

2025年2月19日

配信先: 文部科学記者会、科学記者会、千葉県政記者クラブ、
長野市政記者クラブ、松本市政記者クラブ、地方新聞記者会

国立大学法人信州大学
国立大学法人千葉大学

進化した次世代匂い追跡ドローン ～昆虫の技術を駆使した世界最高性能モデルが新記録を樹立！～

ポイント

- 生きた昆虫触角を匂いセンサに用いた、世界最高性能の次世代バイオハイブリッドドローンを開発し、空中に漂う匂いを追跡する高度なドローンナビゲーションに成功。
- 昆虫からヒントを得て、①匂いセンサを特別なエンクロージャ(カバー)で覆い、②戦略的な停止動作を導入した探索アルゴリズムを実装したことで、匂い追跡の精度と範囲が飛躍的に向上。
- 探索範囲は最大5mに達し、小型ドローンによる匂い源探索の世界記録を樹立。
- 本技術は、災害現場などにおいて要救助者を匂いによって迅速に捜索する、新しい災害救助システムとしての活用が期待。

概要

信州大学繊維学部 機械・ロボット学科の照月大悟准教授と、千葉大学大学院工学研究院の中田敏是准教授、同大学院融合理工学府博士後期課程2年の福井千海氏らの研究グループは、生きた昆虫の触角を使った嗅覚飛行ロボット(バイオハイブリッドドローン)を開発し、匂いの発生源を探索する研究を進めています。本研究では、使用する匂いセンサと探索アルゴリズムを大幅に改良し、世界最高性能の次世代バイオハイブリッドドローンの開発に成功しました(図1)。

バイオハイブリッドドローンは、生物の優れた嗅覚(例:触角)と小型ドローンを融合した革新的なシステムです。このシステムは、従来のカメラやレーザー技術を補完し、匂いを使ったナビゲーションを行

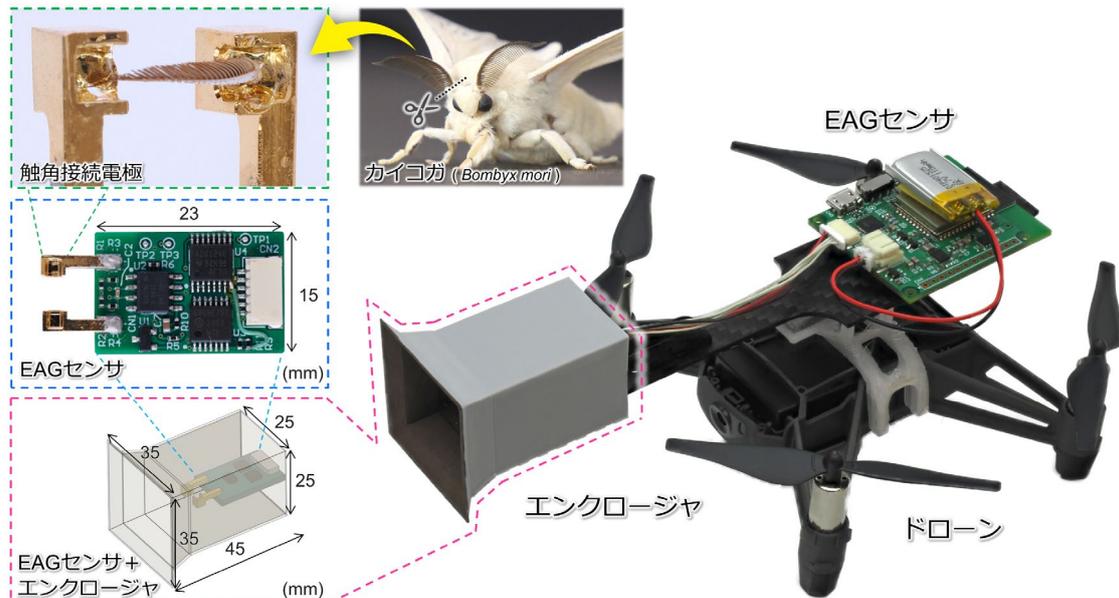


図1 次世代バイオハイブリッドドローンと各構成要素の写真

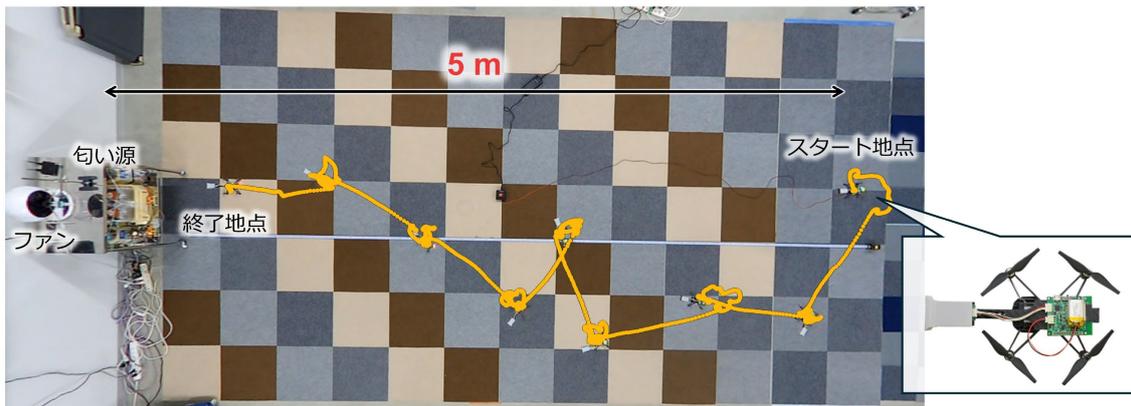


図 2 段階的回転アルゴリズムによって匂い源探索を行う次世代バイオハイブリッドドローンの飛行軌跡

うことが特徴です。本研究では、生物が行う匂い源探索行動からヒントを得て、ドローンの匂い追跡能力を向上させる、以下 2 つの重要な要素を明らかにしました。

1. 匂いセンサを特別なエンクロージャ(カバー)で覆い、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、探索距離は最大 5 m に達しました(図 2)。この成果は、直径 10 cm 程度の小型ドローンによる匂い源探索の世界記録です。このドローンは、カメラなどの画像情報の利用が困難な災害環境において、匂いを利用して要救助者を発見する新しい災害救助システムの実現に貢献すると期待されます。

本研究成果は、ネイチャー・パートナー・ジャーナル(npj)のロボット系雑誌である npj Robotics に、令和 7 年 2 月 5 日に公開されました。

背景

動物や昆虫にとって「嗅覚」は生存に欠かせない感覚であり、食料探しや繁殖行動に大きな役割を果たしています。例えばガ類のオスは、風に乗って漂うメスのフェロモンを頼りに、時には数 km 離れた場所にいるメスを見つけ出します。このような行動は「匂い源探索行動」として知られており、空気中の断続的な匂いを手がかりに目的地を見つける能力です。

ドローンは一般的に、熱画像やレーザー・スキャナなどの画像ベースのセンサを用いて飛行を制御しています。しかしこれらのセンサは、暗い場所や粉塵、高湿度といった悪条件下では性能が低下することがあります。そこで、匂いを利用したドローンのナビゲーション技術が注目されています。この技術は、既存の画像ベースのセンサを補完し、ドローンの新たな可能性を切り開くことが期待されます。例えば、災害現場での要救助者探査、インフラ点検(例:ガス漏れの検知)、危険物質(例:麻薬、爆発物)の特定などへの応用が考えられます。

2021 年に照月准教授らの研究チームは、生きたカイコガの触角を小型ドローンに搭載し、匂いの濃度と匂いが来る方向を識別しながら匂い源を探索することに、世界で初めて成功しました^(文献 1)。しかし、当時のドローンは探索範囲が 2 m 程度に限られており、より広い範囲を精度よく探索するための技術革新が必要となっていました。

研究成果

本研究では生物の匂い源探索行動をヒントに、バイオハイブリッドドローンの匂い追跡能力を強化する、2つのカギとなる要素を明らかにしました。また、匂いセンサ、触角を接続する電極、探索アルゴリズムを総合的に見直すことで、世界最高性能を誇る次世代バイオハイブリッドドローンを開発し、匂い源探索の世界記録を樹立しました。

【要素1: 匂いセンサの方向感知能力の強化】

カイコガは、羽ばたきによって気流をコントロールし、匂いが含まれる気流を自身の前方から触角に対して選択的に誘導します^(文献²⁾)。一方でドローンは、プロペラ飛行によって対称的な流れが発生するため、匂いが来る方向を判断することが困難です。そこで昆虫の羽ばたき効果に着目し、匂いセンサに特別なエンクロージャ(カバー)を取り付けることで、羽ばたき効果の一部を再現しました。これによりドローンは、匂い源方向に向かって左右45°の範囲でより強く匂いを検出するようになりました(過去モデルは左右90°の範囲)(図3A)。結果として、ドローンの匂い源方向の推定精度が向上しました。また、スモーク実験の結果から、開発したエンクロージャは流れを乱さない構造であることが示されました(図3B)。

【要素2: 戦略的に動きを停止する探索アルゴリズム】

昆虫は匂いを探す際に、動き続けるのではなく「停止」することが調べられています。一方で停止という動作は、ロボットによる探索では見落とされがちな要素でした。本研究では、自然界で観察される昆虫の動きをヒントに、戦略的に一時停止(ホバリング)を組み込んだ回転動作と、一定距離(0.7 m)を直進する動作を交互に繰り返す「段階的回転アルゴリズム(Stepped rotation algorithm)」を開発しました(図4)。ドローンは、回転スキャン中に取得した匂い情報(EAGセンサ^(注1)の値+ドローンの角度)を計算することで、匂い源方向を推定してその方向に直進します。このアルゴリズムを実装したドローンは、エンクロージャの効果も相まって、探索精度(匂い源定位成功率)が過去モデルの2倍以上に向上しました(図4)。

上記の発見に加えて、匂いセンサとして用いるカイコガ触角を接続したEAGセンサは、回路構成と電

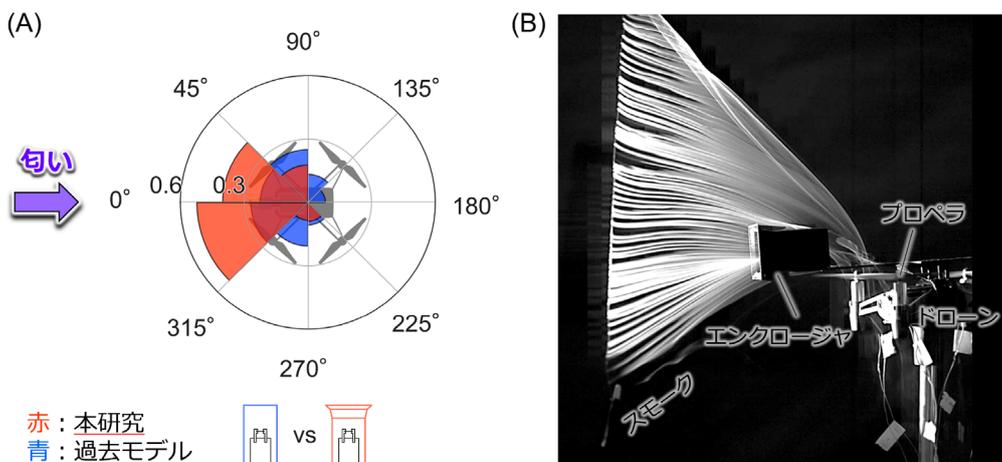


図3 (A)匂いセンサ×エンクロージャの方向感知能力 (B)エンクロージャ周囲の流れ解析

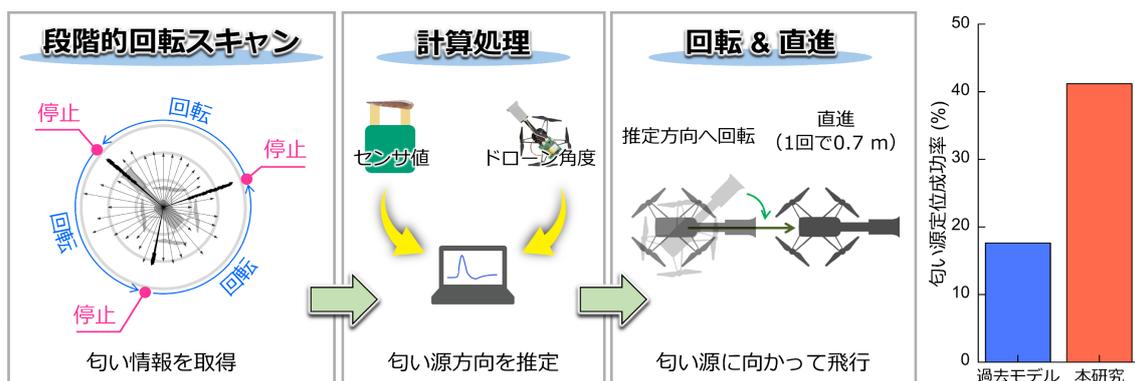


図4 段階的回転アルゴリズム(Stepped rotation algorithm)の模式図と探索精度比較グラフ

極構造の両面から大幅に強化されました。触角からの信号値は小さいため、適切な増幅(ゲイン)が必要です。本研究のEAGセンサ回路には、ゲイン値を変更可能な可変型アンプ^(注2)を実装しました。これにより、匂い濃度に応じて変わる触角からの入力信号に適したゲインを選択でき、信号処理効率が向上しました。EAGセンサの電極は、溝付きの新しい電極デザインの見直しと金メッキ仕上げにより、カイコガの触角に特化したものを開発しました。この電極は、個体差のある触角でも取り付けが容易であるうえ、触角を電極に接続するための導電性ゲルをより多く保持できるデザインです。この工夫により、センサ寿命を5時間まで大幅に改善しました(過去モデルの寿命は1~2時間)。

本研究における発見と技術開発により、次世代バイオハイブリッドドローンは、自律的に飛行方向を修正しながら5m離れた匂い源へ到達することに成功しました。この結果は、匂いによってナビゲートされる小型ドローンが行った匂い源探索として、世界記録となる探索範囲です。

今後への期待

研究チームでは、嗅覚飛行ロボットを災害時の要救助者探索に応用する研究開発を進めています。取り組みの具体例として、福島国際研究教育機構(F-REI)の委託事業を実施しており、嗅覚ロボットコンソーシアムを設立しました^(注3)。この事業では、ヒトに関わる匂いを検出可能な蚊の触角をセンサとして利用しています。一方で、バイオハイブリッドドローンを実際のミッションに投入するためには、今後も

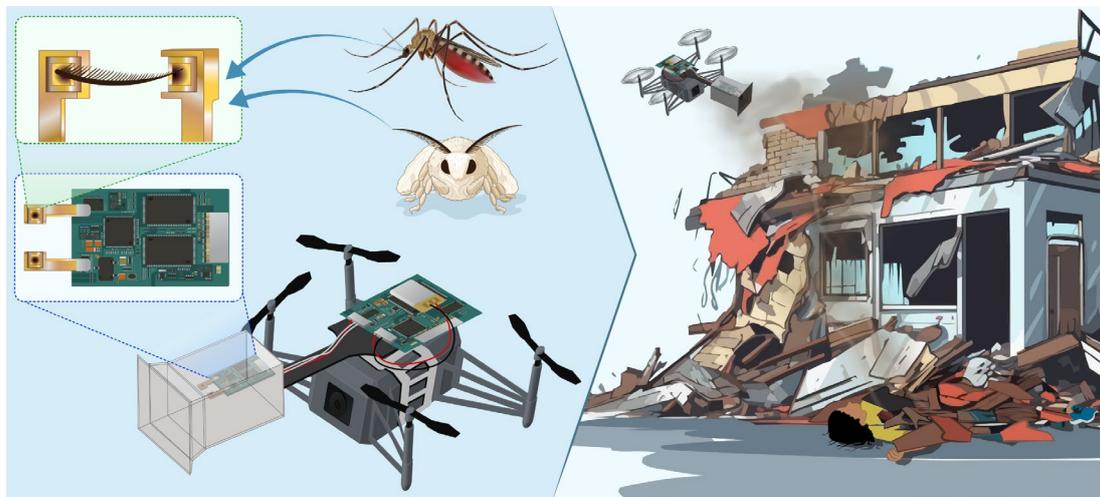


図5 バイオハイブリッドドローンの開発と将来的な匂いによる要救助者探索のイメージ

様々な研究開発が必要です。本研究で得られた成果は、より高度な嗅覚飛行ロボットの開発に向けた設計指針となります。研究チームでは今後、匂い源探索に特化したマルチコプター型ドローンの開発や、災害現場を模した環境での実験に取り組んでいきます。この技術が完成すれば、匂いを頼りに要救助者を発見する、災害救助の未来を切り開く新技術の実現が期待されます(図 5)。

謝辞

本研究の一部は、福島国際研究教育機構(F-REI)の委託研究費(JPFR23010401, JPFR24010401)、(公財)国際科学技術財団 日本国際賞平成記念研究助成、JKA 研究補助(2024M-419)、JSPS 科研費(24K03014, 24K00829)、(公財)カシオ科学振興財団(助 41-12)、(公財)大下財団、(公財)日本科学協会 笹川科学研究助成、(公財)立石科学技術振興財団、千葉大学 全方位・挑戦的融合イノベーション博士人材養成プロジェクト(ALDIC-PhD)の助成を受けて行われました。

参考文献

- [1] D. Terutsuki et al., Real-time odor concentration and direction recognition for efficient odor source localization using a small bio-hybrid drone. *Sens. Actuators B Chem.* 339 (2021) 129770.
2021年に照月准教授らが国際誌にて発表した第一世代バイオハイブリッドドローンである。
- [2] T. Nakata, D. Terutsuki et al., Olfactory sampling volume for pheromone capture by wing fanning of silkworm moth: a simulation-based study. *Sci. Rep.* 14 (2024) 17879.
2024年に照月准教授と中田准教授が中心となって国際誌にて発表した研究成果である。

用語解説

- 注1. 昆虫の触角は匂いを受容したときに電気信号を発する。昆虫触角の両端に電極を接続することで、匂いに対する応答を電気信号(電圧変化)として検出できる。この手法は触角電図(Electroantennogram; EAG)と呼ばれる。研究グループでは、EAGに基づいた匂いセンサを「EAG センサ」と呼称する。
- 注2. 専門的には、プログラマブルゲインアンプ(PGA)と呼ぶ。PGAの実装により、EAG センサの信号が小さいまたは大きい場合に、自動的に適切なゲインに変更できるシステムを実現した。
- 注3. 福島国際研究教育機構(F-REI)の令和5年度「防災・災害のためのドローンのセンサ技術研究開発事業」委託事業に採択に伴い、信州大学(代表機関)、千葉大学、慶應義塾大学の3大学で設立したコンソーシアム。

論文情報

【論文タイトル】

Advanced bio-hybrid drone for superior odor-source localization: high-precision and extended-range detection capabilities

【著者】

Chihiro Fukui[†], Tomoya Uchida[†], Sakito Koizumi, Yuta Murayama, Hao Liu, Toshiyuki Nakata^{*}, Daigo Terutsuki^{*}

[†] These authors contributed equally to this work (共同筆頭著者)

^{*} Authors for correspondence (責任著者)

【掲載誌情報】

雑誌名: *npj Robotics* (Nature Portfolio)

公開日: 2025年2月5日

URL: <https://www.nature.com/articles/s44182-025-00020-9>

DOI: <https://doi.org/10.1038/s44182-025-00020-9>

本研究成果に関するお問い合わせ先

照月 大悟(てるつき だいご)

信州大学繊維学部 機械・ロボット学科 バイオエンジニアリングコース

Tel: 0268-21-5618

E-mail: terutsuki@shinshu-u.ac.jp

中田 敏是(なかた としゆき)

千葉大学大学院工学研究院

Tel: 043-290-3233

E-mail: tnakata@chiba-u.jp

報道に関する問い合わせ先

国立大学法人 信州大学 総務部総務課広報室

E-mail: shinhp@shinshu-u.ac.jp

Tel: 0263-37-3056 Fax: 0263-37-2182

国立大学法人 千葉大学 広報室

E-mail: koho-press@chiba-u.jp

Tel: 043-290-2018