

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：13301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18968

研究課題名（和文）リアルタイム特徴空間フィルタ技術による微小信号計測の革新

研究課題名（英文）Real-time feature-space filtering method for detecting minute signals in scanning probe microscopy

研究代表者

渡邊 信嗣（Shinji, Watanabe）

金沢大学・ナノ生命科学研究所・准教授

研究者番号：70455864

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）：本研究では、走査型プローブ顕微鏡技術の一種である走査型イオン伝導顕微鏡（SICM）に対して機械学習を利用して特徴空間フィルタを設計・実装し、SICM計測の信号雑音比（SNR）およびデータスループットを改善した。作成したフィルタを用いて信号とノイズの情報を読み取り適切に分類することでSNRを向上することに成功した。特にSNRが低い状況で既存のフィルタ手法に比較して有用であることを実証できた。一方で、分類器を構成するパラメータ調整は現在のモデルでは自由度が高く、最適値を決める手続きが複雑になっている。今後は、こういったパラメータ調整を容易にするアルゴリズムを開発する必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高速なフィードバック処理かつ微小信号の扱いが必須なシステムにおいて、フィルタ性能の向上は大きな課題である。本研究は、走査型プローブ顕微鏡（SPM）をこのようなシステムとして取り上げ、本研究でデザインしたデジタルフィルタが有用であることを示すことに成功した。ノイズと信号の情報を物理計測のモデルを用いて分類する本研究のフィルタ設計手法は幅広く応用できるものであり、汎用性が高い技術を開発できたと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we designed and implemented a feature space filter based on machine learning for Scanning Ion Conductance Microscopy (SICM). This filter significantly improved the signal-to-noise ratio (SNR) and data throughput of SICM measurements. By employing the filter to accurately read and classify signal and noise information, we successfully enhanced the SNR. We demonstrated that this method is particularly effective in low SNR conditions compared to existing filtering techniques. However, the current model requires complex parameter adjustments due to its high degree of freedom in classifier configuration. Moving forward, it will be necessary to develop algorithms that simplify these parameter adjustments.

研究分野：ナノサイエンス

キーワード：特徴空間フィルタ 走査型プローブ顕微鏡

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

計測データに内在する「特徴」をうまく利用することで実効的にデータの信号雑音比 (SNR) を向上する特徴空間フィルタと呼ばれる機械学習の手法が、近年、広く活用されるようになってきた。データの特徴に基づいた推定により SNR を向上するこの手法は、帯域制限といった伝統的な手法よりも優れた性能を発揮する例が数多く報告されている。しかし特徴の計算処理に少なからず時間を要するため、リアルタイム処理、オンラインデータ処理が必要な場合における適応に課題がある。例えば、ナノサイエンスにおける重要な分析技術である走査型プローブ顕微鏡 (SPM) と呼ばれる顕微鏡技術は、形状が時間変化する細胞や組織などの生物試料の分析にも近年広く用いられるようになってきているが、生物試料の時間変化の詳細を捉えるために、SPM 測定における SNR の向上が重要な課題となっている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、リアルタイムデータ処理に対する特徴空間フィルタの適応制限の改善に取り組んだ。リアルタイムデータ処理が重要である SPM の一種である走査型イオン伝導顕微鏡 (SICM) に対して、どのような特徴空間フィルタが設計可能か検討し、設計したフィルタが SICM 計測データの SNR の改善および SICM の高速走査性能の向上に有効であるかどうか特徴空間フィルタを SICM に実装して検証することを目的とした。

3. 研究の方法

SPM は、試料表面に探針とよばれる鋭い針を試料表面に近接させ、針先端と試料表面間に生じる物理化学的な相互作用を空間的にマッピングする技術の総称である。針先端の鋭さによって空間分解能が決定されることが多く、鋭い針を用いることで光の回折限界を超える空間分解能で表面形状像が得られ、また同様に高い空間分解能で相互作用力を可視化できる。探針で測定した探針先端と試料表面間の距離に依存する信号を利用して探針先端と試料表面間の距離を制御する、いわゆるフィードバック制御が多くの場合に必要な状態になっている。本研究で用いる SICM は探針としてガラスナノピペットを用いる。計測する信号とは、ガラスナノピペット探針で測定する微小な電流変化であり、雑音は主に探針や電流増幅器から発生する。SNR が大きいほど SICM 計測でのデータスループットが向上できる。本研究では、雑音を減少させることで SNR の改善を図った。雑音の減少には本研究で設計した特徴空間フィルタを用いる。設計した特徴空間フィルタと従来手法である周波数フィルタの性能を比較することで、特徴空間フィルタの有用性を検証した。特徴空間フィルタの設計方法を以下に示す。

3.1 特徴空間フィルタの設計手順

特徴空間フィルタ (分類器) は以下の手順で行った。

1. データセットの用意
2. 特徴量の計算
3. 標準化
4. 主成分分析
5. 主成分空間上の密度の計算
6. サポートベクターマシンによる分類
7. 決定境界の最適化
8. FPGA 用に変換

分類器の作成において教師ありの機械学習の手法を用いている。機械学習とは関数を作成することである。学習用に入力データと出力データのセットを用意し、それらに対して何らかの計算をすることで入力と出力の関係を求めるといえるものである。機械学習のアルゴリズムは今回使用したサポートベクターマシン以外にも、決定木、ランダムフォレスト、ニューラルネットワーク等多くのアルゴリズムを用いることもできる。本研究における分類モデルの作成において、モデルの説明可能性、解釈可能性に注意を払った。本研究では、解釈可能な特徴量を事前に用意する、主成分分析により次元削減を行う、サポートベクターマシンにより分類境界を引く、という方法で中身のわかるモデルを作成した。FPGA を用いて計測中にリアルタイムで推論をしなくてはならない。本研究で用いた手法はその制限もクリアできる。

以下に、それぞれ作成手順の詳細を示す。

以下の項目は公表を控える。

3.1.1. データセットの用意

3.1.2. 特徴量の計算

3.1.3 標準化

3.1.4. 主成分分析

3.1.5. 主成分空間上の密度の計算

3.1.6. サポートベクターマシンによる分類

3.1.7. 決定境界の最適化

3.1.8. FPGA 用に変換

4 . 研究成果（公表を大部分差し控える）

4.1 研究成果の概要

従来手法と提案手法との性能比較の結果、SNR が小さい状況において、分類器は従来手法よりも高い性能を示すことがわかった。一方、SNR が大きい状況では、分類器と従来手法に顕著な差が見られなかった。高速走査を行う場合、信号変化を高速で捉える必要があり、電流検出帯域の増加によって SNR は小さくなってしまふ。従って本研究で提案する手法は、SICM の高速走査において有用であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 亀井 翔天, 渡邊 信嗣
2. 発表標題 高速SICMのための超低雑音広帯域トランスインピーダンスアンプの開発
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊 信嗣
2. 発表標題 高速走査型イオン伝導顕微鏡の開発とその応用
3. 学会等名 日本顕微鏡学会バイオSPM研究会2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 信嗣
2. 発表標題 高速走査型イオン伝導顕微鏡による 生細胞表層ナノ力学動態の可視化
3. 学会等名 ナノ科学シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺信嗣
2. 発表標題 SICMを用いたがん細胞の評価
3. 学会等名 ナノプローブテクノロジー第167委員会、第104回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辰田 貴哉, 渡邊 信嗣
2. 発表標題 特徴空間フィルタによる走査型プローブ顕微鏡計測の信号雑音比の改善
3. 学会等名 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会
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