

【助成 41-12】

昆虫嗅覚-機械ハイブリッドによる嗅覚飛行ロボットの創出

信州大学繊維学部・准教授・照月大悟

〔研究の概要〕

生物は環境中の匂い情報を頼りに、エサやパートナーの発見、危機回避などを行う。匂い情報の利活用は、非接触かつ長距離から空間情報を把握できるため、基幹インフラの点検や危険物質の検出、災害現場での要救助者探査など、幅広い応用が期待される。しかし、既存のロボット技術はカメラや LiDAR など画像ベースのセンサが主流であり、匂い情報の利用は進んでいない。昆虫の嗅覚は、既存のガスセンサを凌駕する匂い検出能力を持ち、特に昆虫触角は、触角電図 (Electroantennogram; EAG) と呼ばれる手法により、環境中に分布する匂いをリアルタイムに検出可能な匂いセンサ素子として機能する。本研究では、複雑に分布する匂いに追従可能なカイコガ触角ベースのセンサ (EAG センサ) の開発と、昆虫の羽ばたきと匂い追跡の関係を調査することで、効率的な匂い源探索を可能とする新しい嗅覚飛行ロボットの創出を目的とする。

〔研究経過および成果〕

【EAG センサの開発】

本研究では嗅覚飛行ロボットの開発に向けて、昆虫触角を匂いセンサ素子とした EAG ベースの小型匂いセンサ (EAG センサ) の開発に取り組んだ。環境中の匂い分布 (濃度) は複雑かつ不連続に変化する。この変動に追従するセンサとして、ゲイン変更プログラムを用いて匂い濃度に応じた自律的な信号制御が可能な、ゲイン可変型 EAG センサを開発した。

図 1 に、ゲイン可変型 EAG センサの全体写真を示す。本センサは、オスのカイコガの触角を電極に接続することを想定している。センサは 2 つの主要なモジュールから構成されている。アンプとフィルタを内蔵するセンサモジュールと、マイクロコントローラを含む処理モジュールである。センサモジュールは、15 mm × 23 mm の PCB 基板上で、重量は 1.8 g である。各モジュールと Li-Po バッテリー (110 mAh)、ハーネスを含めた全体の重量は 15.5 g であり、小型ドローンに搭載可

能な構成である。センサモジュールには、アナログ→デジタルコンバータ (ADC) とプログラマブルゲインアンプ (PGA) を搭載することで、PC からのコマンド操作によって 8 段階 (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 倍) でゲイン制御が可能となった。

EAG センサの電極は、カイコガ触角の接続性の向上とセンサ寿命の向上を図るため、溝構造を持つ独自の電極を開発した。カイコガには個体差があり、特にカイコガが小さい場合は触角が短く、触角と電極の間に安定した接続を確立することが困難であった。また、触角の接続に使用する導電性ゲルは、ドローンの発生する気流で急速に乾燥することが判明した。溝

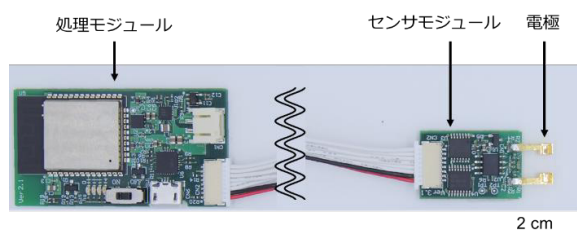


図 1 PGA を実装したゲイン可変型 EAG センサの写真

構造を持つ新しい電極デザインによって、触角の接触面積が大幅に改善され、導電性ゲルの保持量が増加してゲルの乾燥速度を低下することに成功した。

【昆虫の羽ばたきと匂い追跡の関係の理解】

オスのカイコガは、上記で述べたように、その触角が優れたセンサ素子として機能するため匂い源探索ロボットの研究に利用できる。一方で、カイコガの翅の羽ばたきが周囲の気流をどのように操作し、匂い源探索をどのように効率化しているかについての検討は極めて限られていた。そこで本研究では、カイコガの翅の運動計測と数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics; CFD) 解析によって、カイコガの翅の羽ばたきが発生させる流れを解析し、周囲の気流の乱れと匂い検出への影響を調査した。その結果、カイコガは羽ばたきによって自身の前方方向 60° の限られた範囲から、空気中の粒子を選択的に触角へ誘導していることが明らかとなった。

本研究で得られた 2 つの主要な成果、①可変ゲインアンプを実装した小型 EAG センサの開発と、②カイコガの翅の羽ばたきと匂い追跡の関係の CFD 解析は、今後の嗅覚飛行ロボットの開発に対して、重要な設計指針を提供するものである。今後は本研究をさらに展開することで、ロボット嗅覚による実環境での匂い情報の検知や利用が進み、災害時の要救助者探索など、実用的なミッションへ嗅覚飛行ロボットを投入可能になると期待される。

[発表論文]

英語論文

1. 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.

国際学会

2. **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.
3. 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.
4. **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).

招待講演

5. **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.