

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 26 日現在

機関番号：33302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760394

研究課題名(和文) 確率共鳴現象と部分空間法を利用した高感度・高選択性匂いセンサの開発

研究課題名(英文) Improvement of selectivity and sensitivity of odor sensor using stochastic resonance and subspace method

研究代表者

竹井 義法 (Takei, Yoshinori)

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30350755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、高感度・高選択性匂いセンサの開発を目的として、微弱な検知対象となる信号を強調する確率共鳴現象を利用する非線形フィルタを用いた高感度化と、部分空間同定法に基づく特徴点抽出アルゴリズムによる高選択性の実現をシステムの構築について検討した。確率共鳴現象を発現する非線形素子のパラメータに関する数値シミュレーションによる設計について検討した。また、部分空間に基づくProny法を提案し、混合臭に対するセンサ応答から成分数の推定を含む特徴点抽出について検討し、その有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, an improvement of selectivity and sensitivity of odor sensor system are investigated. The stochastic resonance can be expected to improve a sensitivity of a gas sensor, then we have considered the system parameter to appear the stochastic resonance by numerical simulations, especially, in terms of the nonlinear component in the system. The subspace-based Prony's method is proposed and we have shown that the method can extract features of a sensor response to multicomponent gasses which can be used to improve a selectivity and also give an information of the number of the gas components contained in an input odor.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：確率共鳴現象 部分空間法 匂いセンサ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、商品開発からその安全性、品質管理まで、従来、官能試験に代表される人間の感覚を必要としてきた食品分野をはじめ、呼吸による非侵襲的な予備診断等への応用が期待される医療・福祉分野や、化学物質によるテロ、災害への対応が要求される防災関連分野等、様々な分野において、人間の嗅覚や味覚に替わるセンサへの注目が高まっており、その実用化は急務となっている。また、ヒューマンセンタードな設計思想に基づき、人間の住環境下への導入が今後加速すると思われるロボット関連分野の発展からも、人間と同様な五感センシング技術を必要とするプラットフォームの拡大が予想される。物理量を計測する物理センサと比較して、味覚や嗅覚に相当する化学センサは、人間の感覚を再現する際に、化学物質を計測するセンサ開発では完結せず、ポストプロセスとして脳情報処理に相当する認識・識別過程を伴う複雑さゆえ、実用化には多くの課題がある。味覚については、5つの基本味を基底とし表現できることから人工脂質膜を用いた味覚センサなど一部実用化された例はあるが、エレクトリックノーズとも称される嗅覚に相当するセンサの開発は、数十万種とも言われる匂いの分類法さえ確立されておらず、その実用化は重要な課題のひとつである。よって、本研究ではこの匂いセンサに着目した。

匂いセンサの開発において、匂いの構成要素たるガス分子を検出し、電気信号へと変換するトランスデューサが重要な要素である。具体的には、半導体素子のガス吸着による電気伝導度変化を捉える半導体式ガスセンサや、水晶振動子(QCM)表面に形成した有機薄膜へのガス分子吸着による重量変化によって生ずる共振周波数変化を捉えるQCM式ガスセンサ等がある。その感度・選択性は同一の検知原理を用いる場合、素子材料とその機能設計でほぼ決定されるため、材料工学的な視点からの性能追求が主たる方法であるが、一般に、特定のガスにのみ感度、選択性を有するセンサ開発は困難であり、高感度・高選択性匂いセンサの実現は重要な課題である。

我々はこれまで、匂いの識別・認識を可能とするセンサシステムの開発を目指して、匂いセンサの選択性向上という観点からセンサ応答のモデリングと同定アルゴリズムの構築によって、センサ出力からの特徴点抽出手法の開発に取り組み、パラメータ推定に基づく匂い識別の有効性を検討してきた。従来、匂い認識を実現するシステムは、センサアレイと種々の多変量解析によるものが多いが、多変量解析を適用するパターンベクトルはセンサアレイにおける各センサ出力の振幅情報のみを用いたものが多く、その次元はセンサ数に依存する。これに対して、センサ応答モデルからシステムパラメータを推定す

ることで、過渡特性を含む情報をパターンベクトルに包含でき、また、センサのキャリブレーションといった保守性や多変量解析を適用する際の多重共線性の問題から無制限に増加させることができないセンサ数に対して、センサ数以上に次元を拡大することも可能となり、識別精度の向上が期待できる。また、応答モデルの次数は入力である被検ガスの成分数に依存し、匂いのような多成分臭に対する応答に対しては、単一センサ応答からより多くの情報を引き出すことも可能となる。さらに、センサアレイのデータを処理する場合には、多入出力系のデータとして捉えることが可能であり、これまで申請者らが行ってきた部分空間同定アルゴリズムが適用できれば、そのデータを一括処理することも可能となる。一方、匂いセンサの感度は、センサ素子と匂い分子との反応が担保される時、その主要因は、匂い分子と反応するセンサ表面積等といったセンサ素子の材料特性に依存する。従って、センサ素子の表面改質等によって表面積の拡大を図る等、選択性の問題と同様に、やはり材料工学的なアプローチが主なものとなっている。それゆえトランスデューサに付随する信号処理部でのノイズ低減化は、センサ素子材料の改良と比較して感度向上に対する決定的なものとはならず、感度限界はセンサ素子材料に機能設計に大きく依存する。

近年、通常ではその低減化を図るべきノイズ(ゆらぎ)を逆に積極的に利用することで耐雑音性を向上させる確率共鳴現象に対する注目が高まっている。この現象は、微弱な信号を閾値特性を持つ非線形素子を通して観測するとき、適切な印加ノイズ強度において出力SN比の向上が共鳴的に生じるものである。ザリガニの扇状尾の有毛細胞等、生体においてもみられるこの現象は、劣悪な雑音環境下において、埋もれた微弱信号を雑音を利用することで高感度に検出可能にするものであり、この現象を匂いセンサに応用できれば、信号処理手法に基づきながら従来レベルを超えた感度向上が期待できる。これまでの確率共鳴現象のセンサへの適用例としては、いくつか提案されつつあるが、匂いセンサへの応用において、その感度向上というセンサの基本的な性能向上を直接的に検討したものはほとんどない。よって、本現象のセンサ感度向上への応用を目指したシステム設計に関する検討と、システム同定手法に基づくセンサ応答からの特徴点抽出の併用による感度・選択性向上を検討した。

## 2. 研究の目的

本研究は、高感度・高選択性匂いセンサの開発を目的として、感度問題における耐ノイズ性能向上に関して、通常除去できない感度限界付近の背景雑音を逆に利用することで、微弱な検知対象となる信号を強調する確率

共鳴現象を利用する非線形フィルタを用いた高感度化の実現を目指すものである。そのために、匂いセンサと組み合わせて確率共鳴現象を発現するシステムの解析、設計を行い、さらに、これまで研究を進めてきたセンサ応答モデルのモデリングと同定による特徴点抽出法を発展させ、多入出力系とみなせるアレイ型センサシステムから得られるデータに部分空間同定法に基づく特徴点抽出アルゴリズムによる高選択性の実現を目指す。

### 3. 研究の方法

本研究の目的である、匂いセンサ開発における信号処理的側面からの高感度・高選択性の実現を目指し、理論研究と実システムを利用した検証とによって研究を遂行する。確率共鳴と部分空間法の二つの視点からそれぞれの進展を図った。具体的には、確率共鳴現象を発現するシステム構築と数値シミュレーションによる検証・解析、実データ収集用の匂い計測用センサシステムの構築、センサ出力に対するモデリングと特徴点抽出のための部分空間同定アルゴリズムの構築、さらに、提案手法を応用するシステムの検討など、各項目を中心に遂行する。

### 4. 研究成果

確率共鳴現象を発現するシステムの基礎的な理論検証・解析を進めるために、数値シミュレーション上での確率共鳴現象の発現を確認し、入力振幅、雑音強度、非線形素子の閾値といった各パラメータと入出力相関および出力 SN 比との関係を検討した。さらに、化学センサであるガスセンサでは微弱な入力信号、すなわち低濃度のサンプル供給が可能な実験環境の構築が必要であるため、まず初期段階としてフォトトランジスタを用いて、実機での確率共鳴現象の発現とその応答に関する検討を行った。素子の光センサ、非線形素子としてオペアンプによるコンパレータを用いて、Collins による並列ネットワークを構築し、10Hz の矩形波を入力として、減光フィルタによる入力振幅の減衰によって入力 SN 比を変化させて確率共鳴現象の発現を試みた。その結果、周波数領域での出力 SN 比があるノイズ強度で、単純加算平均による出力結果を上回る SN 比が得られることを確認した。

実機での検討結果をふまえ、確率共鳴現象を発現するシステムの基礎的な理論検証・解析を進めるための数値シミュレーションにおいて、入力振幅、雑音強度、非線形素子の閾値といった各パラメータと入出力相関との関連について継続して検討を行った。単純な閾値系を非線形素子とする確率共鳴現象を発現するシステムの出力と、非線形素子を通さずに線形加算した出力と比較した場合、確率共鳴現象によって得られる対ノイズ強

度に対する相関係数の曲線は、有限なノイズ強度で最大となる確率共鳴現象の特性を示すものの、同条件下において線形加算時の結果から向上することは得られず、確率共鳴現象を用いるメリットが得られない。そこで、非線形素子としてヒステリシスを有したコンパレータを導入して、検討を行った。その結果、相関係数が最大となるノイズ強度の近傍で線形加算処理を上回る相関を得ることができ、確率共鳴現象の有効性が確認できた。また、ヒステリシス特性に関して上下限の閾値を変化させ、入力、雑音強度に対して相関係数を最大とする最適な条件が存在することをシミュレーションにて確認した。また、確率共鳴現象を利用した感度向上については、SR を発現するための非線形要素のパラメータと印加雑音強度の最適化に関して、センサ前段にサンプラを配置し、センサへのサンプル導入タイミングがコントロールされる構成を仮定するとき、サンプリングパルスを入力信号として用いることで、入力 SN 比が未知であっても入出力相関に関する実験的・探索的なパラメータ最適化及び信号検出が可能であることを確認しており、今後、検討を進める予定である。さらに確率共鳴現象を用いた応用展開としてガス源探索問題の信号伝達系に関する検討を行った。これは、2 つの信号間におけるわずかな偏差を微弱信号として確率共鳴現象を利用して検出することを目指しており、今後さらに検討を行っていく予定である。

センサ応答からの特徴点抽出に関して、部分空間同定法によるセンサ応答解析に基づく選択性の実現を検討した。半導体式ガスセンサのセンサ応答に対してシステム同定手法に基づき、匂いのような混合気体の各成分に応じた特徴点の抽出を検討した。ステップ応答として得られるガスセンサ応答の解析手法の一つとして従来提案されていた Prony 法に対して MOESP (MIMO Output Error State Space model identification) 法の枠組みを適用した部分空間に基づく Prony 法を提案し、数値シミュレーションによる検討を行った。その結果、混合臭に対するガスセンサ応答を模擬したステップ状の出力波形データのみに基づいて、雑音環境下において、各成分の時定数、ゲインをそれぞれ分離、推定できることを確認した。また、センサ単体の入出力を考えたとき、多入力 1 出力系であるが、同定のモデルとしては入力を観測できないため、システムの次数変動がガス成分数が対応付けられ、入力が混合臭であるとき、その成分数が、MOESP 法における特異値分解の結果から推定できることを示した。今後は、入力であるガス濃度変動に関して、ステップ状に限定されない同定手法の開発を進め、特定のサンプリング機構なしで計測したセンサ応答から特徴点抽出が可能なアルゴリズムの構築を進める予定である。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

竹井 義法, 清水 雄平, 南戸 秀仁,  
側抑制型に結合されたセンサ アクチ  
ュエータ対を有する匂い源探索ロボッ  
ト, 日本味と匂学会誌, 査読有, 20(3),  
pp.415-418 (2013).

Yoshinori Takei, Hidehito Nanto and  
Kiyoshi Wada, Feature Extraction of  
Gas Sensor Response Based on  
Subspace-Based Identification, Sensors  
and Materials, 査読有, 26-3,  
pp.163-169 (2013).

〔学会発表〕(計 3 件)

Y. Takei, S. Kawamura and H. Nanto, Gas  
discrimination using system  
identification of sensor response  
model, The 62nd Annual Meeting of the  
International Society of  
Electrochemistry, 9/11-16, Niigata  
(2011).

Y. Takei, N. Masuta and H. Nanto, Odor  
plume tracking using a mobile robot  
with pseudochemotaxis, IMCS2012 - The  
14th International Meeting on  
Chemical Sensors, 5/22, Nuremberg,  
Germany (2012).

竹井 義法, 清水 雄平, 南戸 秀仁,  
側抑制型に結合されたセンサ アクチ  
ュエータ対を有する匂い源探索ロボッ  
ト, 日本味と匂学会第 47 回大会, 9/6,  
仙台 (2013).

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

竹井 義法 (TAKEI, Yoshinori)

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号 : 3 0 3 5 0 7 5 5