

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04129

研究課題名(和文) 差分部分空間に基づく時系列データからの変化・異常検知の新たな基盤構築

研究課題名(英文) Time-series Anomaly Detection based on Difference Subspace between Signal Subspaces

研究代表者

福井 和広 (Fukui, Kazuhiro)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：40375423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,630,000円

研究成果の概要(和文)：時系列データの僅かな変化を異常として検知する新たな理論基盤を構築した。提案基盤の基本アイデアは、時系列データの各時刻の状態を特異スペクトル解析(Singular Spectrum Analysis; SSA)を用いて信号部分空間でモデル化し、その信号部分空間の時間的な構造変動を精密に捉えることにある。このために2つの部分空間の差分成分を表す差分部分空間を導入し、過去と現在の信号部分空間から差分部分空間を求めた。提案基盤の妥当性と有効性を生体信号などの時系列公開データを用いた理論解析と評価実験の両面から確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、工場の生産ラインや社会インフラなどの複雑システムには、多種多様なセンサ群が配置されており、システム内部状態を反映した膨大な時系列データを得ることが可能となっている。しかしながら、データ量の増大と共にオペレーターの作業負担が増しており、これを軽減することは社会的なニーズが高い。本研究で取り組んだ時系列からの変化・異常検知は、データから通常と異なる僅かな時間変動を異常として自動検知することを可能とする。これによりオペレーターの作業負担を大きく減らすと期待できる。

研究成果の概要(英文)：We proposed a new method for anomaly detection in time-series data by incorporating the concept of difference subspace into the singular spectrum analysis (SSA). The key idea is to monitor slight temporal variations of the difference subspace between two signal subspaces corresponding to the past and present time-series data, as anomaly score. It is a natural generalization of the conventional SSA-based method which measures the minimum angle between the two signal subspaces as the degree of changes. By replacing the minimum angle with the difference subspace, our method boosted the performance while using the SSA-based framework as it can capture the whole structural difference between the two subspaces in its magnitude and direction. We demonstrated our method's effectiveness through performance evaluations on public time-series datasets.

研究分野：機械学習

キーワード：時系列解析 変化検知 特異スペクトル解析 部分空間表現 差分部分空間

## 1 研究開始当初の背景

IoT 環境の整備に伴い、多様なセンサー群により生み出される膨大な時系列データからの変化・異常検知に対する社会的ニーズが高まっている。これまでに統計学を母体としてホテリング T2 法、ベイズ法、k 近傍法などが実用化されているが、最近の複雑化するデータに呼応して、より表現能力の高い記述が求められている。これを受けて、注目時刻付近のデータ分布を確率関数で表し、その時間変化をカルバック・ライブラー・ダイバージェンスで測る確率密度比法や、変数間の依存関係で構造を定義し、その変化(崩れ)を見る疎構造学習法などが提案されている。前者は統計学に支えられた一大体系であるが、十分かつ多様な学習サンプルの利用を前提としており、実問題では確率分布の推定に大きな困難を伴う。これに対して本研究では、各時刻の状態を少ないサンプルでも安定に生成できる部分空間で記述する。部分空間は確率分布の簡略表現と見なせるが、分布の主要構造は保持しており、単純な平均ベクトルでは捉えられない高次元変動もカバーする。また物理データをベクトル表現する場合、その方向のみに意味を持つ場合が多く、この点でも角度を距離とする部分空間表現は理に適っている。部分空間は問題毎の特性に応じて生成することになるが、本研究では、時系列データに対して特異スペクトル解析 (Singular Spectrum Analysis; SSA) を用いて生成する。

特異スペクトル解析 (Singular Spectrum Analysis; SSA) に基づく従来の変化検知 [2] は 3 段階で構成される。はじめに、時系列データ全体を過去および現在の 2 区間に分割する。次に、2 区間の時系列データからそれぞれ過去と現在の信号部分空間を生成する。最後に、変化度として 2 つの信号部分空間の最小角を算出する。この変化度が閾値より大きい場合に変化が検知される。この SSA に基づく従来の変化法はある程度有効であるが、以下の様な課題を有する。変化度として過去および現在の信号部分空間の最小角を用いるが、時間隣接したデータから生成される部分空間は重なりを生じ易く、最小正準角を含む上位正準角はほぼゼロとなる。このために、高い判別能力が原理的に期待できないという問題があった。さらに最小角は単なる変化のスカラール量であるため、信号部分空間の微小な変動までは捉えることが出来ない。従来 SSA ベースの変化検知では、これらの課題を解決することが求められていた。

## 2 研究の目的

本研究の目的は、時系列データから僅かな変化を異常として検知する新たな理論基盤を構築することにある。提案基盤の基本アイデアは、時系列データの各時刻の状態を特異スペクトル解析 (Singular Spectrum Analysis; SSA) を通して生成される信号部分空間でコンパクトにモデル化し、その信号部分空間の時間方向の僅かな幾何学的な構造変動を精密に捉えることにある。このために、2 つのベクトルの差分ベクトルの自然な拡張であり、2 つの部分空間の差分成分を表現する部分空間を導入し、過去と現在の信号部分空間の差異を表す差分部分空間 [1] で取り出す。したがって、本研究では「わずかな変動計測を差分部分空間を用いて測ることが可能か否か、過去と現在の信号部分空間の最小角に基づく従来法に対して優位性は確認できるか」という学術的な問いに対して答えることになる。これに向けて提案基盤の原理的な有効性を生体信号などの様々なタイプの時系列データを用いた理論解析と評価実験の両面から検証し、実応用展開において指針となる理論基盤を確立する。

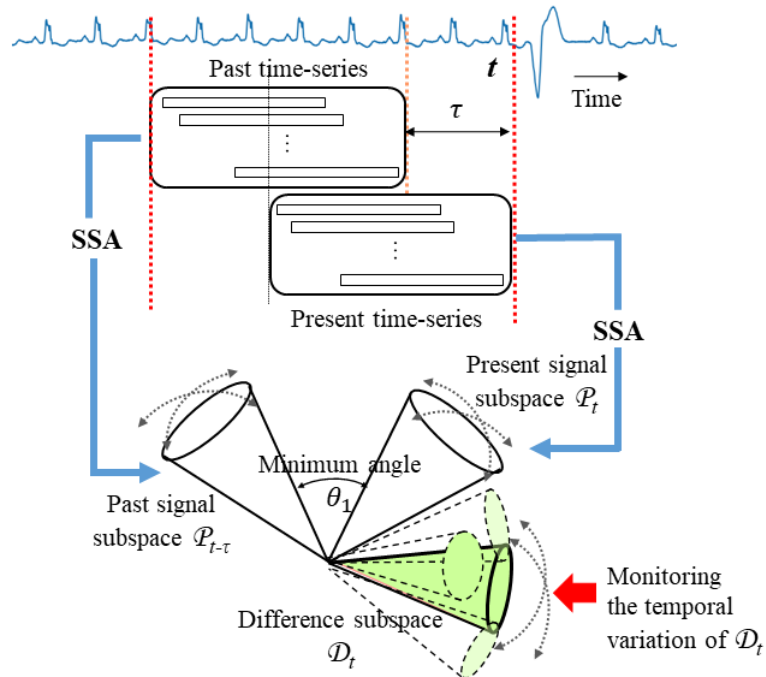


図1 提案手法の概念図.

### 3 研究の方法

提案する理論基盤の有効性を検証するために、

■過去と現在の信号部分空間の最小角に替えて、両者の差分部分空間に基づく異常検知アルゴリズムを試作した。

図1に提案基盤の概要を示す。これに基づく異常検知アルゴリズムは以下ようになる。

- 1) 従来法と同様に、時系列データからスライド窓により過去と現在の信号ベクトルの集合を生成し、それぞれを特異スペクトル解析 (Singular Spectrum Analysis; SSA) を用いて、過去および現在部分空間、 $\mathcal{P}_{t-\tau}$ と $\mathcal{P}_t$ を生成する。
- 2)  $\mathcal{P}_{t-\tau}$ と $\mathcal{P}_t$ の差分部分空間 $\mathcal{D}_t$ を生成する。
- 3) 得られた差分部分空間 $\mathcal{D}_t$ から時間的な構造変動の方向と大きさの2つの指標を求める。変化方向は入力差分部分空間と事前に生成した正常差分部分空間の正準角を用いて、変化の大きさは差分部分空間の幾何に基づいて計算する。
- 4) 変化方向と大きさに関する2つの指標の積を変化度 $\delta$ として定義する。
- 5) 変化度 $\delta$ がしきい値以上大きい場合に、異常変化が生じたと判定する。

■公開信号データベースを用いた性能評価を行う。心電図などの生体信号の公開データを用いて、最小角に基づく方法と提案法の性能比較を多角的に行う。

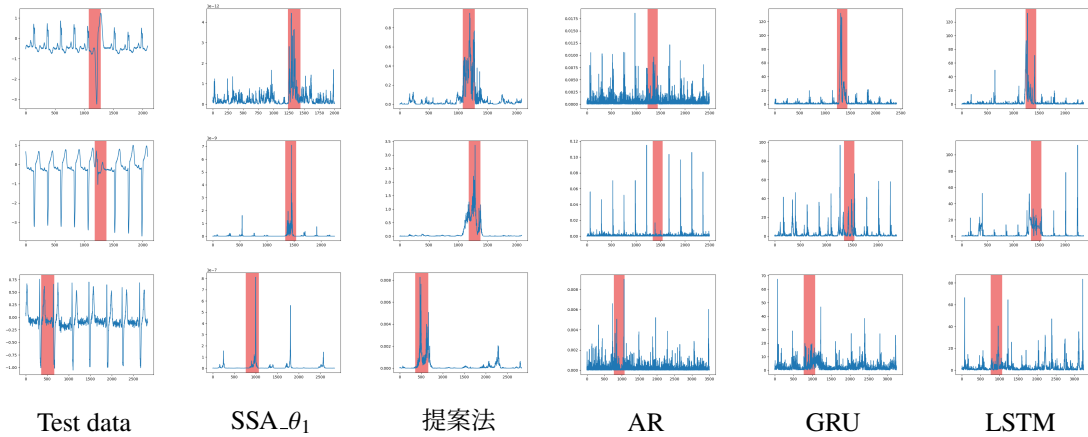


図2 提案手法と比較手法の変化度(上から chfdb.chf01\_275\_1, chfdb.chf01\_275\_2 and stdb\_308.0\_1 のテストデータ. 色付け区間: テストデータに含まれる異常区間).

## 4 研究成果

(1) 差分部分空間の変動量に基づく検出検出: 各時刻において差分部分空間の変動成分として抽出される  $n$  個の正準角セットを  $n$  次元の変位ベクトルと見なし, この変位ベクトルの時間変動に基づいた変化検知を考案した. 学習時, 時間変動が正常範囲内と見なせる区間から抽出された変位ベクトルセットに対して主成分分析を適用して, 正常部分空間を生成する. 検知時には, 各時刻において抽出される変位ベクトルとこの正常部分空間との距離(角度)を測り, 正常からの逸脱度とする. この逸脱度がしきい値を超えている場合に, 変化有と判定する. 本アルゴリズムの有効性検証を生体信号を用いて行った. その結果, 連続する2つの部分空間にデータ重複や部分空間の適切でない次元に起因する大きな重なりが生じて, 提案法が僅かな変化を安定に検知出来ることを確認した.

(2) 差分部分空間の幾何学構造に基づく変化検出: 時系列データに対して, 時間的に隣接する2つの信号部分空間から得られる差分部分空間の幾何学的な時間変動に基づいて変化検知するアルゴリズムを考案した. 2つの信号部分空間の変動方向と大きさから新たに定義した変化度を用いて, 信号部分空間の微小な幾何変動を捉えることに成功した. 提案法の有効性を, UCR Time Series Data Mining Archive[3]に含まれる7つの時系列データにおける, AUC と F 値を用いた従来手法と性能比較により明らかにした.

従来法(SSA- $\theta_1$ )と提案法の変化度を図2に示す. 図において, 色付け範囲が異常区間である. 従来手法は, 正常区間においても変化度が高くなっていることが確認できる. 一方で, 提案手法では, 異常区間のみで変化度が高くなっている. これらから, 従来法に対して提案法が, 信号部分空間の微小な変動をより緻密かつ安定的に検知していることが分かる. これらの研究成果を信学会研究会と IBIS ワークショップにおいて発表した. さらに英文論文を ArXiv に投稿した.

### (3) 信号部分空間の新たな生成法

① 時系列データからゆっくりと変化する成分を抽出する方法である Slow Feature Analysis を用いた生成法, および動画像列にデータ順を維持しつつ, ランダムサンプリングを適用する Randomized Time Warping を用いて, 時間伸縮に対して頑健でデータ変化を精密に捉える生成法を考案した. 得られた部分空間の有効性を生体信号および動画像列を用いて確認した.

② 動画像列から構成される時空間テンソルに基づく時系列解析法に、Randomized Time Warping を組み込んだ新しい時系列データの表現法を考案した。提案法の有効性をゼスチャーなどの公開動画像列データを用いて確認し、研究成果を国際学会論文および査読付き雑誌論文として発表した。

(4) 与えられた2つの凸錐間の差分情報を表す凸錐差部分空間を定義し、これを安定に算出するアルゴリズムを考案した。これに基づいて得られた凸錐差部分空間の有効性を判別能力の観点から評価し、差部分空間に比べてより精密に2つのデータセットの差異を捉えることが出来ることを確認した。

## 謝辞

本研究における性能評価において、公開データベース the UCR Time Series Data Mining Archive を使用した。本データベースを作成した Eamonn Keogh 博士およびその研究チームに感謝する。

## 参考文献

- [1] K. Fukui and A. Maki. Difference subspace and its generalization for subspace-based methods. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(11):2164–2177, 2015.
- [2] T. Idé and K. Tsuda. Change-point detection using krylov subspace learning. In *Proceedings of the 2007 SIAM International Conference on Data Mining*, pages 515–520. SIAM, 2007.
- [3] E. Keogh, J. Lin, and A. Fu. Hot sax: Efficiently finding the most unusual time series subsequence. In *IEEE International Conference on Data Mining*, pages 226–233. IEEE, 2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Bojan Batalo, Lincon S. Souza, Bernardo B. Gatto, Naoya Sogi, Kazuhiro Fukui	4. 巻 10
2. 論文標題 Temporal-stochastic tensor features for action recognition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Machine Learning with Applications	6. 最初と最後の頁 100407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mlwa.2022.100407	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Bojan Batalo, Lincon S. Souza, Bernardo B. Gatto, Naoya Sogi, Kazuhiro Fukui	4. 巻 -
2. 論文標題 Analysis of Temporal Tensor Datasets on Product Grassmann Manifold	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CVPR Workshops	6. 最初と最後の頁 4869-4877
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CVPRW56347.2022.00534	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takumi Kanai, Naoya Sogi, Atsuto Maki, Kazuhiro Fukui	4. 巻 -
2. 論文標題 Time-series Anomaly Detection based on Difference Subspace between Signal Subspaces	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ArXiv CoRR abs/2303.17802	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) 10.48550/arXiv.2303.17802	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 金井拓海, 粉 尚弥, 牧 淳人, 福井和広	4. 巻 25
2. 論文標題 差分部分空間の幾何変動に基づく変化検知	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会PRMU研究会	6. 最初と最後の頁 18-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Suzana R. A. Belez, Kazuhiro Fukui	4. 巻 3
2. 論文標題 Slow Feature Subspace for Action Recognition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ICPR2020 Workshops proceedings	6. 最初と最後の頁 702-716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Masanori Muroi, Naoya Sogi, Nobuko Kato, Kazuhiro Fukui	4. 巻 6
2. 論文標題 Fingerspelling Recognition with Two-Steps Cascade Process of Spotting and Classification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ICPR2020 Workshops proceedings	6. 最初と最後の頁 728-743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 石河純輝, 塩川浩昭, 福井和広	4. 巻 119
2. 論文標題 部分空間を用いたグラフ構造の表現学習法の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学会 情報論的学習理論と機械学習研究会 (IBISML) 予稿集	6. 最初と最後の頁 51-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 金盛ほなみ, 粉 尚弥, 福井和広	4. 巻 119
2. 論文標題 部分空間の幾何学構造の時間変動に基づく変化検知の提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学会 情報論的学習理論と機械学習研究会 (IBISML) 予稿集	6. 最初と最後の頁 83-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 粉尚弥, Lincon Souza, Bernardo Gatto, Jing-Hao Xue, Rui Zhu, 福井和広	4. 巻 -
2. 論文標題 凸錐判別分析に基づく画像セットベース識別	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2019) 予稿集	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) なし	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 -

1. 著者名 Souza, Lincon Sales de Gatto, Bernardo B. Xue, Jing-Hao Fukui, Kazuhiro	4. 巻 97
2. 論文標題 Enhanced Grassmann discriminant analysis with randomized time warping for motion recognition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Pattern recognition	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.patcog.2019.107028	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 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Bojan Batalo
2. 発表標題 Analysis of Temporal Tensor Datasets on Product Grassmann Manifold
3. 学会等名 CVPR Workshops (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金井拓海
2. 発表標題 差分部分空間の幾何変動に基づく変化検知
3. 学会等名 電子情報通信学会PRMU研究会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 金井拓海
2. 発表標題 差分部分空間を用いた特異スペクトル解析に基づく変化検知
3. 学会等名 第25回情報論的学習理論ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suzana R. A. Beleza
2. 発表標題 Slow Feature Subspace for Action Recognition
3. 学会等名 ICPR2020 Workshops (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masanori Muroi
2. 発表標題 Fingerspelling Recognition with Two-Steps Cascade Process of Spotting and Classification
3. 学会等名 ICPR2020 Workshops (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金盛ほなみ
2. 発表標題 部分空間の幾何学構造の時間変動に基づく変化検知の提案
3. 学会等名 信学会 情報論的学習理論と機械学習研究会 (IBISML)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 粉尚弥
2. 発表標題 凸錐判別分析に基づく画像セットベース識別
3. 学会等名 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2019)
4. 発表年 2019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
研究分担者	小林 匠 (Kobayashi Takumi)  (30443188)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員  (82626)	
研究分担者	飯塚 里志 (Iizuka Satoshi)  (30755153)	筑波大学・システム情報系・准教授  (12102)	

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		
スウェーデン	スウェーデン王立工科大学(KTH)		