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

特になし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

特になし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 信州大学繊維学部(シンシュウダイガクセンイガクブ)

住 所: 〒386-8567

長野県上田市常田 3-15-1

担 当 者: 照月大悟(テルツキダイゴ)

担 当 部 署: 機械・ロボット学科(キカイ・ロボットガクカ)

E - m a i l: terutsuki@shinshu-u.ac.jp

U R L: <https://bio-hybrid.org/>