

## 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5月23日現在

機関番号：15401

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20115010

研究課題名（和文） 生物行動のシステム工学的解釈とバイオミメティック・センサ・システムの提案

研究課題名（英文） Interpretation of biological behavior from a systems engineering point of view and its application to biomimetic sensor systems

研究代表者 辻 敏夫 (Tsuji Toshio)  
広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：90179995

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、線虫(*C. elegans*)の放射線刺激に対する情報伝達の経路を明らかにし、化学走性とリズム運動の生成メカニズムを解析し得る数理モデルを構築した。また、マウスとラットを対象として、匂いの構成成分に対する選択的注意と嗅球糸球体層の神経活動を再現可能な嗅覚系モデルを構築し、神経活動から匂いの類似度を予測できる可能性を示した。さらに、小型魚類の生体電気信号と行動情報を用いて、水質汚染を迅速に検出可能なバイオアッセイシステムを構築した。

## 研究成果の概要（英文）：

This study revealed paths of signal transduction regarding radiation stimulus of *Caenorhabditis elegans* (*C. elegans*) and constructed mathematical models of *C. elegans* to enable analysis of the mechanisms behind chemotaxis and rhythm generation. Mathematical models of the olfactory system were also constructed based on biological insight regarding mice and rats, and the study enabled simulation for selective attention in relation to odorant components, prediction of neural responses on the glomerular layer of the olfactory bulb, and prediction of perceptive similarities between odorants based on glomerular responses. Further, a bioassay system incorporating the use of small fish was created to allow immediate detection of water contamination.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	17,400,000	5,220,000	22,620,000
2009年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2010年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2011年度	13,800,000	4,140,000	17,940,000
2012年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
総計	64,600,000	19,380,000	83,980,000

研究分野：生体システム工学

科研費の分科・細目：機械工学、情報学・知能機械学・機械システム、生体生命情報学

キーワード：生物模倣型センサシステム、化学受容、刺激応答、線虫の神経-筋モデル、マウスの嗅神経系モデル、バイオアッセイシステム、呼吸波

## 1. 研究開始当初の背景

近年、環境中に存在する化学物質が生物に

与える影響を定量評価するためのセンサ・システムの必要性が指摘されており、その研究開発が盛んに行われている。しかし、極めて

広範囲にわたる化学物質をカバーすることと化学物質の微妙な違いを識別することの2つを同時に満足するようなセンサ・システムを工学的に構築するのは容易ではなく、生物の嗅覚系に匹敵するような人工システムはまだ実現されていない。また、工学的な分析法のみに基づくアプローチでは、化学物質が生物に及ぼす生理的・心理的影響を予測することまでは難しく、従来の工学的アプローチに代わる新しい方法論が必要とされている。

これまで研究代表者らは「生体システムに学ぶ」、「生体システムを利用する」という立場で、機械システムの設計や制御に有用な技術の研究開発を進めてきたが、センサ・システムの研究開発においても、生体システムに学び、生体システムを利用するというアプローチが有効であると考えられる。生物の環境応答（例えば、化学走性行動）を考えると、分子と行動の間に横たわるブラックボックスの動作メカニズムを明らかにすることは、①外的・内的刺激の受容、② 刺激情報の統合処理、③ 行動の決定と運動制御という3つの機能を担う生体情報処理メカニズムをシステム工学的に解釈することと等価であり、その3つの機能を工学的に再構築することにより生物の感覚系に匹敵する人工センサ・システムを実現できる可能性がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、感覚入力に対する応答を行動出力（運動）によって評価することが比較的容易な線虫、げっ歯類（マウス、ラット）及び小型魚類（ゼブラフィッシュ、メダカ）を主な対象として、以下を達成目標とした。

(1) 環境刺激に対する生物行動モデルの構築とシミュレーション

(2) 生物の情報処理メカニズムに基づくバイオメディック・センサ・システムの開発(要素技術の創出)

## 3. 研究の方法

本研究では、前述の達成目標を以下の方法に基づき実施した。

**(1)環境刺激に対する生物行動モデルの構築とシミュレーション**

1) 線虫の刺激応答実験と神経-筋モデルとにより刺激応答の神経情報処理メカニズムを探る

2) マウスの嗅神経系モデルと行動実験とにより匂い識別に有効な選択的注意のメカニズムを探る

**(2)生物の情報処理メカニズムに基づくバイオメディック・センサ・システムの開発(要素技術の創出)**

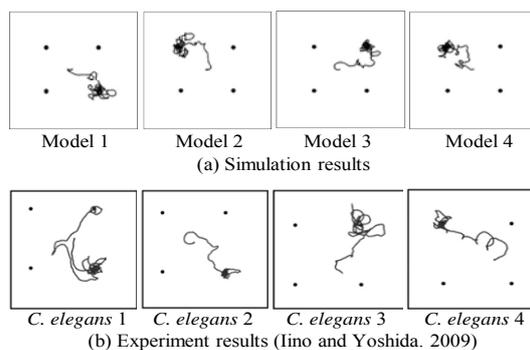


図1 線虫の化学走性シミュレーションの結果  
(運動軌跡)

- 3) 線虫の刺激応答メカニズムを応用して移動ロボットの環境適応制御を実現する
- 4) マウスの匂い識別アルゴリズムを実装した匂いセンサシステム（人工官能検査装置）を開発する
- 5) 小型魚類を「生きたセンサ」として用いたバイオアッセイ（水質検査装置）システムを開発する

## 4. 研究成果

項目1) について、主にA)~C) の成果を得た。

### A) 線虫の神経-筋モデルを用いた化学走性シミュレーション

線虫の刺激応答における感覚入力と行動出力（運動）の関係を解析するために、線虫の全身運動を担う体壁筋造に基づく身体モデルを構築した。まず、2次元平面上で回転する関節で連結された12セグメントの剛体リンクで線虫の身体を近似し、ニュートン・オイラーの運動方程式に基づいて記述した。この身体動力学モデルを用いたシミュレーションにより、研究計画班の飯野が提唱する「風見鶏機構」と「ピルエット機構」の2つの戦略からなる線虫の化学走性メカニズム[Iino & Yoshida, 2009]を計算科学の側面から検証した。線虫の身体動力学モデルを感覚入力に基づいて制御するために、感覚入力から行動指令を生成する神経回路モデルを構築し、身体動力学モデルを含めた3つのサブシステムからなる線虫シミュレータプラットフォームを完成させた。飯野らの文献[Iino & Yoshida, 2009]に基づいてNaClの濃度分布とその経時変化を記述し、開発したモデルを用いてシミュレーションを行った結果、実生物の運動軌跡（図1a）と類似した運動軌跡（図1b）が得られた。このとき、NaClへの誘引の強さを表すChemotaxis Index (C. I.)を実生物と比較した結果、ほぼ同等の値が得られることを確認した（実生物0.57, モデル0.59）。また、風見鶏機構のみを神経回路モデルに組み込んだ場合にはC. I.が著しく低下したことがか

ら、風見鶏機構が NaCl の探索に不可欠であることが計算科学の面からも裏付けられた。(Soh *et al.*, EMBO Conference Series: *C. elegans* Neurobiology, 2012)。

### B) 線虫の運動を変化させる放射線の神経作用メカニズムの解析

線虫の環境刺激に対する応答のうち、化学物質応答に比べて未知な部分が多い放射線刺激に対する応答に着目し、運動を指標として調べた。線虫は、餌の存在下においては餌への接触に起因するドーパミンを介した情報伝達により全身運動が強く抑制されており、放射線に曝してもその影響は現れなかった。ところが、ドーパミンの情報伝達に異常があり、餌による全身運動の低下反応が弱くなった突然変異体に 0-500 Gy の <sup>60</sup>Co ガンマ線を照射したところ、餌による全身運動の低下に加えて放射線量依存的な全身運動の低下が相加的に観察された。このことから、放射線刺激による全身運動の低下の主因は、ドーパミンを介した情報伝達とは異なる情報伝達であることが推測された。さらに、過酸化水素に曝露した線虫の全身運動は、放射線を照射した線虫の全身運動と類似していたことから、放射線による全身運動の低下は、放射線により産生された活性酸素種などを介した情報伝達により誘導されている可能性が示唆された (Suzuki *et al.*, *Journal of Radiation Research*, 2009; 坂下& 鈴木, 放射線生物研究, 2011)。また、餌の咀嚼及び嚥下を担う咽頭筋のポンピング運動における放射線応答についても調べたところ、全身運動同様に放射線の照射線量依存的に低下すること、低下した運動は 2 時間以内に回復することが明らかとなった (Suzuki *et al.*, 18th International *C. elegans* Meeting, 2011)。

### C) 線虫の運動リズム生成・制御メカニズムの解析

研究成果 B) で見出した放射線刺激による線虫の運動の一時的な変化に着目し、その素過程である運動生成・制御の基本的メカニズムを明らかにするためのシミュレーション解析系の構築に着手した。線虫の全身運動の制御を担う運動ニューロンの神経回路を生物のリズム発生器 (CPG) の数理モデルである神経振動子としてモデル化した。また、モデルに含まれる多くのパラメータを自動で調整するアルゴリズムを独自に開発して適用し、線虫の前進運動から観測したリズム信号をシミュレートすることに成功した。モデルに含まれる一部のシナプスを仮想的に除去し、応答の変化を調べるシミュレーションにより、運動リズム生成・制御への個々のシ

ナプスの関与を推定する細胞・シナプス機能推定法を考案した (Hattori *et al.*, *Neural Computation*, 2012)。

一方、咽頭筋のポンピング運動については、筋細胞が運動リズムの生成を行い、ニューロンがそのリズムを制御している。そこで、筋細胞ネットワークの運動リズム生成メカニズムを探るために、咽頭の 20 個の筋細胞モデルからなる咽頭筋細胞ネットワークモデルを構築した。シミュレーションにより、提案モデルは、実験的手法による計測が困難な運動時の個々の細胞の膜電位をシミュレートできるだけでなく、膜電位の総和である咽頭筋電位の実測値をよく再現することを確認した (Hattori *et al.*, *Artificial Life and Robotics*, 2012)。さらに、細胞・シナプス機能推定法を応用して個々の咽頭筋細胞の運動リズム生成への関与を推定し、重要な筋細胞を 2 種類にまで絞り込むことに成功した (Hattori *et al.*, 19th International *C. elegans* Meeting)。

次に項目 2) については、主に D) 及び E) の成果を得た。

### D) マウスの嗅神経系モデルによる匂い識別シミュレーション

マウスの匂い感覚特性を明らかにするために、Y-maze を用いた匂い識別行動実験を行った。まず、3 種類の分子から構成される匂い A を報酬 (水) と条件づけした後、匂い A の構成要素から 1 種類もしくは 2 種類除いて構成した別の匂いと匂い A を識別させる実験を行った。その結果、匂い A と識別できない匂い構成が存在することを見出した。これは、マウスが匂いを構成する分子のうちの一部に選択的注意 (アテンション) して匂い識別を行っていることを示している (滝口ら, 生物工学会誌, 2010)。

この選択的なアテンション機能を工学的にモデル化するため、嗅覚系の解剖学的な構造 (マクロレベル) に基づき、嗅覚系を構成する嗅球と梨状葉の 2 つの部位の嗅神経回路モデルを構築した。提案モデルへの入力の実測された嗅球の糸球体層に誘起される神経活動パターン (<http://gara.bio.uci.edu/>) で、嗅球内のニューロンモデルの間に働く競合作用と梨状葉を構成するニューロンモデルからの抑制性フィードバックによって、入力された神経活動パターンのうちの一部を抽出することができる。マウスの匂い識別実験を模擬したシミュレーションを行った結果、モデルを用いて推定したマウスの匂い識別率と実生物の匂い識別率との相関は  $r = 0.74$  であった。この結果は、神経活動パターンから匂いの類似度のある程度推定し得ることを意

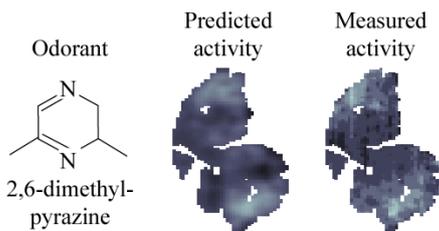


図 2 ラット嗅球の糸球体層の神経活動推定

味している (Soh *et al.*, *Artificial Life and Robotics*, 2010)。

### E) 嗅球糸球体層の神経活動パターン推定モデルの構築

研究成果 D)は嗅球表面の糸球体層に誘起される神経活動パターンから匂い感覚を推定できる可能性を示唆しているが、神経活動パターンが明らかにされている匂い分子は数十万種類も存在する分子のうちごく一部に過ぎない。そこで、神経活動が未知な匂い分子についても感覚推定を可能にするため、匂い分子の構造からラット嗅球の糸球体層に誘起される神経活動パターンを推定するニューラルネットワークモデルを構築した。受容細胞と匂い分子の結合強度については、グラフカーネル法[Kashima *et al.*, 2003]を応用して求め、糸球体層の神経活動パターンは混合正規分布を用いて近似した。また、既知の神経活動と匂い分子のセットからモデルのパラメータを調整するためのアルゴリズムを提案した。構築したモデルを用いて、363 種類の分子に対する神経活動パターンを推定した結果、実測の神経活動パターンと平均  $r = 0.67$  の相関が認められた (Soh *et al.*, *Chemical Senses*, 2011)。

項目 3) については、主に F) の成果を得た。

### F) 線虫型多モジュール連結ロボットの環境適応制御系の構築

線虫の化学走性アルゴリズムに基づくロボット制御の前段階として、単細胞性生物である大腸菌の化学走性のアルゴリズムを記したモデルを構築し、誘引物質への集積行動や有害物質からの忌避行動といった環境適応的な応答をコンピュータ上で再現した。このモデルを小型汎用移動ロボットの運動制御アルゴリズムとして利用し、大腸菌の化学走性アルゴリズムで移動ロボットを環境適応的に制御することに成功した (Tsuji *et al.*, *Artificial Life*, 2010)。次に、線虫型多モジュール連結ロボット (Hibot 社製) を製作した。線虫の筋細胞は頭部から尾部方向に概ね 12 のセグメントに分けられ、sin 波状にくねりながら前進、後退及び方向転換を行う。本研究では、実際の線虫の神経による筋運動制御メカニズムを取り入れることを念頭に、sin 波状の運動を実現可能な最小限 (9 個) のモジュ

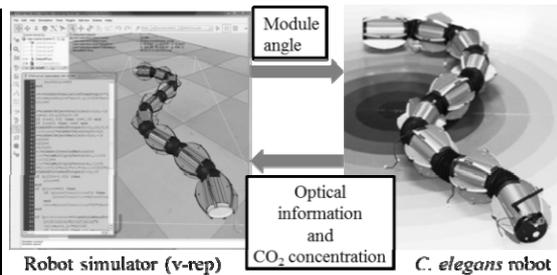


図 3 線虫型多モジュール連結ロボット制御システム

ールを連結したロボットとした。線虫型ロボットの各モジュールの屈曲角度は、ロボットシミュレータ v-rep (Coppelia Robotics 社製) からワイヤレス LAN 経由で送信できるようにしたほか、光情報を取得するためのワイヤレスカメラを第 1 及び第 9 モジュールに、CO<sub>2</sub> の濃度情報を取得するための CO<sub>2</sub> センサを第 1 モジュールに搭載した。ロボットシミュレータに研究成果 A) の化学走性モデルを組み込み、カメラにより取得した光強度を NaCl の濃度に対応させて刺激に応じたロボットの運動生成・制御を行う環境が整い (図 3)、現在、検証実験を重ねている段階である。構築した線虫型多モジュール連結ロボット制御システムは、研究代表者の大学の公開行事において公開 (デモンストレーション) した。

項目 4) については、主に G) の成果を得た。

### G) 匂い識別アルゴリズムに基づく人工官能検査法の開発

ラットの行動実験では、糸球体層の神経活動パターン同士の類似度と匂い感覚の類似度間に相関関係が存在することが示唆されている。そこで、神経活動パターンから人間の匂い感覚の推定を試みた。まず、神経活動パターンに関する指標として、①神経活動パターン間の全体的な類似度を表す相関係数、②2 つの活動パターンが共通して活性化されている部位が占める割合を表すオーバーラップ率、③活動分布の複雑さの違いを表すヒストグラム差を定義し、3 種類の指標間のユークリッド距離を匂い同士の類似度と定義した。そして、15 種類の匂いを用いて人間に対する官能検査を実施することで人間が感じる匂いの類似度を定量化し、ラットの糸球体層の活動パターンの類似度と比較した。その結果、活動パターン間の類似度と人間が感じる匂いの類似度の間には中程度 (0.6 ~ 0.7) の相関が認められることが明らかとなった。さらに、研究代表者が独自に開発したニューラルネットモデルを用いて、基準とする匂いと比較して人間が似ていると感じるか否かを推定した。その結果、64 ~ 78% の推定精度が得られた (Soh *et al.*, *International Symposium on Olfaction and Taste*, 2012)。さら

に、研究成果 D)、E)及び G)を統合し、ガスクロマトグラフィー (Alpha MOS 社製)を用いて分離した匂いの分子情報から匂い感覚を自動推定するシステムを試作中である。

最後に項目 5) について、主に H)~J) の成果を得た。

#### H) 小型魚類の微弱生体電気信号の非拘束／非侵襲計測法の開発

工場排水による水道水源の汚染事故は産業界において重大な問題の一つとなっている。従来から生物を「生きたセンサ」として利用し水質汚染を監視するバイオアッセイが提案されてきたが、そのほとんどは魚の行動を監視するものであった。本研究では魚の呼吸情報も重要であると考え、魚の鰓の開閉によって発生する呼吸波と呼ばれる微弱な生体電気信号に着目した。呼吸波を計測するために、H 150 mm x W 100 mm x D 50 mm の水槽底面に L=25 個の Ag/AgCl 電極を配置し (図 4 左)、脳波計測システムを用いて計測された信号を 5 万倍増幅した後、魚の呼吸頻度である 1-10 [Hz] のバンドパスフィルタを用いて濾波するシステムを構築した。そして、メダカ、もしくは、ゼブラフィッシュを水槽内で遊泳させて呼吸波計測を行い、25 個の電極から計測された信号のうちもっともパワーが大きい信号に対して周波数解析を行った結果、非拘束／非侵襲で魚の呼吸リズムに対応する呼吸波のピーク周波数を得ることに成功した (Terawaki *et al.*, *Artificial Life and Robotics*, 2010; 寺脇ら, 計測自動制御学会論文集, 2011)。

#### I) 小型魚類の呼吸波信号を利用した遊泳行動情報推定法の開発

魚の異常行動の検出に関しては、カメラシステムと画像処理技術を用いた手法が従来から多く提案されているが、時間帯や気象条件等による光量の変化の影響を受けず、試験魚に余分な光刺激を与える必要がない革新的な手法の開発が望まれていた。そこで、魚が遊泳する水槽の底面に配した電極を用いて計測した呼吸波信号を利用して遊泳行動情報を推定するカメラレスの検知法を新たに考案した。成果 H) で構築した呼吸波計測システムを用いて、呼吸波信号が含まれる周波数帯における信号のパワーが最大となる座標を魚の位置として推定した。提案法の推定位置を時間微分して遊泳速度を計算し、動画画像解析で推定した速度と比較した結果、両者の間には強い相関 ( $r=0.90$ ) があり、動画画像を用いた手法の代替法として十分な精度を有することが確認された (来山ら, 計測自動制御学会論文集, 2010)。

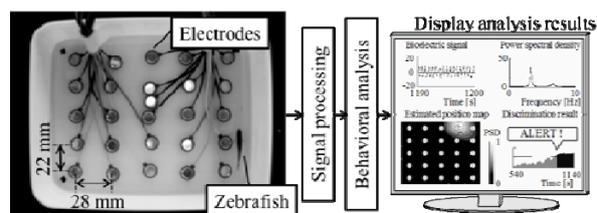


図 4 バイオアッセイシステム

#### J) 小型魚類を用いた水質監視用バイオアッセイシステムの開発

研究成果 H) 及び I) の技術を組み合わせ、小型魚類を生きたセンサとして用いたバイオアッセイシステムを完成させた (図 4)。マハラノビス距離を用いて魚の呼吸波信号のピーク周波数と遊泳速度を一つの汚染判別指標として統合し、この指標が一定の閾値を超えたときに警報を発する判定法を確立した。水質汚染を想定して、断続的にエタノールを計測水槽に混入する実験を行った結果、水中のエタノール濃度が約 0.5% に達した後約 10 分以内に汚染を検出できた。提案システムは、試験魚に余分な光刺激を与えないという新たな利点を備えながら、カメラシステムを用いた従来のバイオアッセイシステムと同程度の精度で水質汚染が検知できる次世代水質検査用バイオアッセイシステムである (Soh *et al.*, *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2013)。また、当該システムに係る技術について、特許出願中である (日本国特許出願 2013-051916)。

#### 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 17 件)

- 1) 曾 智, 宮本 健太郎, 平野 旭, 栗田 雄一, 辻 敏夫 (2013). 小型魚類の水質汚染監視用バイオアッセイシステムの開発. 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), 133. (掲載確定) 査読有
- 2) Soh, Z., Kitayama, S., Hirano, A., and Tsuji, T. (2013). A bioassay system based on behavioral analysis and bioelectric ventilatory signals of a small fish. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 62. (掲載確定) 査読有
- 3) 来山 茂央, 曾 智, 平野 旭, 辻 敏夫, 滝口 昇, 大竹 久夫 (2012). 呼吸波計測に基づく小型魚類遊泳行動の非接触・非拘束計測. 計測自動制御学会論文集, 48, 151-158. 査読有
- 4) Hattori, Y., Suzuki, M., Soh, Z., Kobayashi, Y., and Tsuji, T. (2012). Modeling of the pharyngeal

muscle in *Caenorhabditis elegans* based on FitzHugh-Nagumo equations. *Artif. Life Robotics*, 17, 173-179. 査読有

5) Hattori, Y., Suzuki, M., Soh, Z., Kobayashi, Y., and Tsuji, T. (2012). Theoretical and evolutionary parameter tuning of neural oscillators with a double-chain structure for generating rhythmic signals. *Neural. Comp.* 24, 635-675. 査読有

6) 寺脇 充, 曾 智, 平野 旭, 辻 敏夫 (2011). 小型魚類の生体電気信号を利用したバイオアッセイシステムの提案. 計測自動制御学会論文集, 47, 119-125. 査読有

7) Soh, Z., Tsuji, T., Takiguchi, N., and Ohtake, H. (2011). An artificial neural network approach for glomerular activity pattern prediction using the graph kernel method and the Gaussian mixture functions. *Chem. Sens.* 36, 413-424. 査読有

8) Soh, Z., Tsuji, T., Takiguchi, N., and Ohtake, H. (2010). Neuro-based olfactory model for artificial organoleptic tests. *Artif. Life Robotics*, 14, 474-479. 査読有

9) Terawaki, M., Hirano, A., Soh Z., and Tsuji, T. (2010). Unconstrained and noninvasive measurement of bioelectric signals from small fish. *Artif. Life Robotics*, 14, 342-347. 査読有

10) Tsuji, T., Suzuki, M., Takiguchi, N., and Ohtake, H. (2010). Biomimetic control based on a model of chemotaxis in *Escherichia coli*. *Artif. Life*, 16, 155-177. 査読有

11) 辻 敏夫, 鈴木 芳代, 曾 智, 寺脇 充, 滝口 昇, 大竹 久夫 (2010). 生物行動のシステム論的解釈と工学応用 - 線虫、ラット、メダカを手掛かりとして - . ソフトウェアバイオロジー, 9, 3-12. 査読無

12) Suzuki, M., Sakashita, T., Yanase, S., Kikuchi, M., Ohba, H., Higashitani, A., Hamada, N., Funayama, T., Fukamoto, K., Tsuji, T., and Kobayashi, Y. (2009). Effects of ionizing radiation on locomotory behavior and mechanosensation in *Caenorhabditis elegans*. *J. Radiat. Res.*, 50, 119-125. 査読有

[学会発表] (計 26 件)

[図書] (計 2 件)

1) Suzuki, M., Sakashita, T., Tsuji, T., and Kobayashi, Y. (2010). Computational Inferences on Alteration of Neurotransmission in Chemotaxis Learning in *Caenorhabditis elegans*,

In: Diamantaras, K., Duch, W., and Iliadis, L.S. (Eds.), *Artificial Neural Networks -ICANN 2010*, Lecture Notes in Computer Science, 6352, 291-300.

2) Hattori, Y., Suzuki, M., Soh, Z., Kobayashi, Y., and Tsuji, T. (2010). A Novel Tuning Method for Neural Oscillators with a Ladder-like Structure based on Oscillation Analysis, In: Diamantaras, K., Duch, W., and Iliadis, L.S. (Eds.), *Artificial Neural Networks -ICANN 2010*, Lecture Notes in Computer Science, 6352, 401-410.

[産業財産権]  
○出願状況 (計 1 件)

名称: 水質検査システムおよび魚類監視システム

発明者: 辻 敏夫、曾 智、栗田 雄一、宮本 健太郎

権利者: 広島大学

種類: 特許

番号: 特願 2013-051916

出願年月日: 2013 年 3 月 14 日出願

国内外の別: 国内

[その他]  
<http://www.bsys.hiroshima-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

辻 敏夫 (Tsuji Toshio)

広島大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 90179995

(2)研究分担者

田中 良幸 (Tanaka Yoshiyuki)

広島大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 40336920

滝口 昇 (Takiguchi Noboru)

金沢大学・理工研究域・自然システム学系・准教授

研究者番号: 20304462

鈴木 芳代 (Suzuki Michiyo)

日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員

研究者番号: 10507437

(H21~)

(3)連携研究者

大竹 久夫 (Ohtake Hisao)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 10127483