

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420212

研究課題名(和文) 昆虫の状況依存的行動応答変化を規範とする探索アルゴリズムの構築

研究課題名(英文) Searching algorithm based on state-dependent behaviors exhibited by insects

研究代表者

倉林 大輔 (KURABAYASHI, DAISUKE)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00334508

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生物(昆虫)の適応的行動選択という「賢さ」の工学的再現を目指し、雄カイコガ成虫の性フェロモン源探索行動を題材として、感覚種別の多様性ではなく、状況依存的な行動選択過程の解明と、その目的行動に対する機能性の検証を行った。3自由度サーボスフィアという新しい実験装置を構築し、行動と神経応答の同時計測を可能とした上での実験で、(1)視覚を主とするフィードバックの状況依存的利用、(2)目標に関する情報エントロピーに応じた行動ポリシー切替、という結果を得た。シミュレーション検証において、これらを取り入れることで環境条件の変化に強い行動アルゴリズムが構築された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated state-dependent decision making algorithms of a silkworm moth and replayed the results in simulation environments. We proposed and build a novel experimental system named 3D-servo sphere, by which we could observe behaviors of the animal without any fixations. We also established methods to measure neural responses of flight muscles and a brain simultaneously. As the result, we found state dependent visual feedbacks during programmed behavior, a set of fixed sequence of actions. When the animal could expect reduction of information entropy, it exhibited movements different from those of the programmed behavior. However, when it could not, it behaved like the programmed behavior. We implemented the policy switching into artificial agent in simulator and carried out simulations in different conditions. As the results, we found the policy switching improved adaptability against variations of the conditions.

研究分野：知能機械学

キーワード：匂い源探索 状況依存性 情報エントロピー

1. 研究開始当初の背景

生物は不確定性の高い環境において感覚入力を巧みに用い、適応的な行動選択を行う。このことは、「生物の賢さ」を構成する重要な要素であると考えられ、極限環境で作業可能な人工システムの実現に不可欠である。これまでの工学研究においては、感覚種別の多様性に着目した異種感覚統合の研究[1]が数多く行われてきた。

これに対し本研究では、種別の多様性ではなく、知覚状況や入力履歴に応じた応答変化に注目する。

現在の工学システムは、一定の特性を維持して動作することを前提としている。一方で生物は、成長・老化する身体をはじめ、慣れや疲労など感覚応答の変化に常に適応し、適切に行動できる[2]。この感覚-行動応答の変化は、新しい刺激入力へ探索目標を切り替えたり、より高濃度・高頻度の刺激への探索に行動を変化させるなど、合目的機能を持つことが予想されているが、従来の工学システムでは注目されてこなかった。

生物学において、個別の感覚器応答における経時変化は多くの研究例がある。しかし、生物個体というシステムにおいては、ある行動選択が次の知覚入力に影響を及ぼすという形でフィードバックを構成している。そのため、行動中の感覚入力と行動選択の連関モデル及びその機能性については計測が難しく、解明が十分ではなかった。

2. 研究の目的

本研究では、生物(昆虫)の適応的行動選択という「賢さ」の工学的再現を通じて、極限環境で作業可能な人工システムの実現に資する知見の獲得を目指す。

申請者らはこれまでに、昆虫の脳神経出力に従って動作指令を生成する脳操縦ロボット[3]を実現し、行動と神経応答をリアルタイムに対応づけることに成功した。また、遺伝子改変による光刺激を用いた行動計測系[4]を実現した。これらを基盤とし、応答変化と機能性の連関についてモデル化する。すなわち、生物の多くが有している、感覚-行動応答の履歴・状況依存変化を解析し、機能上の効用を検証する。これをアルゴリズム化することで、工学モデルとして応用可能とする。

3. 研究の方法

本研究で研究対象とする状況依存的行動として、具体的に昆虫の匂い源探索行動に注目する。モデル生物として多くの研究成果の蓄積があるカイコガ *Bombyx Mori* 雄成虫を選定し、その雌個体への定位行動を解析対象と定め、性フェロモン刺激入力に対する行動出力応答の連関について計測・解析する。

この目的のために、計測者が任意に設定可能な仮想空間を生物の行動空間として提示するための実験装置を作成し、遺伝子改変カイコガを用いた高精度の刺激-応答計測を

可能とする。

行動解析にあたっては、情報エントロピー最大化の仮説[5]を元に、感覚-行動応答に対して匂い源位置推定への寄与を数値化し、応答の履歴・状況依存変化をモデル化する。最終的に、行動規範を工学的に応用可能なアルゴリズムとして実現する。

4. 研究成果

本研究の成果は主に、(1)対象生物の行動を非拘束で計測可能とする新奇な計測系の開発、(2)仮想空間との結合による対象生物の応答解析、(3)情報エントロピーを基盤とする対象生物の行動決定規範解析とアルゴリズムへの実装、に分けられる。

(1) 非拘束型行動計測装置の開発

本研究では「3自由度サーボスフィア」と呼ぶ新たな実験装置を提案・構築することで、計測対象生物を拘束することなく、持続的な行動の計測を可能とした。この実験装置は球体を3つの全方向車輪が支持した形状となっており、上部に高速度カメラ(500fps)を備えている(図1、雑誌論文③)。この球体頂部に計測対象となる昆虫を置くと、その位置・姿勢を高速度カメラで計測し、球体の回転量を制御することで、何ら物理的な拘束具を使うことなく自由かつ継続的な計測対象生物の行動観測を可能とした。これに加えて、計測対象生物の飛翔筋出力、頸運動神経の計測、さらには脳内の *Lateral Accessory Lobe* 領域からの電気生理応答の計測および対応付けを可能とした(学会発表②④⑤⑧)。

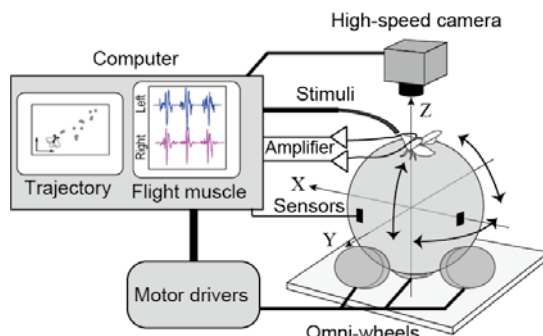


図1：3自由度サーボスフィアの構成

これらによって、本研究のモデル生物であるカイコガ雄成虫は、プログラム行動と呼ばれる一連の定型行動のさなかにおいても視覚を主とするフィードバックを用いていること、さらにそのフィードバックは一連の行動において一定ではなく、初期段階と中期・後期以降で神経応答が異なることを見出した(学会発表③)。

(2) 仮想空間との結合による応答解析

上記計測装置を用いてコンピュータ内の仮想空間とモデル生物を結合し、閉ループ型の行動実験系を構築した。これにより、現実では困難な空気中の化学物質挙動を明確か

つ任意に提示可能とした。実験結果に基づき、計測対象生物の行動を定量的に分類（雑誌論文②）およびエコステートネットワークを用いたモデル化（雑誌論文①）することで、計測対象生物の行動応答について個体差を含めた定量的解析を与えた。なお、この過程において、不確実性の多い化学物質による刺激提示に代えて、遺伝的操作によって匂い感覚を光受容に置き換えたカイコガを導入することで、刺激入力 の時間・空間解像度を大幅に改善した（学会発表⑦）。また、行動軌跡からだけではなく、飛翔筋の活動位相差による行動弁別手法を実現した（学会発表④⑥）。図2の白丸は性フェロモン刺激直後から0.5秒間、黒丸は9.5秒経過後の0.5秒間における飛翔筋電位の位相差を表している。刺激直後は直進動作、十分な時間経過後は回転動作を行うことが知られているが、両者が飛翔筋電位の計測によって統計上明瞭に区別可能であることが分かる。

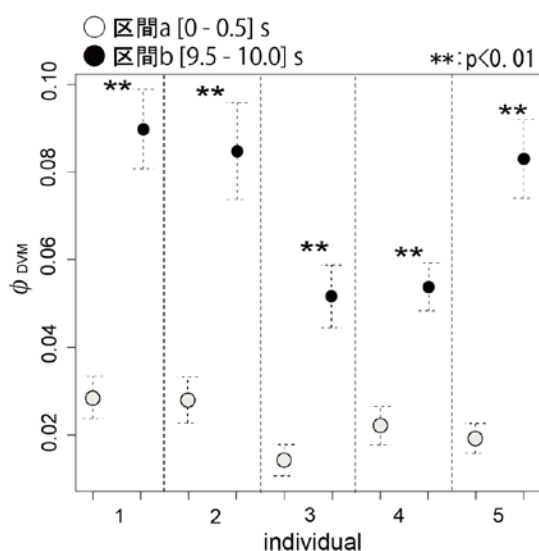


図2：飛翔筋位相差による行動弁別

(3) 情報エントロピーに基づく行動決定規範解析とアルゴリズムへの実装

定量的に計測・解析された計測対象生物の行動に対し、情報エントロピーを算出し、これを状態としたときの行動応答変化について解析した。空気中の性フェロモンを手掛かりに雌へ定位する行為は探索行動の1種と考えることができる。そこで、引用文献[5]に倣って雌位置の推定状況（存在確率の分布）から情報エントロピーを算出するとともに、計測対象生物の行動出力との対応関係を計測した。なお、ここでの情報エントロピーは値が大きいと不確実性が大きいことを示し、探索行動は情報エントロピーを減少させることにおおよそ対応する。

実験の結果、カイコガ雄成虫は情報エントロピー減少が期待できない場合、定型行動と呼ばれる決まった行動パターンに準拠した動作を発現する割合が多く観測された。一方、

情報エントロピーの減少が期待できる場合は、これと有意に異なる行動をする傾向にあることが分かった（図3，学会発表①）。このような行動方策の切り替えを仮想エージェントモデルに実装し、仮想空間でシミュレーションを行ったところ、方策の切り替えを伴わない場合に比べて異なる環境に対して定位成功率を高く保つことができる結果が示された。これにより、本研究は環境適応性を持つ状況依存的行動アルゴリズムの提案に成功したといえる。

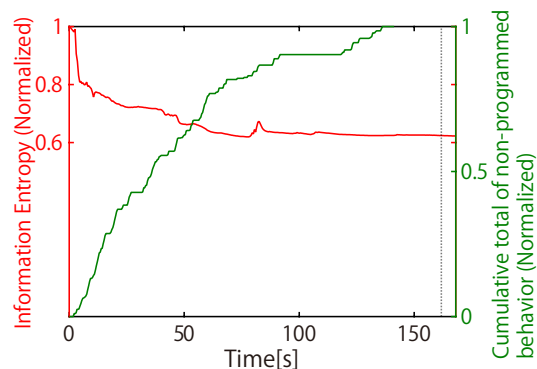


図3：定位例における情報エントロピー変化と非プログラム行動の累積発現数

<引用文献>

- [1] 特集：センサ情報の統融合（1990）日本ロボット学会誌，Vol.8，No.6.
- [2] 神崎亮平，倉林大輔（2007）生体-機械融合システムによる生物の環境適応性の理解と構築．計測と制御，Vol. 46，No. 12，934.
- [3] 高嶋淳，峯岸諒，倉林大輔，神崎亮平（2010）身体・脳・環境の相互作用に能動的に介入する脳-機械融合系の構築．日本ロボット学会誌，Vol. 28，No. 4，445-454.
- [4] Daisuke Kurabayashi, et al. (2011) Experiment System with Transgenic Silkworm Moth to Investigate the Role of Body functionalities in Chemical Plume Tracing. 2nd Int. Conf. on Morphological Computation, 78-80.
- [5] Massimo Vergassola, Emmanuel Villermaux, and Boris I. Shraiman (2007) 'Infotaxis' as a strategy for searching without gradients, Nature 445, 406-409.

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕（計3件）

- ① Jouh Yeong Chew, Daisuke Kurabayashi, and Yudai Nakamura (2015) Echo State Networks with Thikonov Regularization: Optimization using Integral Gain. Advanced Robotics (査読有) Vol. 29, No. 12, 801-814.
DOI:10.1080/01691864.2015.1010576

- ② Jouh Yeong Chew and Daisuke Kurabayashi (2014) Quantitative Analysis of the Silk Moth's Chemical Plume Tracing Locomotion Using a Hierarchical Classification Method. *Journal of Bionic Engineering* (査読有) Vol. 11, No. 2, 268-281.
DOI: 10.1016/S1672-6529(14)60036-6
- ③ 志垣俊介, 福島俊平, 峯岸諒, 倉林大輔, 神崎亮平 (2014) カイコガ行動計測のための3自由度サーボスフィアの構築. *日本機械学会論文誌* (査読有) Vol. 80, No. 813, 1-14.
DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0131

[学会発表] (計29件)

- ① 岩崎孝弘, 倉林大輔, 福島俊平, 峯岸諒 (2016) カイコガの匂い源探索行動における推定状態算出とパフモデル環境への適用. 第21回ロボティクスシンポジウム, 伊王島 (長崎), March 17-18.
- ② Shunsuke Shigaki, Shunpei Fukushima, Daisuke Kurabayashi, Ryohei Kanzaki (2015) Development and Evaluation of Simultaneous Measurement Device between Biosignal and Behavior of Animal. INCF Japan Node International Workshop Advances in Neuroinformatics 2015, The University of Tokyo (Tokyo), Nov. 26-27.
- ③ Hirotoshi Kono, Ryo Minegishi, Shunsuke Shigaki, Daisuke Kurabayashi (2015) The Analysis of Visual Feedback on Odor-source Searching Behavior of Male Silkworm Moth from the Activity of Neck Motor Neurons. INCF Japan Node International Workshop Advances in Neuroinformatics 2015, The University of Tokyo (Tokyo), Nov. 26-27.
- ④ Shunsuke Shigaki, Fukushima Shunpei, Ryo Minegishi, Daisuke Kurabayashi, and Ryohei Kanzaki (2015) Decomposition of Locomotion Pattern of Insect by Flight Muscle Electromyograms. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, WA (USA), May 26-30.
- ⑤ Ryo Minegishi, Daisuke Kurabayashi, Ryohei Kanzaki (2014) Analysis of protocerebral neural activity relating to odor source searching locomotion of silkworm moth. International Neuroethology Congress, Sapporo Convention Center (Hokkaido), Jul. 29-Aug. 1.

- ⑥ Shunsuke Shigaki, Shunpei Fukushima, Ryo Minegishi, Daisuke Kurabayashi, Ryohei Kanzaki (2014) Sequences decomposition of an odor-source searching behavior of a silkworm moth based on flight muscle electromyograms on 3 DOF servo-sphere. International Neuroethology Congress, Sapporo Convention Center (Hokkaido), Jul. 29-Aug. 1.
- ⑦ Kotaro Kishi, Daisuke Kurabayashi, Ryo Minegishi, Takeshi Sakurai, Ryohei Kanzaki, Masashi Tabuchi and Hideki Sezutsu (2014) Experiment of Stereo-sensors for Chemical Plume Tracing by Optogenetic Silkworm Moth. The 13th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, Padova (Italy), Jul. 15-19.
- ⑧ Ryo Minegishi, Yosuke Takahashi, Atsushi Takashima, Daisuke Kurabayashi, and Ryohei Kanzaki (2013) Adaptive Control System of an Insect Brain during Odor Source Localization. the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo Bigsight (Tokyo), Nov. 03-07.

[図書] (計1件)

- ① Hitoshi Aonuma, Midori Sakura, and Daisuke Kurabayashi: Memory mediated by internal state: memory of lost suppresses motivation of fight in the cricket. in *Memory Consolidation*, 2015, 37-52. (Eds: Sakakibara M. and Ito E) Nova Science Publisher.

[産業財産権]

なし

[その他]

ホームページ等

<http://www.irs.ctrl.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉林 大輔 (KURABAYASHI, Daisuke)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：00334508

(2) 研究分担者

(なし)

(3) 連携研究者

(なし)