

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22700197

研究課題名（和文） 昆虫 BMI による適応能力の獲得

研究課題名（英文） Exploring adaptation ability by insect BMI

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

研究成果の概要（和文）：

異種感覚情報の統合は、動物が時々刻々と変化する実環境で適応的に行動するうえで必要なしくみである。本研究では匂い源探索を行う雄のカイコガが操縦する昆虫 BMI “昆虫操縦型ロボット” や行動実験を用いて統合機構を解析した。研究の結果、意図しない経路のずれに対しては視覚情報だけでなく、左右の触角で受容される匂い濃度の空間的な分布が経路の修正に有効であること、また視覚情報による経路の修正は匂い受容の直後のみに生じることが分かった。以上から、匂い源定位における複数感覚情報の統合は、匂い受容直後の経路の決定を行っていることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

Multi-sensory integration is necessary for animals behaving adaptively in real environment. We analyzed mechanisms of multi-sensory integration of odor tracking male silkmoths with an insect BMI, insect-controlled robot, operated by them. Our results indicate that both visual (optic flow) and bilateral olfactory inputs are necessary for steering correctly toward the odor source, even with perturbations. This multi-sensory-based steering occurred only when the moth received odorant and performed straight-line walking, an initial behavioral state of the odor searching behavior of the moth.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：自律システム、ブレインマシンインターフェイス、匂い源探索、複数感覚統合、昆虫、ステレオ嗅覚

## 1. 研究開始当初の背景

近年のロボット技術の進歩はめざましく、

とりわけ二足歩行ロボットがニュースを賑わせている。人間のような柔軟な歩行を見せ

るこれらのロボットではあるが、プログラムで想定されない状況、例えば、床面の起伏や段差といったわずかな環境の変化や、ロボットそのものの不具合に対して脆弱であることが多い。一方、動物は、状況の変化に対して必要な情報を受容・処理し、適切な行動を発現することで、柔軟に適応することができる。中でも昆虫は、少数の神経細胞から構成されるシンプルな神経系でありながら高い適応性を備えている。昆虫は、4億年以上前に地球上に出現し、しかも現生種の形態は太古の化石に見られるものとほとんど変わらない。このことは、昆虫の形態や制御機構が、環境の変化に対して極めて頑強であることを示すものである。さらに、翅や脚といった身体の損傷に対しても、直ちにその運動パターンを変化させ、運動を継続することができる。このような昆虫の設計思想とは、子孫を残すために、環境変化に適応し、障害に対して強く、生存性を最大限に高めることに主眼が置かれていると考えられる。そのため、昆虫の環境適応性を知ることが、小型、シンプル、そして自律的な「適応型ロボット」への応用につながる事が期待されている。これまでに、昆虫の視覚情報処理による障害物回避行動、聴覚情報処理による音源定位行動、そして、嗅覚情報処理による匂い源探索行動について、神経回路モデルに基づいた移動ロボットによる検証が行われている。

では、適応性とは具体的に何を指すのか。私は「環境や身体の変化に対しても、ある特定のタスクを達成できる性質」と定義する。したがって、適応能力を評価するためには、1) 昆虫が特定のタスクを再現性よく行うこと、2) 感覚-運動を担う神経系と、環境、身体の相互作用が存在する実験系であること、3) 環境、身体のパラメータを定量的に評価できることが必要である。

我々はこれまでに、昆虫の適応能力を評価するための実験プラットフォームとして、昆虫がロボットを操縦する昆虫操縦型ロボットを開発した。これは前述の条件を満たす実験系である。すなわち、モデル昆虫の雄カイコガは、1) 再現性の良いタスクである雌性フェロモン源定位行動を行い、操縦するロボットは、2) 感覚フィードバックの存在する実環境で運動する。さらに、ロボットのモータゲインを操作することで 3) 定量的な身体機能の変化を与え、タスクの達成度から適応性を評価できる。

これまでに雄カイコガと昆虫操縦型ロボットを用いて、様々なパラメータ操作に対する定位成功率の変化や、運動特性の解析を行ってきた。そして、左右非対称なモータ回転でもロボットはフェロモン源へ定位できた。さらに視覚情報（オプティカルフロー）によるフィードバックが、ゲイン操作の補償に大

きく寄与しており、視覚情報と嗅覚情報の統合による行動生成機構が、効率的なタスク達成を実現し、適応性を高めていることが示唆された。

しかし、前述の研究では、具体的な視覚-嗅覚の統合モデルを提示するに至っていない。また、オプティカルフローによる調節は、経路のずれを補正する機構であり、匂い源探索に必要なジグザグ歩行と拮抗することから、統合機構には何らかの相互作用が予想される。昆虫のように小規模な神経系で適応性を実現するためには、一つの感覚情報に特化するよりも、複数の感覚情報を組み合わせる方が有利であり、複数感覚情報の統合機構は適応性を実現するひとつのモデルと言える。先行研究では、個々の感覚-運動系について神経回路に基づいたモデルやロボットによる検証が行われているが、複数感覚統合については未だ研究の途上にある。そこで本研究では、昆虫操縦型ロボットを用いて、昆虫の持つ「適応性」を徹底的に評価し、複数感覚統合を基にした行動モデルを提案し、移動ロボットで検証を行うことで、「適応性」の工学的な再構成を目指す。

## 2. 研究の目的

昆虫の適応性を支える要素の一つである複数感覚情報の統合に焦点を当て、昆虫 BMI (Brain-Machine Interface) である昆虫-機械融合システム「昆虫操縦型ロボット」を用いた行動解析を中心に行い、モデルの構築、ロボットによる行動の検証を通して、「適応性」の工学的な再構成を目指す。

## 3. 研究の方法

### 1) 昆虫 BMI

雄カイコガ (*Bombyx mori*) を背部でロボットに固定し、ロボットのトラックボール上を歩行させた。ボールの回転は光学センサで読み取り、ロボットの運動に反映させた。カイコガの歩行運動とロボットの運動のゲインは1とした。

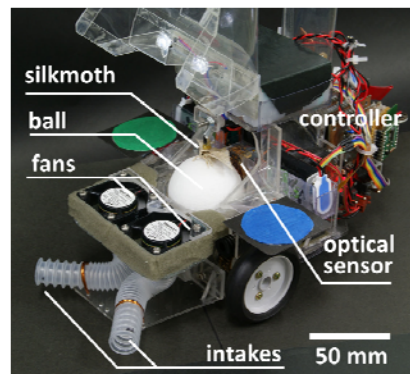


図1 昆虫操縦型ロボット

昆虫 BMI では、視覚情報と嗅覚情報による方向制御について解析を行った。左右の触角が受容する匂い物質の濃度勾配を制御するため、位置を調節可能なフレキシブルチューブで吸引した匂いがそれぞれ左右の触角に当たるように設定した(図1)。チューブの位置は、①100 mm 間隔(control), ②20 mm 間隔(close), ③100 mm 間隔で左右逆(cross)の3パターンを用いた。視覚情報の効果を見るために、この嗅覚受容の条件に左右のモータ出力を反転させた条件を組み合わせた。昆虫は背景の動き (Optic flow) に追従する性質 (視運動反応) があるので、モータ出力が左右反転した条件では視運動反応を繰り返してターンを続けることが期待される。

匂い物質は雌カイコガの性フェロモンの主成分である Bombykol 2000 ng をろ紙片にしみこませたものを用い、200 ms の空気圧パルスで 2 Hz の頻度で風洞の風上側より噴出させた。風洞内の風速は 0.7 m/s, 定位距離は 60 cm とした。

## 2) カイコガの行動実験

視覚情報が定位行動に与える影響を評価するために行動実験を行った。雄カイコガを背部で固定し、トラックボールの上を歩行させた。カイコガ前方に設置したスクリーンには、視覚刺激として縦縞を提示した(図2)。カイコガの歩行運動を対応する Optic flow として縦縞の左右の動きへフィードバックさせた(閉ループ)。視運動反応による経路補正を評価するために、一定の速度の縦縞の動きを加え(バイアス)その反応を調べた。雄カイコガはフェロモンを受容すると、定型的な行動パターンを発現する。この行動パターンはフェロモン受容直後の直進歩行(サージ)およびジグザグ・ループ歩行からなり、それぞれ制御する神経機構が異なることが明らかになっている。本研究では、視運動反応がこの2つの行動状態によって異なるという仮説を立て、フェロモン刺激を 2 Hz の連続パルス刺激(サージ)、およびパルス幅 1 s の単発刺激(ジグザグ)でそれぞれ行い、バイアスの視覚刺激に対する視運動反応を評価した。

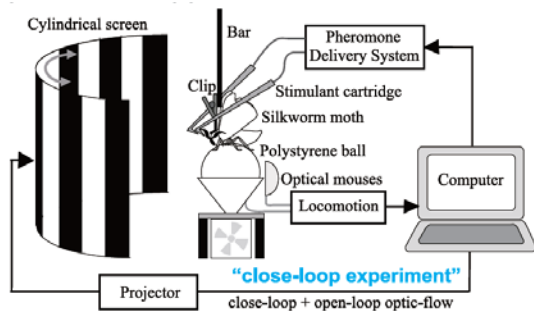


図2 行動実験装置

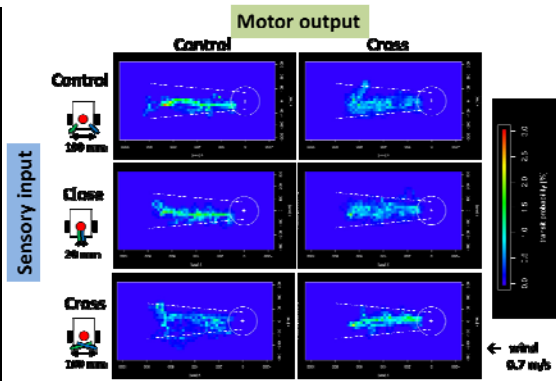


図3 定位実験の結果。存在確率をカラーコードで示した。左から右へ向かって定位し、円はフェロモン源を中心とするゴール範囲、点線はフェロモンの存在する範囲(プルーム)を示す。

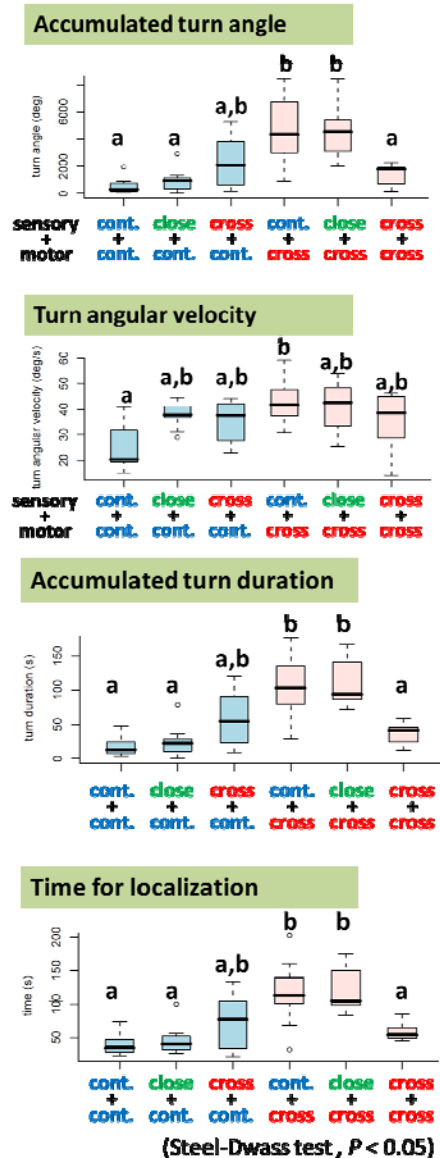


図4 運動パラメータの比較

(Steel-Dwass test,  $P < 0.05$ )

#### 4. 研究成果

##### 1) 昆虫 BMI の定位実験

それぞれの条件の定位成功率は、左右正常なモータ回転の場合、①100 mm 間隔 (control + control): 100%, ②20 mm 間隔 (close + control): 100%, ③100 mm 間隔左右逆 (cross + control): 80%, 左右のモータ回転を反転させた場合①100 mm 間隔 (control + cross): 91%, ②20 mm 間隔 (close + cross): 72.7%, ③100 mm 間隔左右逆 (cross + cross): 100% であり、左右の匂い情報 (cross + control) もしくはモータの左右を反転させた条件 (control + cross, close + cross) で定位成功率の若干の低下が見られた。定位行動における風洞内の存在確率分布では、これら定位成功率が低下した条件で空間的なばらつきが大きくなる傾向が見られた (図 3)。一方で、左右の匂い情報およびモータ回転をいずれも反転させた条件 (cross + cross) では操作なし (control + control) と同等の分布を示した。

次に、定位行動におけるターン角度の総計、ターン角速度、ターン時間、そして定位時間についてそれぞれの条件で算出し比較した (図 4)。その結果、モータ回転のみ左右反転した条件では、ターン角度、ターン持続時間、そして定位時間において、操作なし (control + control) と比べて有意に増大した (Steel-Dwass test,  $P < 0.05$ )。一方、ターン角速度は、①100 mm 間隔でモータの左右を反転させた条件 (control + cross) のみ操作なしと比べ有意に増大した ( $P < 0.05$ )。これらの結果から以下の結論を得た

- ① 匂い源定位中に視運動反応を行う。左右のモータ出力を反転させた条件 (control + cross, close + cross) でターン持続時間の増大が認められたことから、視運動反応によるターンで生じる Optic flow が左右のモータ反転により逆方向にカイコガに入力されることで反応が持続している (一方向へ旋回し続ける) と推察される。
- ② 左右の嗅覚情報は方向決定に重要である。正常な嗅覚入力である①100 mm 間隔 (control + control) および②20 mm 間隔 (close + control) では、左右の空間的な距離に関わらず定位能力に差は認められなかった。一方で左右の嗅覚入力を反転させた条件③100 mm 間隔左右逆 (cross + control) では、定位成功率の減少とターンのパラメータの増大が見られたことから、空間的な匂い濃度分布が方向決定に影響を与えると考えられる。
- ③ 視運動反応と左右の嗅覚情報による方向制御は拮抗的である。左右の嗅覚入力とモータ回転をともに反転させた条件 (cross + cross) では、操作なし (control + control) と有意な差が認められなかった。

したがって、モータの左右反転によって連続的に生じる視運動反応が、左右の嗅覚情報に基づく方向制御の系によって打ち消されていると考えられる。

##### 2) 視運動反応の行動状態依存性

カイコガの匂い源探索行動における2つの行動状態、直進歩行とジグザグ (続いて起こるループは同一の神経機構によって生じるため解析には含めなかった) における Optic flow に対する応答を解析したところ、直進歩行では optic flow の速度 ( $x$ ) と同方向へのターン角速度 ( $y$ ) に相関が認められたが ( $y = 0.57x - 0.84$ ,  $R^2 = 0.41$ )、ジグザグ歩行では Optic flow とターンのパラメータに相関は認められなかった。このことから、視運動反応は、フェロモン受容直後に発現する直進歩行時のみの反応であり、視覚情報と嗅覚情報の統合には行動状態依存性があることが明らかになった。なお、1) の昆虫操縦型ロボットの定位実験では 2 Hz のフェロモン刺激を行っており、これはこの行動実験における直進歩行を発現させる刺激条件と同じである。このことから、ロボットの実験条件では視運動反応が十分に発現すると考えられ、2つの実験結果は対応する。

##### 3) まとめ

###### ①本研究成果の国内外におけるインパクト

昆虫操縦型ロボットの実験により、匂い受容直後の方向決定には、視覚情報 (optic flow) と左右の嗅覚情報が関与していることが明らかになった。またこの2つの方向制御により、左右の車輪の回転速度が非対称な条件でも方向のずれを補正し匂い源に到達できるものと考えられる。この補償メカニズムのモデルを構築することで、障害に強い自律移動ロボットの開発に貢献することが期待できる。

一方、視覚情報の統合に行動状態依存性があることは非常に新しい事実である。この行動状態はすでに同定されている神経群の活動によって規定されることから、視覚情報の統合もこれらの神経群の活動と相関があると予想される。また視運動反応をジグザグ歩行時に抑制することで、主体的な運動であるジグザグ歩行によって生じる Optic flow によって旋回運動そのものが打ち消されないようにしているものと考えられる。

###### ②今後の展望

本研究で提案された複数感覚統合機構のモデルを構築し、機能の検証を行う。機能検証の一つの手法として、本研究課題において昆虫の操縦と各種センサからの入力を統合して移動方向を制御する、「ハイブリッド制御」が可能な昆虫操縦型ロボットを開発した。これを用いることで、例えば視覚統合モデル

の評価であれば、複眼を被覆したカイコガが匂い情報を頼りにロボットを操縦し、この入力と、カメラなどの視覚センサの情報とをモデルに基づいて統合しロボットの運動を制御することで、モデルの妥当性を評価することが可能になる。

#### 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1件)

- 1) Ando N\*, Emoto S, Kanzaki, R (2013) Odour-tracking capability of a silkmoth driving a mobile robot with turning bias and time delay. *Bioinspiration & Biomimetics* 8, 016008, doi: 10.1088/1748-3182/8/1/016008.

[学会発表] (計6件)

- 1) 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).
- 2) Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki (2011) Exploring insect adaptability with the insect-controlled robot. 8th International Congress of Comparative Physiology and Biochemistry (Nagoya, Japan, June 4, 2011) (招待講演).
- 3) Noriyasu Ando, Shuhei Emoto, Ryohei Kanzaki (2011) Insect-controlled robot -exploring adaptability-. IEEE International Conference on Robotics and Automation 2011 Workshop "Biomimetic and Hybrid Approaches to Robotics" (Shanghai, China, May 13, 2011) (招待講演).
- 4) Poonsup Pansopha, Noriyasu Ando, Ryohei Kanzaki (2011) Multi-sensory integration during pheromone-plume tracking of male silkworm moth, *Bombyx mori*. 8th International Congress of Comparative Physiology and Biochemistry (Nagoya, Japan, June 4).
- 5) 安藤規泰, 神崎亮平 (2010) 匂い源探索戦略における左右の嗅覚情報に基づく方向決定の役割. 第28回日本ロボット学会学術講演会 (名古屋, 9月24日).
- 6) Poonsup PANSOPHA, Noriyasu ANDO, Ryohei KANZAKI (2010) Robot platform for

evaluation of insect odor plume. 第28回日本ロボット学会学術講演会 (名古屋, 9月24日).

[その他]

ホームページ等

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

論文 “Odour-tracking capability of a silkmoth driving a mobile robot with turning bias and time delay” が出版元の英国物理学会出版局よりプレスリリースで紹介 (2013年2月7日).

#### 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