

[研究助成 (C)]

生体利用型マルチモーダルセンサ系と匂い情報を活用した
人搜索システムの構築

2237010

研究代表者
(助成金受領者)

千葉大学 大学院融合理工学府 博士後期課程

福井 千海

[研究の目的]

本研究の目的は、蚊の感覚受容器官が備える高感度かつ高選択的な化学受容機能を工学的に利用し、匂い情報を活用してヒトを追跡・発見できる人搜索システムの基盤を構築することである。昆虫は、餌、交尾相手、産卵場所、宿主といった生存に重要な対象を、空气中を流れる複雑な匂い情報から探索することができる。特に蚊は、ヒト由来の揮発性化学物質、二酸化炭素、熱、湿度、視覚情報など複数の手掛かりを統合しながら宿主を選択的に探索すると考えられており、この仕組みは、視覚に依存しにくい新しい探索技術の着想源となる。

一方で、従来の人工的な小型匂いセンサでは、実環境中でヒトに由来する匂いを高速かつ選択的に検出することは容易ではなく、災害現場や視界不良環境における人搜索への応用には限界がある。そこで本研究では、蚊の感覚受容器官そのものをセンサ素子として活用する匂いセンサを構築するとともに、蚊の宿主探索行動の知見を取り入れたマルチモーダルな人搜索システムへと発展させることを目指した。具体的には、まず蚊の触角を利用したヒト臭検出センサの成立性を検証し、さらに将来的な視覚、熱、距離、気流等の情報と統合した人探索系へ接続することを想定して、センサの小型軽量化とロボット搭載可能性を探った。

本研究の特色は、生物が進化の過程で洗練させてきた宿主選択機構を工学的な探索システム

へ橋渡ししようとする点にある。このアプローチにより、雪崩、地震、煙霧環境など視覚情報が制限される状況における要救助者探索への応用可能性を拓くとともに、匂い情報を活用した安全・安心な探索技術の創出に資することを目標とした。

[研究の内容、成果]

本研究では、最終的に匂い情報を活用した人搜索システムへ接続可能な基盤技術として、蚊の触角を利用した匂いセンサの構築、蚊の宿主探索行動の観察、および匂いセンサを実装した人搜索ロボットシステムの構築を段階的に進めた。当初計画では、1年目に蚊触角を利用したヒト臭検出センサの開発と基礎性能評価、および蚊の宿主探索行動の観察用実験装置の構築、2年目にその性能向上と小型軽量化、および蚊の宿主探索行動の観察、3年目に匂いセンサを実装した人搜索ロボットシステムの構築および評価を実施することとしていた。本助成期間中は、特に蚊触角利用型匂いセンサの成立性の検証、検出性能の評価、小型軽量化、ならびに今後のロボット統合に向けた技術課題の整理に重点を置いて研究を進めた。

まず、助成初年度には、空気中からヒト臭を直接検出するための蚊触角利用型匂いセンサの成立性を検討した。対象とした感覚器は主に交尾済の雌の触角であり、触角が匂い刺激に応答して生じる神経活動を電気信号として計測する

ため、差動増幅回路を備えた計測用基板を製作した。製作した基板は、フィルタとアンプを搭載し、2本1組の電極に入力された微小な電位差を増幅して取得できる構成とした。これにより、蚊触角を工学的な匂いセンサとして利用するための基本的な計測基盤を整備した。

次に、蚊触角と電極の接続方法について検討した。当初は、従来の触角電図法(electroantennography; EAG)に準じて触角の両端を切断し、導電性ゲルを介して電極と接続する方式を試みたが、S/N比が低く十分な応答が得られなかった。この結果を踏まえ、触角を身体から切り離さずに計測する方式へと方針を転換した。具体的には、麻酔・固定した蚊の頭部に基準電極を挿入し、触角先端を切断したうえで、その切断面に導電性ゲルを塗布し、記録電極を接触させる構成を採用した。この方法により、比較的大きなS/N比で応答を取得でき、ヒト臭を検出できることを確認した。この知見は、蚊触角を利用したヒト臭センサの成立性を示す初期結果として重要である。

一方で、蚊触角は細く脆弱であり、単純な接触のみの接続では振動や位置ずれにより電極が分離しやすいという課題が残った。このため、接触安定性と再現性を高めるための電極構造の検討を継続した。特に、触角の切断端を安定して記録電極へ接続すること、および接続の作業性を落とさずに、基準電極を含めた系全体の機械的安定性を確保できる機構が、生体器官をセンサとして利用するうえで重要であることが明らかとなった。さらにこれらの検討を通じて、蚊触角利用型センサでは、感覚器官そのものの感度や選択性だけでなく、感覚器と電極との界面設計が性能を大きく左右することが明らかとなった。

自作の回路・基板による蚊触角利用型匂いセンサの成立性の検討の後、専用のアンプおよびA/Dコンバータを導入し、簡易回路で得られていた初期結果を基準機器で再検証した。その結果、蚊触角利用型匂いセンサは、匂い源から

離れてもヒト臭構成成分を検出できることが確認された。さらに、繰り返し刺激に対する耐久性も有していることが示唆された。これらの結果は、単に応答が得られるだけでなく、一定距離を隔てた条件でも利用可能性があること、および時間的に連続した運用に向けた基礎データが得られたことを示している。

これらの結果を受けて、ロボット搭載を見据えた小型軽量な蚊触角利用型匂いセンサの構築を進めた。既存の小型基板設計を活用しつつ、蚊触角に適した電極系として、複数種類の電極から構成される電極構造を考案した。このような構造にすることで、触角接続の作業性を維持しつつ、安定した触角-電極接触を比較的長時間維持することが可能となった。構築した小型軽量センサを実験的に評価したところ、ヒト臭構成成分を繰り返し検出できることが示され、蚊触角利用型匂いセンサを固定された計測系から、可搬・搭載可能なモジュールへ近づけることができた。この点は、最終目標である人搜索システムへの実装に向けた重要な前進である。

蚊の宿主探索行動の理解を深めるため、行動実験用アリーナを構築し、実験を実施した。アリーナは、断面を縦横約2m、長さを約5mとし、周囲に複数台の高速度カメラおよび赤外線照明を設置した。さらに、アリーナ後方に送風機を設置して内部に気流を発生させるとともに、上流側にはベルマウスを設置し、流入気流をできるだけ乱さないよう配慮した。加えて、アリーナの内外は逸走防止用ネットで仕切り、実験個体が外部へ逸走しない構造とした。このようにして、蚊の宿主探索行動を安全かつ再現性よく観察するための基盤的な実験環境を整備した。

構築したアリーナを用いた行動実験では、上流側に実験者が立った状態で、蚊をアリーナ内に放って行動を観察した。その結果、吸血のモチベーションが高いと考えられる個体は、アリーナ内に放たれると速やかに上昇と上流方向への前進を開始し、その後、徐々に飛行高度を

下げながら、実験者の頭部周辺に対応する位置のネットへ到達することが多いことが観察された。本研究助成期間内では、解析に十分な量のデータが得られておらず、飛行軌跡や各種の宿主手掛かりの寄与を定量的に評価する段階には至っていない。しかし、このような大規模な空間でも速やかな宿主探索を実行できる能力や感覚受容器官を蚊が有しており、それを実験室内で直接確認できた点や、このような実験の成立性、ノウハウが得られた点は極めて重要であった。このように、今後の詳細な解析へ接続できる見通しが得られたことは、本研究の今後の展開に向けた貴重な基盤となりうる。

これまでの実験結果を受け、構築した小型軽量な蚊触角利用型匂いセンサを地上走行型ロボットに搭載・統合して、匂い情報を活用した人搜索システムの構築を進めた。本研究では、比較的低コストで自由な行動コマンドを実行でき、なおかつLiDAR等の成熟が進んだセンサを備えるロボットをプラットフォームとして採用した。

助成期間中の人搜索システムの構築においては、蚊触角利用型匂いセンサで得られる情報を基に行動を制御することが可能であるという基礎的な点を実証することに焦点を当てた。そのため、匂いセンサとロボットの物理的な接続は、ロボット上にロッドを立て、そこに匂いセンサを固定するという簡単なものとした。

ソフトウェア・ハードウェアの統合を終えたのち、実験的な評価を行った。その結果、ヒト呼気の検出に基づいて前進を繰り返し実行することに成功し、蚊触角利用型匂いセンサを用いた人搜索ロボットの実現可能性が示された。本研究で開発した匂いセンサや蚊触角-電極構造は、ロボットの行動中に発生する機械的なノイズ下でも安定して動作することが明らかとなり、今後のさらなる人搜索ロボットの開発につながる重要な知見が得られた。

本研究では、工学的観点から生体器官の利用とロボットへの統合、およびロボット上での動

作を目指した。この過程で、従来の触角接続方式をそのまま応用するだけでは感度が不十分であることが明らかとなった。また、工学的観点から考えると、接続の機械的な安定性をいかに担保するかが重要であることも明らかとなった。蚊触角は直径数十 μm 程度の非常に脆弱な器官であり、振動や時間経過、外気への曝露によって急速に劣化し物理的に損傷することが観察された。今後の展開として、さらに安定した接続方式の模索や、感覚器官をそのまま使用するだけでなく、より根本的な構造、すなわち受容体のみの利用などの方向性も考えられる。

[成果の発表、論文など] (それぞれ新しい順)

■国際論文

1. **C. Fukui**, J. Hoshina, S. Shimakawa, Y. Yamamoto, H. Liu, D. Terutsuki, T. Nakata, "Effect of the Wake Induced by a Drone on Olfactory Sensing," *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms*, vol. 11, no. 1, pp. 28-37, 2025. (Peer-reviewed)
2. **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*, vol. 3, Art. no. 4, 2025. (Peer-reviewed; **Selected as Hero image** (heading image); **Altmetric = 176** [checked 2026-02-17]; Altmetric details: This article is in the 99th percentile (ranked 2,997th) of the 370,973 tracked articles of a similar age in all journals and the 80th percentile (ranked 1st) of the 5 tracked articles of a similar age in *npj Robotics*)
3. 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*, vol. 14, Art. no. 17879, 2024. (Peer-reviewed; [†]Co-first and corresponding authors)

■国際学会

1. **○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. Oral presentation. Peer-reviewed.

■国内学会 (ポスター / シンポジウム発表 査読なし)

1. **○福井千海**, 内田智也, 劉浩, 照月大悟, 中田敏是, 停

止動作を取り入れたバイオハイブリッドドローンによる
長距離匂い源探索，ロボティクス・メカトロニクス 講
演会 2025 in Yamagata, 山形ビッグウイング・やまぎ
ん県民ホール，山形，2025 年 6 月 4-7 日．ポスター．

2. ○福井千海，内田智也，祐川侑司，神崎亮平，中田敏是，
照月大悟，バイオハイブリッド匂い源探索ロボットの探
索アルゴリズムの改良，ロボティクス・メカトロニクス
講演会 2023，名古屋国際会議場，愛知，2023 年 6 月 28
日-7 月 1 日．
3. ○福井千海，内田智也，小泉咲人，村山友太，祐川侑司，
神崎亮平，照月大悟，中田敏是，匂い源探索ドローンに
適した匂いセンサの配置の検討，日本機械学会 第 35 回

バイオエンジニアリング講演会，日立システムズホール
仙台，宮城，2023 年 6 月 3-4 日．

■国内学会（口頭発表 査読なし）

1. ○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，横浜国立大学 経済・経営学部講義棟，神奈川，
2024 年 12 月 14-15 日．第 35 回バイオフィロンティア講
演会若手講演表彰．

■産業財産権

1. 特願 2025-106666
2. 特願 2025-081109