

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650090

研究課題名(和文) バイオフィトカブラを用いた昆虫 機械ハイブリッド匂い源探索システムの開発

研究課題名(英文) Odor-source localization by the insect-machine hybrid system with the bio-photocoupler

研究代表者

安藤 規泰 (Ando, Noriyasu)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：70436591

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：昆虫の優れた匂い源探索能力をそのまま利用するために、光遺伝学手法によって開発された、光刺激に対して匂い源探索行動を発現するチャンネルロドプシン2遺伝子組換えカイコガ(ChR2カイコガ)を用い、実環境を行動する移動ロボット上のガスセンサで取得した匂い情報を光刺激に変換してChR2カイコガを刺激し、発現した匂い源探索行動で移動ロボットを遠隔制御して匂い源探索を行う装置を開発した。この光を介した昆虫-機械の接続をバイオフィトカブラと呼び、昆虫の感覚-運動系をそのまま利用する手法として提案した。

研究成果の概要(英文)：Insects have an ability to track airborne odorants and localize the odor source. To apply this ability to artificial odor source localization, we used silkmths, well-known model insects in odor tracking, and developed a novel insect-machine hybrid system. A mobile robot bearing two gas sensors was located in the odor plume and was remotely controlled by a tethered walking silkmth located in a different place. The olfactory information acquired by the gas sensors was transformed into optical signals which were recognized as the olfactory input to the channelrhodopsin-2 (ChR2) transgenic male silkmth. The moth responded to the optical signal and performed the odor tracking behavior and the robot was controlled based on the behavior. We named this optical connection between the artificial sensors and insects as 'bio-photocoupler' and proposed this hybrid system as one of the most effective way to apply the insect sensory-motor system into an artificial system.

研究分野：神経行動学

キーワード：昆虫 匂い源探索 嗅覚 光遺伝学 ロボット チャンネルロドプシン2

1. 研究開始当初の背景

空气中を離散的に漂う化学物質（匂い物質）を手掛かりにその発生源を突き止めることは、有害物質の漏出、災害地での被災者の救助、麻薬や爆発物の発見等に有効であり、我々の安全な生活の実現に不可欠である。しかし、未だ工学的な再現が難しい分野であるため、実用性の点から警察犬などの優れた嗅覚をもつ動物の力に頼らざるを得ない。そのため、動物の嗅覚に関する生物学的知見が、工学的応用に結びつくことが期待され、バイオミメティクス（**Biomimetics**: 生体模倣技術）の極めて有力な研究分野として注目を集めている。生物規範の匂い源探索の実現には、センサ・情報処理・探索アルゴリズムの3要素の解析と統合が必要であり、申請者が所属する研究室では、これらの網羅的な解析が進められている。しかし、研究は未だ途上にあるため、得られた知見を統合し、匂い源探索ロボットとして工学的な応用に結びつける段階にないのが実情である。災害や有事は今日明日来るとも知れず、その一方で、バイオミメティクスによる匂い源探索の実現は当分先というこの現実を踏まえ、本研究課題では、バイオミメティクスによらない生物規範匂い源探索を実現する手法として、現在入手可能なガスセンサ、優れた匂い源探索能力を持つ昆虫、そして移動ロボットからなるハイブリッド匂い源探索システムを提案する。

近年神経科学分野で急速に広まった光遺伝学的手法では、目的の神経細胞に光受容イオンチャネルを発現させ、これを「光センサ」として細胞を光刺激し、その機能を解析する。申請者の所属する研究室では、雄カイコガ（*Bombyx mori*）の「鼻」に相当する触角にある雌性フェロモン受容細胞に、光受容陽イオンチャネルのチャネルロドプシン 2（ChR2）を発現させ、光刺激により受容細胞の応答を制御し、雌カイコガを探索する行動を発現させることに成功している（Tabuchi et al., *Proc Natl Acad Sci USA* **110**:15455-15460, 2013）。これは昆虫を制御する新たな光インタフェースとなる可能性を持つ。

2. 研究の目的

人工のセンサと昆虫を結びつける新たな光インタフェースである“バイオフィトカプラ”（図1）を提案し、これを用いたハイブリッド匂い源探索システムを構築して任意の匂い源へ到達させる。これにより、バイオフィトカプラの有用性と、生物を規範とした匂い源探索の性能と実用性を明らかにする。

3. 研究の方法

・実験昆虫

触角の雌性フェロモン受容細胞に、ChR2を発現させた雄の遺伝子組み換えカイコガ（ChR2 カイコガ）成虫（羽化後 2~10 日）を用いた。

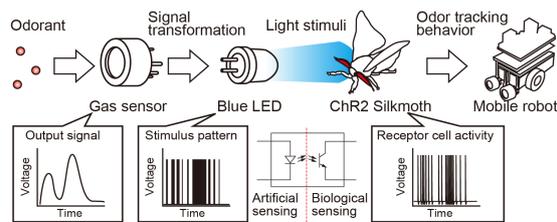


図1. バイオフィトカプラの概念図

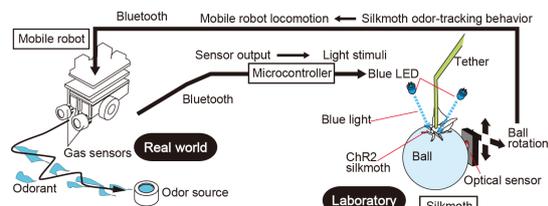


図2. ハイブリッド匂い源探索システム概念図



図3. ChR2 カイコガの固定

・実験装置

実験装置は、ChR2 カイコガの歩行運動を計測する行動計測部と、実環境を移動し、搭載したガスセンサで匂い情報を収集する移動ロボットから構成される（図2）。

行動計測部は、直径 60 mm の発泡スチロール球を、下方からブローファンで風を送ることで浮上させた球状トレッドミルであり、これを光学マウスで前後左右の回転を計測することでロボットの運動に反映させた。センサのサンプリング周波数は 60 Hz とした。

ChR2 カイコガは、実験の 2 時間以上前に、all-trans retinal をピーナッツオイルに溶解し 50 mM としたものを 10 μ l 腹腔内に注射した。刺激光が視覚情報として行動に影響を与えることを防ぐために、複眼は黒色の接着剤で被覆した。胸部背面の鱗粉を除去したのち、固定具のプラスチック片に接着剤で固定し、次に固定具主柱の先端に頭部を蜜蝋で固定した。この状態のまま、固定具を小型コンピュータに固定し、ChR2 カイコガを球状トレッドミル上に静置した。触角をほぼ水平位置に伸びるようにフックで位置を調節したのちに、基部を蜜蝋で固定した（図3）。この固定法により、歩行運動に伴う上下動を阻害することなく、常に定位置に光刺激を与えることが可能となった。

光刺激には波長 470 nm の青色パワーLED（LEB S2W, OSRAM, ドイツ）を 2 つ使い、直径 5 mm の光ファイバーで左右それぞれの

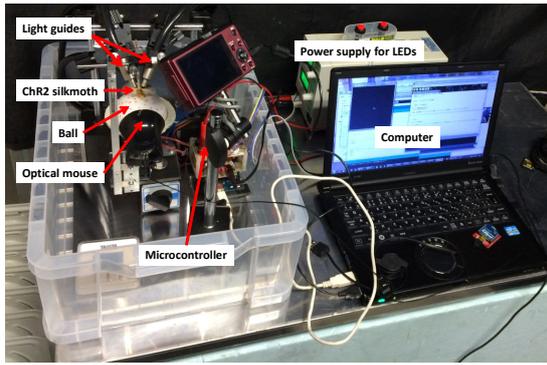


図 4. 行動計測・光刺激装置全景

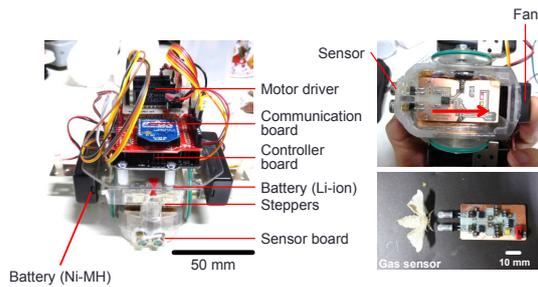


図 5. 移動ロボット

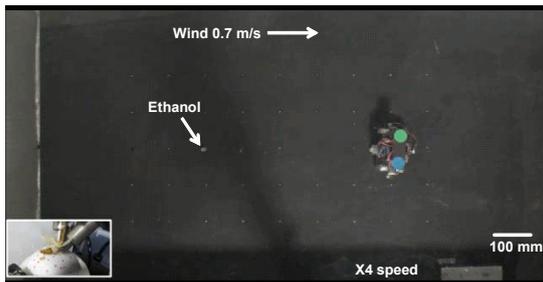


図 6. 定位実験の様子

触角へ導光した。ファイバー先端が触角に接触する位置で刺激を行い、この時の光強度は 130 mW であった。光刺激のパターンは、マイコンボード (Arduino) で制御した。開発した行動計測・光刺激装置全景を図 4 に示す。

移動ロボットは、その場旋回が可能な 2 輪式としステッピングモータで回転を制御した (図 5)。モータ制御には Arduino を用い、光刺激装置に接続したコンピュータとの通信には ZigBee を介したシリアル通信を行った。ロボットの制御周波数は 60 Hz とし、カイコガの運動をカバーする旋回角速度 94.3 deg/s, 前進速度 48.4 mm/s を確保した。ロボットの下部には小型ファンで排気する流路を設け、交換可能なモジュール式ガスセンサ基板を取り付けた (図 5)。ガスセンサは熱線型半導体式センサ (新コスモス電機, 大阪) を用いた。

ガスセンサからの情報は濃度に依存して変化するアナログ信号であるが、これを連続光として与えると触角の温度が上昇する。130 mW の光で刺激を与えると、数百 ms の

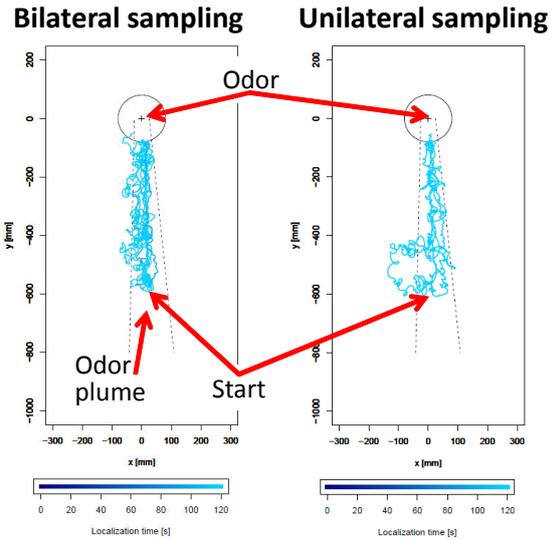


図 7. ロボットの軌跡。(左図) 左右それぞれのセンサ情報を利用した例、(右図) 左右の平均値を利用した例

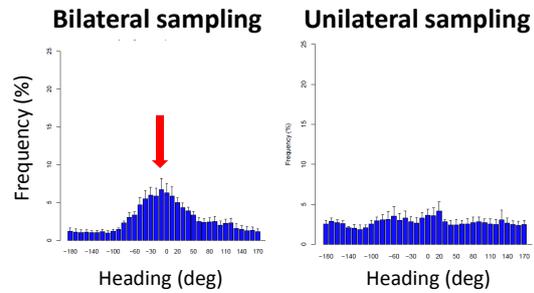


図 8. 移動方向. 中央 (0 deg) が匂い源の方向

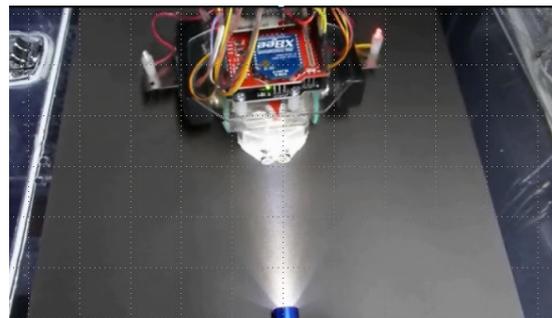


図 9. 光源定位実験

短時間の光刺激でさえも、通常匂い刺激と同側方向へ最初の旋回を行うところが、反対側へ逃避行動を起こすことが観察された。触角と同等の太さの直径約 0.1 mm の熱電対 (銅-コンスタンタン) を用いて温度変化を計測したところ、130 mW の光強度で、連続光の場合は約 23°C の温度上昇になったが、刺激 OFF の時間を設け、間欠的なパルス刺激としたところ、5 Hz・デューティー比 25% で約 5.5°C の温度上昇にとどまることを確認した。この刺激条件では、ChR2 カイコガは逃避行動を示すことなく刺激方向に依存した連続的な歩行を示したことから、この刺激条件の

もと、光強度をガスセンサが取得したエタノール濃度に比例させたパルス振幅変調による刺激方法を採用した。

匂い源への定位実験には、80%のエタノールをエアポンプでバブリングして気化させ、電磁弁で 200 ms ON, 300 ms OFF のパルスの刺激として風速 0.7 m/s の風洞中に流した。定位距離は 500 mm とした。また、異なる特性のセンサでの動作を検証するため、ガスセンサ基板を光センサ基板に交換し、風洞中に設置した光源への定位も観察した。

4. 研究成果

エタノールに対する匂い源定位実験では、通常のカイコガと同様に匂い源に対する直進歩行と、匂いを失った際のジグザグ・回転運動を繰り返して定位することが示された(図 7 左図, 9 個体の実験例)。次にロボットに搭載した左右のガスセンサの情報が正しく光刺激として ChR2 カイコガに与えられ、対応する行動が得られていることを確認するため、左右のガスセンサの値の平均値から換算したエタノール濃度に比例した強度の光刺激を両側の触角に照射した。このような左右の「濃度差」がない状況においても、移動ロボットは匂い源に定位したが(図 7 右図, 4 個体の実験例), 匂い源に対するロボットの向きの頻度を調べると、左右の濃度差がある状況では明瞭な匂い源への指向性が見られた一方で(図 8 矢印), 濃度差がない状況では指向性が認められなかった。このことから、本実験装置・刺激方法により、移動ロボットが受容した左右のエタノール濃度差を正しく光刺激として伝達し、行動を発現させることができたと言える。

ガスセンサを光センサに交換することで、ChR2 カイコガ自身の持つ匂い源探索アルゴリズムで、光源定位も可能であった(20 例)。このことから、本システムは、応答特性の異なるセンサに対しても適用可能なシステムであると言える。

以上の結果から、本研究について次の 2 つの意義が示された。

ア) 光遺伝学の産業応用：神経科学で急速に広まっている光遺伝学的手法のうち、光による行動制御に注目し、新たな生物-機械インタフェースとして提案した。特定の行動を、光を用いて高い再現性で発現・制御できるため、生物を組み込んだハイブリッドシステムの信頼性を大きく高めることができる。

イ) 脳神経系バイオメティクスの推進：生物を直接利用した匂い源探索を実現することで、生物規範の匂い源探索の性能を具体的に世に示すことができた。このことは、バイオメティクスへの関心や、その実用性に対する評価を大いに高め、研究分野そのものを以後強力に推進できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- 1) Poonsup Pansopha, Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki* (2014) Dynamic use of optic flow during pheromone tracking by the male silkworm, *Bombyx mori*. *Journal of Experimental Biology*, **217**, pp.1811-1820, doi: 10.1242/jeb.090266.
- 2) Ando N*, Emoto S, Kanzaki, R (2013) Odour-tracking capability of a silkworm driving a mobile robot with turning bias and time delay. *Bioinspiration & Biomimetics* **8**, 016008.
- 3) Ryohei Kanzaki*, Ryo Minegishi, Shigehiro Namiki, Noriyasu Ando (2013) Insect-machine hybrid system for understanding and evaluating sensory-motor control by sex pheromone in *Bombyx mori*. *Journal of Comparative Physiology A*, **199**, pp. 1037-1052, doi: 10.1007/s00359-013-0832-8.

[学会発表] (計 8 件)

- 1) 望月輝, 安藤規泰, 神崎亮平 (2015) 昆虫の匂い源探索行動における濃度情報の利用. 第 67 回日本動物学会関東支部大会 (東京, 3 月 14 日). (ポスター発表最優秀賞)
- 2) Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki (2014) How do walking silkworms find the direction of an odor source? *11th International Congress of Neuroethology / 36th Annual Meeting of the Japanese Society for Comparative Physiology and Biochemistry* (Sapporo, Japan, July 28-August 1).
- 3) Poonsup P. Kono, Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki (2014) Visual processing pathways and their roles in modulation of pheromone-triggered behavior in the male silkworm, *Bombyx mori*. *11th International Congress of Neuroethology / 36th Annual Meeting of the Japanese Society for Comparative Physiology and Biochemistry* (Sapporo, Japan, July 28-August 1).
- 4) 安藤規泰, 片岡勇貴, 神崎亮平 (2014) バイオフォトカブラによる昆虫-機械ハイブリッド匂い源探索の実現. *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (Robomech 2014)* (富山, 5 月 25-29 日), 2A1-X08.
- 5) 岡佳史, 安藤規泰, 神崎亮平 (2014) 昆虫の視覚情報に基づく回避対象選抜モデルを用いた移動ロボットの衝突回避性能の評価. *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (Robomech 2014)* (富山, 5 月 25-29 日), 2A1-X09.
- 6) 岡佳史, 安藤規泰, 神崎亮平 (2014) 移動ロボットによる昆虫の視覚情報に基づく動体検出モデルの評価. 第 26 回自律分散システムシンポジウム (東京, 1 月 23 日).
- 7) 片岡勇貴, 神崎亮平, 安藤規泰 (2014) バ

イオフォトカプラを用いた生物-機械ハブリッド匂源探索システムの開発. 第26回自律分散システムシンポジウム (東京, 1月23日).

- 8) Poonsup Pansopha, Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki (2012) State-dependent visual modulation of pheromone-triggered behavioral response of the male silkworm moth, *Bombyx mori*: a comparison between open-loop and closed-loop visual stimulation approaches. 第34回日本比較生理生化学会 (葉山, 7月6-8日).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.brain.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安藤 規泰 (Ando Noriyasu)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：70436591

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：