

平成22年5月31日現在

研究種目：特定領域研究
研究期間：2005～2009
課題番号：17075007
研究課題名（和文） 生体の適応行動発現に対するネットワーク機能構造からの理解
研究課題名（英文） Adaptive behaviors emerged by functional structures in interaction networks
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・准教授 研究者番号：00334508

研究成果の概要（和文）：

本研究では、生物の持つ環境適応能力のうち、状況適応的な行動選択過程について研究した。本研究では、従来の分析的アプローチを補完する構成論的アプローチをとり、昆虫の微小脳が発揮する適応能解明のために、昆虫—機械融合系という新奇な実験システムを構築した。これによって、身体変容に対する動的な適応系の特性について明らかにした、これと並行して、非線形振動子を用いた数理モデルにより、適応機能発現の根幹をなす長期応答及び定型行動生成のための機能的ネットワーク構造をモデル化した。

研究成果の概要（英文）：

Insects have only a little brain but the behavior is highly adaptive. We consider that physical structure of the interaction network works on the creation of the brain function and model the behavioral processor that controlled by its structural disposition. In this research, we investigate mechanisms for intelligent behaviors through novel approach called bio-machine hybrid systems. We focus on (i) development of insect-BMI robot to investigate adaptabilities, and (ii) analysis of network property to expose long-lasting excitation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	12,800,000	0	12,800,000
2006年度	16,500,000	0	16,500,000
2007年度	13,700,000	0	13,700,000
2008年度	20,000,000	0	20,000,000
2009年度	7,700,000	0	7,700,000
総計	70,700,000	0	70,700,000

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：感覚行動システム，微小脳，異種感覚統合，昆虫—機械融合システム

1. 研究開始当初の背景

少子高齢化社会に突入する我が国において

て、第二次産業だけでなく第一次産業や第三次産業でのロボット等の活用が期待されて

いる。しかし、現状のロボットは、事前に想定された環境に限り高効率な動作が可能な設計となっている。工場のようなロボット用に整備された環境から、人間と共存し、あるいは自然環境中にロボットを展開するためには、多様な環境情報に基づいて、適切な判断、すなわち適応的な行動選択を行うメカニズムの解明が必須である。

これに対し、生物はその生存のため、例外なく適応的な行動選択メカニズムを有している。我々人間は 1000 億もの神経細胞を持つが、その 100 万分の 1 程度の神経細胞しか有さない昆虫が世界で最も広く環境に適応し、反映した種となっている。このようなことから、処理系の規模だけでなく、自身の身体構造を含めた環境と脳・神経系の相互作用が、適応的な行動選択を生じさせる重要な役割を果たしていることが予想される。これを理解し、工学的に再構成可能なレベルで解明することによって、いままでの人工物に欠けていた、適応的行動選択能力の基盤となる技術が得られると期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、生物の持つ多様な環境適応能の中で、行動の選択・切替過程について研究する。ネットワーク理論等はその構造自体に機能発現能を持つことが近年の研究により明らかになっている。そこで、生体内および身体を通じた環境との作用に見られるネットワークの構造・遷移と機能の解析によって、環境適応能を理解することを目的とした。

この目的に対し、脳・身体および環境の相互作用が発揮する適応能について、その行動面（マクロ）からの解析と、脳・神経系の電氣的・化学的作用（ミクロ）からの解析の統合を目指す。その過程で、情報処理および相互作用ネットワークの機能解析および工学的再構成を試みた。

本研究では、哺乳動物に比べ神経回路規模が小さいながら、環境適応能力の高い昆虫の微小脳を主な対象とし、昆虫-機械融合システムという新奇な実験系と、非線形振動子を素子とする数理モデルによるネットワーク機能構造の解析を相補的進め、身体・脳・環境の相互作用と適応能の連関について解明を行った。

3. 研究の方法

適応とは、限定された知覚・行動能力を用いて外界状況を変容を内部状態へ反映させ、それに基づく行動出力の変容を生じさせることであると考えられる。

生物行動の発現機構の研究はこれまで脳機能に重点がおかれ、構成素子たる神経細胞

を要素還元論的に分析するアプローチが主であった。しかし脳を環境や身体から独立させて、その適応能を理解することは不可能である。つまり、脳を構成する素子・神経細胞からボトムアップに脳機能を推定しても、その機能の妥当性の評価・検証が困難で、適応的脳機能をとらえるには限界が生じる。

そこで我々は、ボトムアップアプローチを補完し、適応能そのものを評価・検証できる新たなアプローチ「昆虫-機械融合システム」を軸に据え、実験システムを通じた知見の統合によって、微小脳における移動知発現メカニズムの理解を行った。このシステムは、身体をロボットに置き換えることで、昆虫の移動により生じた感覚フィードバックを我々が自由に操作できる、新規な方法論を提供するものである。これと並行して、神経細胞を模した最も単純な表現素子である位相振動子を用いることで、素子ではなく構造がもたらす機能について定式化し、同定に際して 1 つの可能性を示すとともに、工学的再構成における設計手法を明らかにした。

なお、本研究では、雌の性フェロモン刺激によって、明瞭な本能行動であるフェロモン源定位行動を発現する雄カイコガ (*Bombyx mori*) を主たるモデル生物とした。カイコガ雄は、雌の出す性フェロモンを感知すると、翅をはばたかせながら、まず少し前進 (Surge) した後、左右に 2, 3 回ジグザクに動き (Zigzag-Turn) , 最終的には回転 (Loop) する、という一連のプログラム行動を発現する。この一連の行動中に、再びフェロモン刺激を受けると、行動パターンをリセットし、再び Surge から行動を開始する。このようなプログラム行動とその修飾によって、空气中を漂う化学物質の発生源追尾という非自明な問題を解決している。

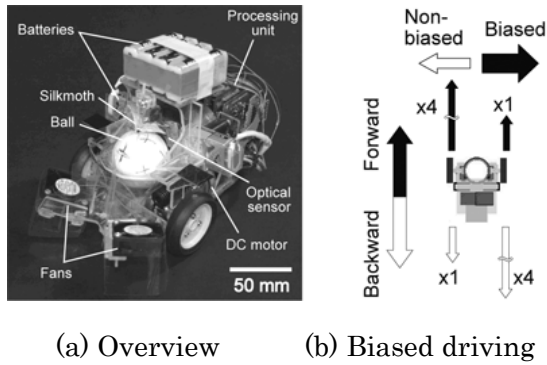
4. 研究の成果

(1) 昆虫操縦型ロボットによる適応能計測
「昆虫操縦型ロボット」は、搭載された昆虫の歩行運動によって操縦される移動ロボットである。移動ロボットのモータパラメータを操作して、本来生物が意図しない運動を引き起こすことで、昆虫自身の持つ適応能力を評価できる。ここでは、このシステムによって得られた、カイコガのフェロモン源定位行動における視覚情報の役割と運動補償機構の知見について述べる。

① 視運動反応による本能行動の修飾

Fig. 1(a)に昆虫操縦型ロボットを示す。雄カイコガは背中を固定され、中央部のボール上に固定される。このボールがカイコガの歩行運動によって回転させられると、光学センサによって動きが読み取られ、ロボットの運

動として再現される。



(a) Overview (b) Biased driving

Fig. 1: Experimental setup of an insect-controlled robot.

まず、Fig. 1(b)に示すように、左右非対称なモータ回転のゲインを設定した条件で、ロボットを操縦するカイコガが、視覚情報によってゲインのバイアスを補正し、フェロモン源へ到達できるか評価した。昆虫の多くは、自身の運動による背景の相対的な動き(Optic flow)を検出し、視運動反応(Optomotor response)と呼ばれる反射の系で経路の補正を行うことが知られている。しかし、カイコガではフェロモン刺激によって解発されるプログラム行動の影響が強く、その効果を行動学的に調べることは困難であった。本研究では、この視覚情報(Optic flow)の有無を、カイコガの前面に透明なカバー(視覚情報有)、もしくは白色のカバー(視覚情報無)を取り付けることで操作した。ロボットを雌性フェロモンの主成分である bombykol の流れる風洞(1800(L) x 900(W) x 300 mm(H))へ入れ、スタート地点より 60 cm 離れたフェロモン源への定位を観察した。視覚情報の有無によるそれぞれの定位行動の軌跡(時計回りのバイアス 7 例)を Fig. 2 に示した。

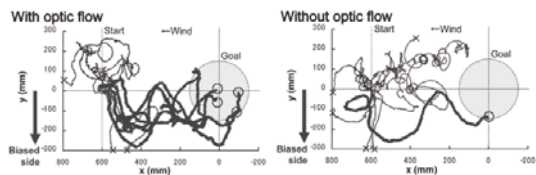


Fig. 2: Trajectories of the manipulated robot with (left) and without optic flow (right).

すべての実験の結果、Optic flow ありでは 7 個体 14 例中 11 例で定位に成功したのに対して、Optic flow なしでは 7 個体 14 例中わずか 4 例の成功にとどまった。また、通常の左右対称なゲインで走行中に、急に非対称なゲインに切替えたところ、バイアスを打ち消す方向へ有意に旋回を始める補償運動は、切り替え後 1 秒以内に起こることも分かった。

以上から、カイコガは、視覚情報を定位行動中に利用しており、ゲイン操作に対して反射的な補償(視運動反応)を行い、フェロモン源へ定位できることが明らかになった。

②時間遅れに対する感覚-運動系の応答評価

時々刻々と変化する環境に適応するためには、状況に即した行動を発現する必要がある。一方で、視覚情報による反射と嗅覚情報による本能行動とは、それぞれの感覚-運動系の実時間性が大きく異なることが予想される。このことを確認するために、カイコガの歩行運動とロボットの運動との間に時間遅れ(0-1000 ms)を設定し、雌性フェロモン源に対する定位実験を行った。また、左右非対称なモータ回転のゲインを設定した条件でも同様の実験を行い、前述の視運動反射の実時間性を評価した。実験はそれぞれ 10 個体を用い、各時間遅れに対して 1 試行ずつ行い、適応性評価の指標として定位成功率を計算した。

Fig. 3 に、時間遅れに対する定位成功率の変化を示す。標準の左右対称なゲイン(1:1)の条件では、600 ms の時間遅れに対しても、80%の定位成功率を示した。また、1000 ms の遅れに対しても 50%の個体が定位に成功した。一方、左右非対称なゲイン(1:4)では、時間遅れに対して急激に成功率が低下し、400 ms の時間遅れで 50%にまで低下した。

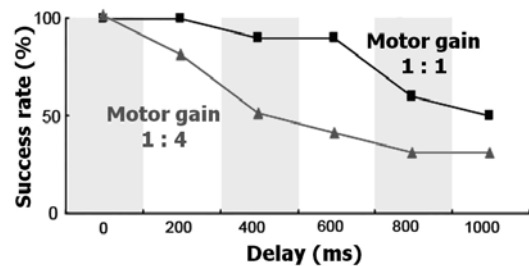


Fig. 3: Relationship between success rate of localization and delay of motor control of the robot.

標準のモータゲイン(1:1)の条件で、時間遅れに対しても高い成功率を示したことは、フェロモン源定位行動にとって、時間遅れに厳密な実時間フィードバックがそれほど重要でないことを意味する。空気中で匂い分子は離散的に分布するため、濃度勾配に依存した化学走性(反射)による定位が難しいこと、そして、カイコガのフェロモン源定位行動が、反射(実時間フィードバックによる行動)ではなく、定型的な本能行動、すなわち感覚入力によって解発される定型的なプログラム行動であることはこの実験結果を強く支持する。一方、非対称なゲイン設定で、時間遅れに対する定位成功率が急激に低下したこ

とは、この条件下では実時間フィードバックによる行動調節が強く働いていることを示唆する。このことは、視覚情報が、高速な実時間フィードバックによる反射の系によって行動の修飾に機能することを支持するものである。

(2) 昆虫脳操縦ロボットによる適応行動発現

本章では、胸部神経節を介さずに、直接脳からの指令によって機械身体を駆動する、昆虫脳操縦ロボットについて述べる。本研究では、計測系・情報処理系・駆動系・電源の全てを内包する昆虫脳操縦ロボットを完成させ、神経パルスからの運動再構成および定型行動観測を達成した。

① 神経信号の計測と行動への変換則

本研究ではカイコガの頸運動神経 2ndCNb から運動指令を計測する。2ndCNb は左右それぞれ 5 本の神経からなり、それぞれ頸を左右に振る筋肉に接続されている (Fig. 4A)。腹や胸の神経節から脳へ戻る神経は切断してしまうため、カイコガの体性感覚は脳にフィードバックされない。脳において体感覚よりも視覚や嗅覚の入力が主に出力を決定していると考え、このような計測手法をとった。

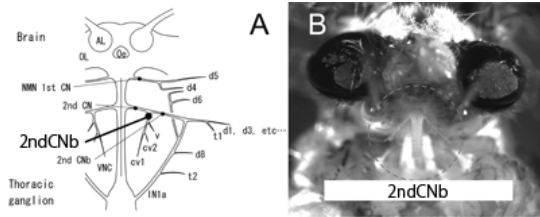


Fig. 4: Silkworm moth's nerves and 2ndCNb.

無風状態で雄カイコガの片側または両側の触角に一過的なフェロモン刺激 (幅 0.1 秒) を一回だけ与えた場合の計測結果を基準として、神経信号から行動の再構築を行った。定型行動中のカイコガは、平均回転角速度は約 $\pi/9$ [rad/s], 最大回転角速度は約 $\pi/3$ [rad/s], 平均前進速度は約 25 [mm/s], 最大前進速度は約 80 [mm/s] とされている。

体軸角度を θ , 体軸に対する頸の角度を ϕ とすると、 $\theta = a\phi + C$ と表現できる。ここで a , C は定数である。

次いで、測定された神経パルス信号から行動への変換則を求める。カイコガの頸の最大曲げ角度 π_{\max} , パルス計数周期を 10 [Hz], 単位計測時間中の左右のパルス数をそれぞれ n_l , n_r とする。これらの値が二値的な値をとることから、適切なスレッシュホールドを h と設定し、スレッシュホールドを超えない範囲であればなめらかに変化することとする。

$$\phi = \begin{cases} \phi_{\max} \operatorname{sgn}(n_d) & (|n_d| > h) \\ \phi_{\max} n_d & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)より、神経信号から体軸角度への変換を決定した。ここで $n_d \equiv n_l - n_r$ である。

② 昆虫脳操縦システムの実装と実験

これまでの検討に基づき、カイコガ頭部・記録電極・アンプを含め、完全自律な移動神経計測システムを製作した (Fig. 5)。

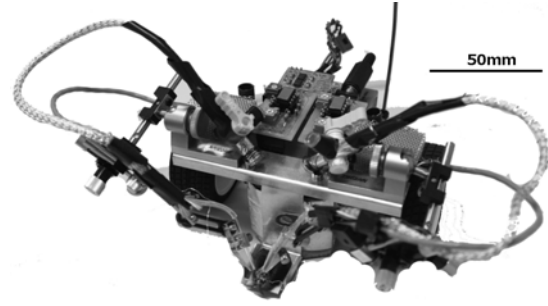


Fig. 5: Overview of the brain-machine hybrid system

この実験システムを用いて、風洞にて匂い源定位実験を行った。風洞は幅 840 [mm], 長さ 1500 [mm], 高さ 240 [mm] で、吸気側のスリットにより整流され、排気ダクトにより外部へ放出されている。風洞内でフェロモン単発刺激を与え、その行動軌跡を解析した。実験における走行結果を Fig. 6 に示す。図中右側が風上であり、昆虫脳操縦ロボットは左端から行動を開始した軌跡である。

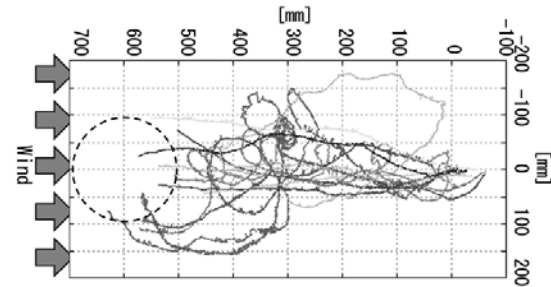


Fig. 6: Experimental trajectories.

実験では 14 個体のカイコガのうち 11 例で定位が見られた。この結果は、本研究にて製作した昆虫脳操縦システムが、実際のカイコガが発揮する行動について、定位を実現するのに十分な範囲での再現が可能であることを示している。このことは、実際のカイコガと異なる駆動方式及びボディサイズにおいても定位が可能であるとの結果であり、身体の機械による置換によって適応能を計測する、という昆虫脳操縦システムの目的が達成されていることを示している。

(3) 振動子回路網による機能構造モデル

本研究では、生体の直接的なモデル化と並行して、振動子を素子とした機能的構造のモデル化を進めた。カイコガのプログラム行動におけるジグザグ歩行のように、生物は神経細胞単体の応答時間に比べ非常に長期の応答を発現できる。また、その神経系は複数の素子によって構成されている。このようなシステムを理解するために、神経細胞の自律発火表現として最も単純であると考えられる、位相振動子を素子とする回路網をモデルとし、構造によって発揮される長期応答と、これに基づく定型行動生機構の解析を行った。非線形振動子は自律素子であり、素子間の同期形成能力や、抑制型結合の情報処理系を表現するのに適している。

いま、位相振動子の出力を状態量 ϕ の関数 $f(\phi)$ と表す。ここでは $f(\phi)=\cos^{20}(f(\phi)/2)$ とし、パルスに近い形状とした。複数の振動子からなる回路の出力 F を(2)とした。 N は素子の総数である。

$$F(\phi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\phi_i), \quad \phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]^T \quad (2)$$

ここで、各振動子の運動方程式を(3)と設計する。 a_{ij} は素子 i と j が接続されているときに1、それ以外で0となる係数で、接続関係を表現している。

$$\dot{\phi}_i = \omega + \frac{\kappa}{N_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} f(\phi_j) g(\phi_i) + \alpha_i + \beta_i \quad (3)$$

ここで $g(\phi_i) = \sin(\phi_i)$ は入力感度を表す関数、 α_i および β_i は応答開始および停止を与える外部入力とする。このとき、

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_i &\approx \omega + \frac{\kappa}{2\pi N_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} \sin(\phi_i - \phi_j) \\ &\approx \omega + \frac{\kappa}{2\pi N_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} (\phi_i - \phi_j) \end{aligned} \quad (4)$$

と近似すると、ネットワークの接続関係を表すグラフラプラシアン L を用いてシステムの挙動を(5)と表すことができる。ただし $1_N = [1, 1, \dots, 1]^T$ の意である。

$$\dot{\phi} = \omega 1_N + \frac{\kappa}{2\pi} L \phi \quad (5)$$

素子の位相差をシステム平均値からのずれ Ψ_i と考えると

$$\psi_i = \phi_i - \frac{1}{N} 1_N^T \phi \quad (6)$$

であり、その挙動は(7)となり、もはや素子の固有振動数 ω と無関係に、ネットワーク構造

L のみによって挙動が求まる。

$$\dot{\psi} = \frac{\kappa}{2\pi} \hat{L} \psi, \quad \hat{L} = \left(I - \frac{1}{N} 1_N 1_N^T \right) L \quad (7)$$

これらにより、応答時間、入力 α_i および β_i がグラフ上の制御理論を用いて解析・設計が可能となり、Fig. 7のような出力 F 及びその縫絡線 F_P の長期応答、応答の再開、停止が発現可能となった。

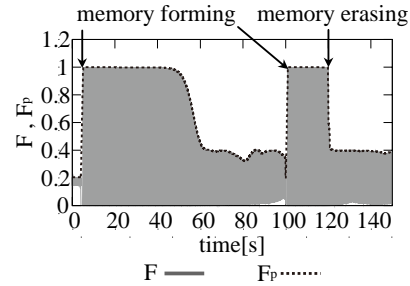


Fig. 7: Switching of F and F_P by external inputs

これを規範とし、容量性結合を用いて回路を拡張することにより、カイコガ定型行動（直進・ジグザグ・旋回）を位相振動子という均質素子の構造によって生成することができることを示した。Fig. 8は時刻0で応答動作指令（刺激入力）を与えた後の右（上段）及び左（下段）出力の時間発展を示している。これにより、刺激後左右交互に出力が高まった後、一方向の出力のみとなり、最終的に沈静化する、という行動出力が実現されている。

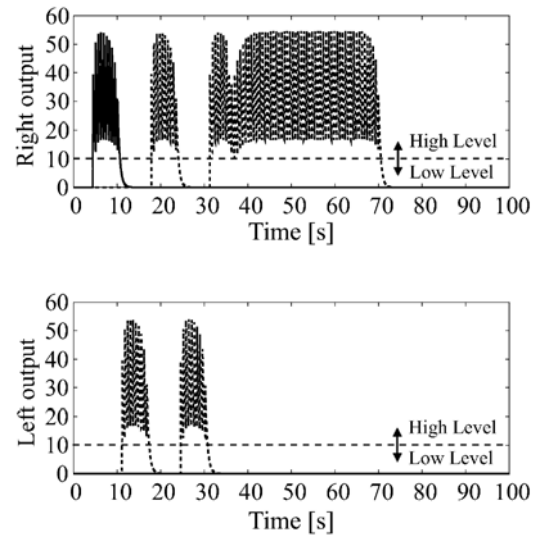


Fig. 8: Sequential pattern generated by the oscillator network

(4) まとめ

本研究の成果によって、本能的なプログラム行動と感覚入力に基づくフィードバックの両者が統合されることで、複雑な匂い環境

や身体性の変化に対しても、匂い源定位能力という目的に対して高い性能を発揮するシステム構造が示された(Fig. 9). さらなる解剖学的・生理学的知見と、数理モデルに基づく制御構造の統合によって、神経系の可塑性・上位学習系の解明が進むと期待される。

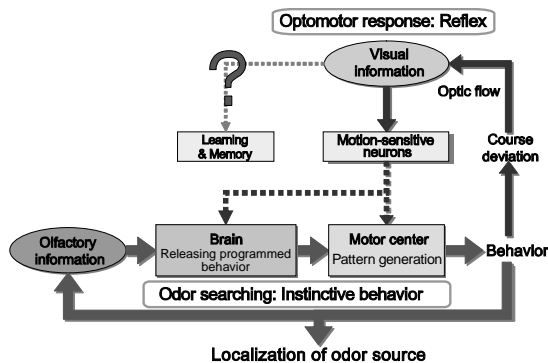


Fig. 9: A schematic drawing of the pheromone searching behavior of the silkworm.

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 27 件)

- ① 高嶋淳, 峯岸諒, 倉林大輔, 神崎亮平: 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, 28(4), 445-454, 2010, 査読有
- ② Iwano M, Hill E, Mori A, Mishima T, Kumagai T, Ito K and Kanzaki R: Neurons Associated With the Flip-Flop Activity in the Lateral Accessory Lobe and Ventral Protocerebrum of the Silkworm Moth Brain, J. Comp. Neurol., 518, 366-388, 2010, 査読有
- ③ 山下敦, 安藤規泰, 佐野泰仁, 安藤敏之, 高橋宏知, 神崎亮平: 身体と環境の相互作用に基づく昆虫の衝突回避機構解明のための閉ループ行動実験装置の構築, 日本ロボット学会誌, 27(7), 704-710, 2009, 査読有
- ④ Namiki S, Haupt SS, Kazawa T, Takashima A, Ikeno H, and Kanzaki R: Reconstruction of virtual neural circuits in an insect brain, Focus Review, Frontiers in Neuroscience, 3(2), 206-213, 2009, 査読有
- ⑤ Funato T and Kurabayashi D: Network Structure for Control of Coupled Multiple Non-Linear Oscillators, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics B, 38(3), 675-681, 2008, 査読有
- ⑥ Funato T, Kurabayashi D, Nara M and Aonuma H: Switching Mechanism of Sensor-Motor Coordination through

Oscillator Network Model, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics B, 38(3), 764-770, 2008, 査読有

⑦ Namiki S, Iwabuchi S and Kanzaki R: Representation of a mixture of pheromone and host plant odor by antennal lobe interneurons of the silkworm Bombyx mori, J. Comp. Physiol. A, 194, 501-515, 2008, 査読有

[学会発表] (計 85 件)

① Moriyama T and Kurabayashi D: An Oscillator Network with a Temporary Memory Function, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2024-2029, Feb. 21-26, 2009, Bangkok, Thailand

② Kanzaki R: Odor source localization by an insect-robot hybrid system, IEEE Asia-Pacific Conf. Applied Electromagnetics, Invited lecture, Oct. 27-30, 2009, Hawaii, USA

③ Minegishi R, Takashima A, Kurabayashi D, Kanzaki R: Brain-Machine Hybrid System to Evaluate Adaptability in an Insect, 3rd Int. Symp. on Mobiligence, 299-303, Nov. 19-21, 2009, Hyogo, Japan

[図書] (計 3 件)

① 神崎亮平, 倉林大輔: オーム社, 移動知-適応行動生成のメカニズム (浅間一, 矢野雅文, 石黒章夫, 大須賀公一, 編), 2010, 285.

② Haupt SS, Sakurai T, Namiki S, Kazawa T, Kanzaki R: CRC Press, Olfactory information processing in moths, The Neurobiology of Olfaction (ed. Mennini A), 2009, 4448.

③ 神崎亮平: フレグランスジャーナル社, ロボットで探る昆虫の脳と匂いの世界-ファール昆虫記のなぞに挑む-, 2009, 142.

[その他]

ウェブページ

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

<http://www.brain.imi.i.u-tokyo.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・准教授
研究者番号: 00334508

(2) 研究分担者

神崎 亮平 (KANZAKI RYOHEI)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授
研究者番号: 40221907