

機関番号：33302

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760284

研究課題名（和文） 部分空間同定法を用いた高選択性匂いセンサの開発

研究課題名（英文） Study on selectivity of MOS-type gas sensor based on Prony's method and subspace identification 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

研究成果の概要（和文）：

本研究は、ガスセンサ出力を Prony 法に基づいたモデリングとパラメータ推定によって、入力である被験ガスの情報をセンサ出力信号の解析によって最大限に引き出し、センサ特性の制御、改善へと応用することを目指した。Prony 法におけるパラメータ推定手順を部分空間同定法の枠組みにおいて解釈し、新たに部分空間法に基づいた手法を導出した。また、センサ応答モデルの同定によって得られるモデルパラメータを特徴点としたガス種の判別を行い、その有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, feature extraction from a transient response of a semiconductor gas sensor is investigated. For the sensor response given as the step response of the first-order lag system, the sensor output can be approximated as a sum of exponentials by Prony's method. We have shown that the method can be interpreted by the subspace based identification method. The model parameters can be estimated as the time constant and the gain, which are strongly related to characteristics of gases. The parameters can be used to construct the feature vector for the discrimination of gases. Using the estimates as features, it has shown that the discrimination of gases can be improved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：制御理論，システム同定

1. 研究開始当初の背景

近年、食品の安全性を脅かす事例が多く報告され、その安全性や品質管理に厳しい視線

が注がれる食品分野など、従来、官能試験に代表される人間の感覚に依存してきた分野をはじめとして、医療・福祉分野や化学物質

によるテロや災害への対応を必要とする防災関連分野といった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。さらに、福祉・介護分野を始めとした人間の生活環境下への導入を目指したロボット関連技術の発展にみられるように、人間の五感に相当するセンサを必要とするプラットフォームは拡大の一途を辿っている。

物理量を図るセンサと比較して味覚や嗅覚に相当するセンサは、人間の感覚を再現する際に化学物質の計測のみならず脳における処理に相当する過程を伴う複雑さゆえ、その開発には未だ多くの課題が残されている。また、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、特に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さえ確立されていないこともあり、バイオメトリックなアプローチに基づくものなど様々な試みがあるものの、その多くは未だ研究段階にある。そこで、本研究ではこの匂いセンサの開発に着目した。

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、電気的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、半導体や水晶振動子を用いるもの等、様々な検出方式が提案されているが、“半導体式ガスセンサ”が経時安定性や取り扱いの容易さから多く用いられている。しかしながら半導体式ガスセンサは、従来、素子材料の探索や表面修飾によってその特性が決定付けられるが、一般に、特定のガスにのみ感度を持った選択性の高いセンサの開発は困難であり、高選択性センサの開発は重要な課題のひとつとなっている。

また、匂いの識別を行う場合、センサ素子を単体で用いただけでは、ガス濃度変化の一次元的な情報が得られるに過ぎず、混合ガスである匂いの識別はできない。そのため、特性の異なる複数のセンサを用いてセンサアレイを構成することで得られる情報の多次元化を行うことが提案されており、この多次元化された出力に対して、多変量解析や学習アルゴリズムを適用することで匂いの識別を可能とするが、アレイを構成する各センサは多重共線性を回避するために互いに選択性が異なることが必要とされる。

そこで、本研究における選択性を制御・設計可能な新たなアプローチに基づく匂いセンサの開発を着想するに至った。

2. 研究の目的

ガスセンサへの入力たる被検ガスの濃度変化がステップ入力として与えられた場合、センサ出力はLangmuir型の吸着とみなされ、

一次遅れ系のステップ応答の重ね合わせとして近似でき、その時定数はガス種に依存する。すなわち、時定数の個数は入力に含まれるガス成分数に対応し、その数値はガス種判別に利用可能であり、同時にガス吸着量に相当するゲインも求められる。従来、これらのパラメータを推定することで、単体のガスセンサの出力であっても与えられたガスが単一であるか混合ガスであるかを識別可能とする手法が提案されているが、それらは、文献等において陽に言及されていないが周波数解析の一手法であるProny法に他ならない。従来、提案されている手法においては、リアルタイムで認識・識別を行うためにモデルパラメータの推定にカルマンフィルタを導入することや、推定誤差の低減のために出力値の差分を取ることで減衰型の出力へ変換するなどの検討が行われている。しかしながら、パラメータ推定におけるノイズに白色雑音のみを仮定しているなど推定精度に依然として問題があり、ガス判別に有用な情報を精度良く求めることができない。

Prony法のパラメータ推定手順において、最小2乗法を用いてデータ行列から時定数を求める。このとき、特異値分解を用いた手法も提案されているが、その手順は部分空間同定法における状態空間モデル表現のシステム行列を拡大可観測性行列の推定によって求めるものと一致する。すなわち、Prony法におけるパラメータ推定を、部分空間同定法によるパラメータ推定問題として取り扱うことが可能である。申請者らは、これまで部分空間同定法の一手法であるVerhaegenらによって提案されているMOESP法(MIMO output error state space model identification)に対してSchur complementを用いた解析により、雑音除去手法に統一的な枠組みを与え、さらにその結果に基づいたオンラインでのパラメータ推定が可能な逐次同定アルゴリズムを開発している。よって、これらの成果を基盤として上記ガスセンサ出力の解析へ応用することで、より実用的な推定アルゴリズムの開発を目指した。

さらに、ガスセンサ応答から推定される時定数とゲインによって、特定のガス成分に対する出力値が推定できる。このことは、センサ素子が検知可能なガスであれば、特定の時定数に対応した近似出力のみを出力するようにセンサに擬似的に任意の選択性を持たせることが可能となる。すなわち、ガスセンサの選択性制御が実現できる。また、特定の時定数に対応する近似出力は、フィルタによって時定数に対応する近似出力のゲインを設計でき、選択性の幅や従来では実現が困難な特性を持ったセンサも実現可能となる。このとき、前述の申請者らが提案する逐次同定法を応用し、パラメータ推定をリアルタイム

で行えば、選択性の広いセンサ素子と本提案手法を実装した処理回路を組み合わせることで従来のセンサを置き換える高選択性匂い・ガスセンサの実現が期待できる。

以上、本研究では、部分空間同定法を応用したセンサ特性の制御、改善を可能とするアルゴリズムの開発を目的として検討を行った。

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センサ出力の解析という信号処理的側面からセンサの機能設計における新たなアプローチの開発を行うにあたり、理論研究と実システムによって得られたデータによる検証を行った。

具体的には、

- ・「研究目的」で述べた匂いセンサ出力のモデル近似とそのパラメータ推定において、Prony 法と部分空間同定法の関係を明らかにし、選択性制御に必要なパラメータ推定のアルゴリズムの開発。

- ・既に申請者らによって提案されている部分空間同定アルゴリズムを基盤としながらパラメータ推定の基礎理論構築、及び数値シミュレーションによる検証。

- ・匂いセンサの動特性のモデル化に際して、実データ取得のための匂いセンサとその測定系を含めた実験系の構築、及び実測データを用いたアルゴリズムの検証。

- ・酸化物半導体式ガスセンサの対ガス濃度特性、素子材料に起因するガス選択性とパラメータ、及びその推定の精度との関連の検討。

- ・Prony 法と部分空間同定法との関連において、雑音除去の観点から、実用化を目指したパラメータ推定精度の改良の検討。

- ・開発したパラメータ推定と近似出力の推定アルゴリズムを、逐次部分空間同定法に基づき実時間で処理可能なアルゴリズムへ展開し、既存のセンサを置き換えることが可能なセンサ出力の処理系の開発。

- ・得られた成果に基づき、ガス種識別問題等への応用。

以上のような観点で研究を進めた。

4. 研究成果

本研究は、Prony 法によるセンサ出力の過渡応答波形のモデル近似を基本として、パラメータ推定に部分空間同定法を導入し、出力信号の解析を行うことでセンサの出力から入力である被験ガスの情報を最大限に引き出すものであり、部分空間同定法を応用したセンサ特性の制御を可能とするアルゴリズムの開発を目指したものである。

匂いセンサ出力のモデル近似とそのパラメータ推定において、選択性制御に必要なセ

ンサ応答の時定数推定アルゴリズムを検討した。具体的には、Prony 法と部分空間同定法の関連を検討し、Prony 法における指数関数によるセンサ応答の近似モデルを状態空間表現し、パラメータ推定手順が部分空間同定法におけるシステム行列の推定と同じ枠組みで解釈できることを示した。このとき、指数関数モデルの状態空間表現において、その求めるパラメータは状態空間モデルのシステム行列のうち A, C 行列へ集約される。従って、拡大可観測性行列の推定までが問題となり、データ行列に特異値分解 (SVD) を適用して得られる雑音部分空間は考慮する必要がない。このことは、SVD において、真のモデル時数、すなわちセンサ応答に関して支配的な極までで計算を打ち切ってよく、後述する同定精度向上のためにデータ行列を拡大しても全ての特異値を求める必要がないため都合がよい。

また、基本的にオフラインでの処理を前提とした同手法の逐次化についても検討を行った。具体的には、指数関数モデルのゲインパラメータを LS 法によって推定する際に、現れる Vandermonde 行列は、新たに推定された時定数が得られたときに、その全要素を置き換えるため、通常の RLS 法に従った導出ができない。そこで、データ行列を各時刻において推定される時定数を用いて順次拡大、再構成する形で新たに定義し、RLS 法を適用することで逐次化を実現し、計算時間の大幅な低減とその有効性を確認した。

前述の通り、選択性制御に必要なセンサ応答からの時定数推定アルゴリズムに関して、Prony 法によるパラメータ推定手順が部分空間同定法における拡大可観測性行列の推定手順と同じ枠組みのもとで解釈できることがわかったが、匂いに相当する混合ガスに対するセンサ応答である、同定対象のシステム次数を 2 次以上とした場合のセンサ出力 (ステップ応答) に対して部分空間法に基づく提案手法を適用すると、数値シミュレーションで検討した結果、確定的な場合を除き、わずかなレベルでも出力に雑音を印加させたところ、拡大可観測性行列が、すなわち時定数の推定ができないことがわかった。そこで、データ行列となる Hankel 行列の補助時数について検討したところ、例えば、4 次程度のシステムに対して補助次数を数百といった、通常、部分空間法を用いる場合の補助時数と比較して非常に大きな値をとることで同定精度が向上することがわかった。このことは、Prony 法において、時定数推定手順において用いる AR モデルの次数を真の次数よりも意図的に高くして同定することに対応しているが、理論的な検証を更に進めていく必要がある。

匂い認識に関して、センサアレイと種々の

多変量解析を併用することで実現するものが多いが、匂いに対応づけ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に基づくものが多く、その次元はセンサ数に依存する。これに対して、センサ応答モデル推定されるシステムパラメータを特徴点とすることで、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、その識別精度の向上が期待できる。そこで、パラメータ推定に基づくセンサ出力からの特徴点抽出による匂い識別の有効性を検討した。具体的には、半導体式ガスセンサをセンサ素子に用いたセンサアレイを構成し、閉チャンバー内に設置したガスセンサアレイへ一定濃度の被検ガスを導入し得られるステップ応答を用いて検討を行った。

その結果、各センサにおけるステップ応答の時系列データを用いてパラメータ推定を行い、主成分分析 (PCA) を用いて各時刻におけるガス種判別を試みたところ、センサアレイを構成する個々のガスセンサにおいて、その振幅情報に基づいて多変量解析に供するパターンベクトルを構成した場合 (図 1)、正規化してもノイズや被検ガス濃度の変化に対する影響を受けやすい。これに対して、本実験において時不変系となるモデルのパラメータ推定値を特徴点として包含するパターンベクトルを用いた場合 (図 2) は、良好な判別結果を与えることができ、提案法の有効性が確認できた。今後は、リアルタイムな匂い識別のために、指数関数和モデルとアレイ化したセンサ応答の同定に関して、多入出力系としてのモデリングと、特異値分解の逐次化を含めたアルゴリズム全体の逐次化を検討する必要がある。

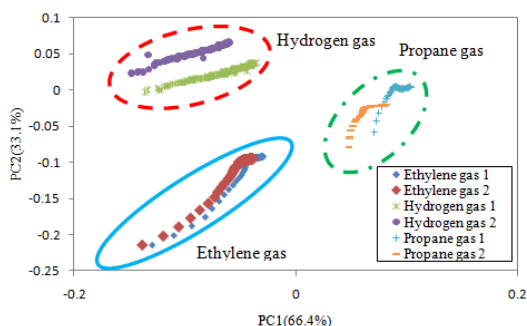


図 1 センサ振幅に基づくガス種判別 (PCA)

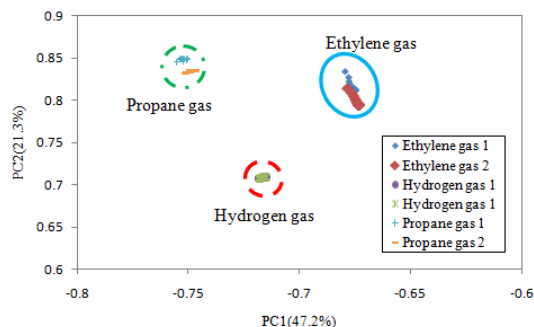


図 2 システムパラメータの推定値に基づくガス種判別 (PCA)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

1. 川村 奨, 竹井 義法, 南戸 秀仁, 大藪 多可志, パラメータ推定に基づく匂い識別, 査読有, 日本味と匂学会誌, 17 巻 3 号, pp. 537-540 (2010).
2. 竹井 義法, 太田 祐輔, 南戸 秀仁, 岩崎 幸代, 大藪 多可志, 都甲 潔, セキュリティロボットへの匂いセンサの応用, 第 27 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム論文集, 査読無, pp. 595-598 (2010).
3. Yoshinori Takei, Shin Koyama, Hidehito Nanto and Takashi Mihara, Study on Feature Extraction of Semiconductor Gas Sensor Based on Prony's Method, Sensors and Materials, 査読有, Vol. 21, No. 4, pp. 209-217 (2009).
4. TAKEI, Yoshinori, ASADA, Takeshi, ICHIKAWA, Ikuru, NANTO, Hidehito, KOYAMA, Shin and MIHARA, Takashi, Study on selectivity of MOS-type gas sensor using Prony's method, Proc. of The International Conference on Electrical Engineering 2008, 査読有 (2008).

[学会発表] (計 5 件)

1. 竹井 義法, 太田 祐輔, 南戸 秀仁, 岩崎 幸代, 大藪 多可志, 都甲 潔, セキュリティロボットへの匂いセンサの応用, 第 27 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 2010. 10. 14-10. 15, くにびきメッセ, 島根.
2. 川村 奨, 竹井 義法, 南戸 秀仁, 大藪 多可志, パラメータ推定に基づく匂い識別, 日本味と匂学会第 44 回大会, 2010. 9. 8-9. 10, 北九州国際会議場, 福岡.

3. Y. Takei, H. Nanto, K. Toko, T. Oyabu, and Y. Iwasaki, On Gas Sensing System for Security Robot, 13th International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN 2009) , 2009. 4. 15, Brescia, Italy.
4. Y. Takei, H. Nanto, S. Kanae, Z. J. Yang, K. Wada, On subspace extraction of the Prony' s method for time series analysis, The 40th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS' 08) , 2008. 11. 15, 京都.
5. 竹井義法, 浅田武史, 市川 生, 小山 眞, 南戸秀仁, 信号解析による半導体式ガスセンサの選択性に関する検討, 2008年度電気学会 E 部門総合研究会, CHS-08-10 , 2008. 6. 13, 仙台.

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 : 30350755