

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904
研究種目：挑戦的研究（萌芽）
研究期間：2021～2022
課題番号：21K18718
研究課題名（和文）画像出力型センサと分子ふるい機構を融合した機械学習型においセンシング技術の創出

研究課題名（英文）Development of machine-learning type odor sensing technology by integrating image output type sensor and molecular sieve mechanism

研究代表者
野田 俊彦（Noda, Toshihiko）

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・准教授

研究者番号：20464159
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：電位計測センサアレイのCMOSセンサチップに「におい感応膜」を成膜し、においを画像情報として出力できる画像出力型においセンサを作製した。このセンサでガス計測を行い、機械学習（Light GBM）でデータ解析を行った。3種類のガス判別を行った結果、1000以上の計測データを98%以上の正答率で判別可能であった。機械学習の効果を高める分子ふるい機構を開発した。Si基板上にアルミ製ストライプをブリッジ状に形成し、ストライプ部をガスが透過可能な構造にしたものを試作した。ストライプ幅や印加電圧によるガス応答特性が変化を確認した。これら成果の組み合わせにより、提案したにおい計測が可能である事を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
あえてブロードな特性のセンサを用いることで、さまざまな対象を一括計測を実現するブロードセンシングという計測概念が実証された。ソサエティ5.0では「におい」のデジタル化も求められるが、本技術の中核であるCMOSセンサは様々な機器への組み込みが容易であり、サイバー-フィジカルインタフェースとしての展開が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Image output type odor sensors that can output odor information as imaging data were fabricated by attaching odor-sensitive membranes onto a CMOS potentiometric sensor array. The sensor was used to measure gases, and the data was analyzed by machine learning (Light GBM). Three types of gases were discriminated, and the results showed that more than 1000 measurement data could be discriminated with more than 98% accuracy. It has developed a molecular sieve mechanism that enhances the effectiveness of machine learning, which consists of bridged aluminum stripes on a Si substrate with a structure that allows gas permeation through the stripes. The gas response characteristics were confirmed to vary with the stripe width and the applied voltage. The combination of these results demonstrated the feasibility of the proposed odor measurement.

研究分野：CMOS集積化センサ

キーワード：CMOSセンサ おいセンサ 機械学習型センシング ブロードセンシング 分子ふるい

1. 研究開始当初の背景

ソサエティ 5.0 を見据え、様々な情報をサイバー空間に取り込むためのセンサ技術はますます重要な技術となっている。とくに人間の五感に関連するセンサはメタバース構築のキーデバイスであるが、嗅覚に対応するにおいセンサは技術開発途上にあるのが現状である。におい計測は様々な場面での利用が期待される一方、センサには様々な計測環境に対応する事が求められる。例えば生活環境のように湿度や温度の変化といった外乱があっても安定したにおい計測を可能とすることで、介護・見守り分野でのにおい利用や、個人認証、セキュリティ分野でのにおい利用、写真を撮るようににおいを記録するなど、におい利用の新たな可能性が切り開かれると考えられる。

過去の様々なセンサ研究を調査すると、計測対象に対してセンシング感度は有するものの、選択性が得られず実用化に至らなかったものが多く存在する。従来型のガスセンサの研究や、その延長としての「におい」センサの研究では、計測対象に高い選択性を示すことが重視されてきた。特定の条件下ではにおい計測が可能な成果が得られているが、従来型のセンシングでは、多成分のにおい検出や、外乱耐性に多くの課題がある。正攻法として従来型センシングの課題を一つずつ解決する事も大切であるが、全く新しいアプローチによる技術的ブレイクスルーも期待される。

2. 研究の目的

そこで本研究では従来型と全く異なるアプローチとして、あえてブロードな特性のセンサを用いて「におい」センシングを実現する。提案するセンシングコンセプトを図 1 に示す。本アプローチでは、センサのブロードな応答を機械学習によって解析する事で、計測データに埋もれた「におい」の情報をあぶりだしてセンシングする。機械学習によるデータ解析に適した画像出力型のにおいセンサを開発し、その 1 つのセンサをあたかも複数のセンサのように動作させる仕組みとして分子ふるい機構を導入する。これにより従来型のセンシングアプローチでは不可能であった、多成分のにおい検出が可能で、かつ外乱にも強いセンシングシステムを構築する。

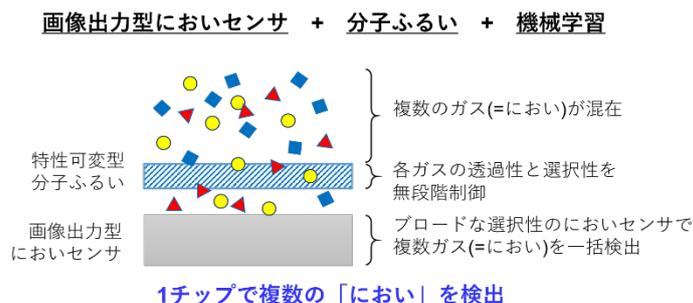


図 1 提案するセンシングのコンセプト図

今回提案した機械学習によるデータ処理に至るまでに、感度特性の異なる 2 つのイオンセンシング画素を組み合わせることでイオン濃度と溶液電位を計算的に導く手法が研究代表者を中心に検討されてきた。この手法の本質は「特性が異なる素子の組み合わせ」であり、本センシングコンセプトへと繋がっている。ただし「地道に方程式を解く」のではなく、「機械学習でデータ処理すること」、さらには「センサ出力をあえて画像として処理すること」が本研究のキーポイントである。AI による画像データ処理は驚くべき速さで発展しており、例えば web 上での類似画像検索はもはや一般化している。また本研究は「におい」に関するものであるが、発展的には様々なセンシングデータを画像化する、例えば温度や光の計測データを変換して画像データとして統合することで、提案手法により一括解析できるようになる。あまねく情報を一元的に取り扱う、究極のマルチモーダルセンシング実現に向けた足掛かりとなる。

3. 研究の方法

提案したセンシングアプローチを実現するにあたり、①画像出力型においセンサ、②機械学習を用いたデータ処理、③分子ふるい機構、これら 3 つの研究課題を解決する必要がある。

①画像出力型においセンサは、電位計測センサアレイの CMOS センサチップに「におい感応膜」

を成膜することでこれを実現する。256×256 画素の電位計測アレイ上に数種類のおい感応膜を3×3のドットマトリックス状に成膜する。おい感応膜へのおい分子の吸着によりわずかに電位が変動するため、これを2次元情報として読み出し、画像情報として出力する。想定する出力画像イメージを図2に示す。

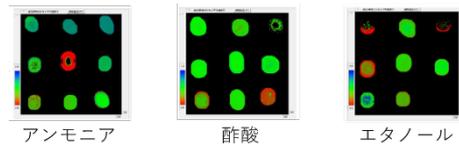


図2 画像出力型センサの想定出力イメージ

個々のおい感応膜は特定のおい分子やガスに高い選択性を示すものではなく、あえてブロードな特性として多くのおい、ガスに応答するようにする。従って一つの計測結果を見るだけでは、おい分子の種類や濃度を同定する事ができないが、その計測データには各感応膜が捉えた「おい」の情報が埋もれた状態になっている。この情報を抽出するため、②機械学習によるデータ解析を導入する。予め既知濃度のおいに対するセンサの応答を多数取得して教師データとし、Light-GBM (勾配ブースティング) の機械学習を行う。実際の計測時には、学習済み機械学習モデルがセンサ応答の特徴量を捉え、おい分子の同定を行う。

機械学習型センシングでは、特性が異なるセンサの応答を多数組み合わせる方が高い検出精度が得られる。おい感応膜の種類を増やすことがこれに相当するが、本研究では仮想的におい感応膜の種類を増やす方法に挑戦する。上述の画像出力型センサの直上に、③分子ふるい機構を一体形成する。この分子ふるい機構は微細な金属ストライプをブリッジ状に形成してグリッドとしたもので、グリッドピッチを調整したり、金属ストライプに電圧を印加して可変電界を形成したりできるようにする。ここにおい分子が到達すると、分子量の大小や分子極性の有無などによって分子の透過特性が変化することが期待され、分子ふるいとして機能する。この分子ふるいにより画像出力型センサの応答特性が変化するため、あたかもおい感応膜の種類を増やしたのと同等の効果が得られる。分子ふるいの特性をN段階に調整すると、おい感応膜をN倍に増やした事と等価となる(図3)。これにより機械学習の精度が飛躍的に向上する。

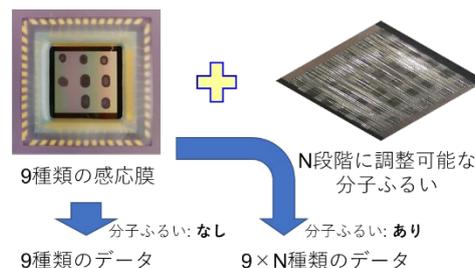


図3 分子ふるいによるデータ量の増倍手法

4. 研究成果

①画像出力型おいセンサは、電位計測センサアレイのCMOSセンサチップに「おい感応膜」を3×3のドットマトリックス状に成膜して作製し、おい感応膜へのおい分子の吸着によりわずかに変動する電位を2次元情報として読み出し、画像情報として出力できるようにした。

①で作製したセンサを使用して3種類のガスに対する応答特性を取得し、②機械学習によるデータ解析の基礎検証を行った。ガス計測データを教師データとして機械学習(Light GBM)して判定モデルを構築した。この判定モデルで1000データの判別試験を行ったところ、98%以上の正答率で3種類のガス判別が可能であった。また計測データの分析を進める過程で、時間軸を含めたデータ解析が重要であるという知見が得られた。それを反映させた機械学習モデルを構築して、より難易度が高いおいの判別にも挑戦したところ、5種類の調味料の単独臭、混合臭を98%以上の正答率で判別可能であることを確かめた。

画像出力型センサに組み合わせる③分子ふるい機構は、Si基板上に5~15ミクロン幅のアルミ製ストライプをブリッジ状に形成し、ストライプ部をガスが透過可能な構造にしたものを試作した。①のセンサと組み合わせてガス応答特性を計測し、ストライプ幅によって応答特性が変化することを確認した。また、金属ストライプに電圧を印加可能な構造の分子ふるいも試作した。これを同様に評価したところ、印加電圧によってガス応答特性が変化し、かつその応答変化はガス種によって異なる事を見出した。さらに交流電圧を印加した場合にはその周波数によっても

特性変化量が異なることを見出した。

また当初は想定していなかった事柄として、本研究で試作したセンサによるガス計測結果を精査したところ、ガス暴露により電位以外のパラメータが変化していることを示唆する応答特性が確認された。そこで電位以外のパラメータも同時検出するマルチモーダルセンサアレイの設計について検討し、抵抗および容量変化が検出可能な画素構造を新たに設計した。この画素を電位検出画素とともにアレイ化した、画素混載型マルチモーダルセンサを試作し、設計りに動作することを確かめた。本研究で提案した計測コンセプトに基づいて専用設計した初めてのセンサであり、におい計測能力の向上に資すると期待される。

以上のように、提案した計測のコンセプトの実現に向けた要素技術開発が成功裏に進み、これらの組み合わせにより「におい」計測が可能である事を実証した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Wada Ryomei, Minowa Naho, Wada Takeru, Mizutani Manase, Suzuki Yoshihisa, Choi Yong-Joon, Takahashi Kazuhiro, Sawada Kazuaki, Noda Toshihiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Functional validation of an additional device to the gas sensor for arbitrary control sensing properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE Sensors	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SENSORS47087.2021.9639252	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Ryomei Wada, Naho Minowa, Takeru Wada, Manase Mizutani, Yoshihisa Suzuki, Yong-Joon Choi, Kazuhiro Takahashi, Kazuaki Sawada, Toshihiko Noda
2. 発表標題 Functional validation of an additional device to the gas sensor for arbitrary control sensing properties
3. 学会等名 IEEE SENSORS 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田武, 和田凌明, 水谷学世, 鈴木誉久, 崔容俊, 高橋一浩, 澤田和明, 野田俊彦
2. 発表標題 ガス透過性制御素子と組み合わせたガスセンサの検出特性の検証
3. 学会等名 令和3年度電気学会センサ・マイクロマシン部門総合研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田凌明, 和田武, 水谷学世, 鈴木誉久, 崔容俊, 高橋一浩, 澤田和明, 野田俊彦
2. 発表標題 ストライプ状ガスグリッドへの電圧印加によるガス透過特性制御
3. 学会等名 第38回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 袁輪奈穂, 和田凌明, 水谷学世, 鈴木誉久, 崔容俊, 高橋一浩, 澤田和明, 野田俊彦
2. 発表標題 金属スライブ形状に着目した静電型ガス透過特性可変素子の設計と製作
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水谷学世, 鈴木誉久, 袁輪奈穂, 和田凌明, 崔容俊, 高橋一浩, 澤田和明, 野田俊彦
2. 発表標題 ガス透過特性可変素子の開口部近傍における流体挙動の解析
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関