

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12040

研究課題名（和文）非干渉睡眠計測のための高次元身体活動時系列解析技術の開発

研究課題名（英文）Development of High-dimensional Body Activity Time Series Analysis Methods for Unobtrusive Sleep Monitoring

研究代表者

堀口 由貴男 (Horiguchi, Yukio)

関西大学・総合情報学部・教授

研究者番号：50362455

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、非干渉型計測により睡眠中の身体の動きを高い空間分解能で捉える体圧分布時系列から呼吸異常を特徴づける時空間パターンを抽出するデータ解析技術の開発に取り組んだ。取り組みは二つの主要技術の開発に分かれる。一つは体圧分布時系列からの呼吸運動とその空間分布を推定する技術の開発であり、さまざまな種類の身体運動の成分が複合する時系列からのブラインド信号源分離に成功した。もう一つは呼吸運動の波形からの異常検出技術の開発であり、変化点検出と時系列クラスタリングの応用により睡眠時無呼吸等の異常事象を検出するのに有用な呼吸運動パターンの抽出に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本人の5人に1人が睡眠に問題を抱えているといわれている。睡眠中は意識を喪失しているために異常が生じても自覚症状に乏しい。そのような睡眠中の異常に対する調査や処置効果の継続的確認の方法として、症状に関する情報が自然と収集されることが理想である。呼吸運動は複雑な様相を呈するため、パターン抽出と判別には高度なデータ処理が求められる。本研究の開発技術は、精緻な非干渉型の睡眠計測と呼吸異常の検出に貢献する。

研究成果の概要（英文）：In this study, we worked on developing unique data analysis technology to extract spatiotemporal patterns characterizing respiratory abnormalities during sleep from high-dimensional time series of body pressure distribution data captured using non-intrusive measurement. The efforts were divided into two main technological developments. One is the development of computational methods for estimating respiratory motion and its spatial distribution from body pressure time series, which separate blind signal sources from complex time series involving various types of body motion. The other is the development of computational methods for detecting abnormalities in respiratory motion waveforms, which extract respiratory motion patterns valuable for detecting abnormal events such as sleep apnea by applying change point detection and time series clustering methods.

研究分野：システム工学

キーワード：睡眠計測 時空間データ解析 時系列解析 パターン抽出 信号源分離 時系列クラスタリング 異常検出

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

睡眠は心身の健康を保つための根本的な役割を担う活動だが、日本人の5人に1人が問題を抱えているといわれている。睡眠中は意識を喪失するため、本人が問題症状を正確に認識することは困難である。それゆえ睡眠の問題の特定と解決には特別な診察や検査を必要とするが、全国的に専門機関も専門医も不足しており、サービスリソースが非常に限られている。睡眠医療を専門としない機関でも受診者に適切に対応できるように、調査手段の技術的拡充が求められている。

調査手段の拡充に向けたアプローチとして、睡眠検査のゴールドスタンダードである睡眠ポリグラフ (PSG) 検査のプロセスを自動化する技術の研究開発がある。そこでは、脳波や心拍変動から睡眠段階を推定するアルゴリズムの開発や、呼吸努力波形から無呼吸等の事象を検出するアルゴリズムの開発が主要な取り組みである。技術開発には機械学習手法が応用され、研究報告レベルでは良好な技術的性能が示されている。ただし、それらは睡眠計測の専門家の介入を前提としており、かつデータ解析のプロセスをブラックボックス化する。非専門家の意思決定の質を高めるための調査手段を確立する上で、計測データの解釈を助けるデータパターンの特定と整理が欠かせない。

2. 研究の目的

本研究では、睡眠障害の手がかりが睡眠中の身体の大きささまざまな「動き」に含まれているとの仮説の下、障害を特徴づける時空間パターンをそれらから抽出・整理するための時系列解析技術の調査と開発に取り組んだ。

(1) 研究期間の前半は、睡眠時体圧分布時系列からの信号分離技術の開発を目的とした。体圧分布時系列とは、高い空間分解能をもつ圧力センサにより計測された身体の動きの計測データである。この高次元の時系列データにはさまざまな種類の身体運動の成分が複合している。そのような信号時系列から呼吸運動を表す波形成分を分離抽出することを技術開発の目標とした。

(2) 研究期間の後半は、睡眠障害に特徴的な呼吸努力波形のパターンを検出するアルゴリズムの開発を目的とした。そのために、呼吸運動の波形 (呼吸曲線) を対象として、無呼吸等の異常事象を検出するのに有用なパターンを抽出する方法の技術開発の目標とした。パターン抽出には時系列データの分割と共有成分の特定が必要なため、変化点検出手法と時系列クラスタリング手法の調査と検討に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 体圧分布時系列からの信号分離技術の開発では、800個の測定点をもつ柔軟面状圧力センサが睡眠中の身体の動きの計測に用いられた。調査用のデータセットは一般社団法人良質睡眠研究機構から提供を受けたもので、体圧分布時系列の計測はPSG検査と同時に行われている。800次元の時系列データから呼吸曲線とその空間分布を推定する手法として、一般化モルフォロジー成分分析 (Generalized Morphological Component Analysis; GMCA) を応用することにした。GMCAは、信号の混合のされ方が不明な複数の測定値の時系列から元の信号 (= 源信号) 系列を分離するブラインド信号源分離手法の一種である。呼吸運動の波形をGMCAにおける源信号の一つとみなし、呼吸運動の源信号とその空間分布を体圧分布時系列のデータから効果的に分離抽出するためのデータ処理方法を調査した (文献)。

(2) 呼吸曲線からの異常検出技術の開発では、PSG検査で収集された呼吸インダクタンس・プレチスモグラフ (RIP) の計測データを調査に用い、呼吸異常の検出に有用な呼吸運動パターンを特定するための変化点検出手法とクラスタリング手法の応用について検討した。変化点検出は時系列の挙動が大きく変化する時点を特定する問題で、本研究では特異スペクトル変換 (Singular Spectrum Transformation; SST) をその解法として使用した (文献)。呼吸曲線にSSTを適用すると曲線の各時点での変化度が得られ、この変化度の系列に基づいて呼吸曲線を複数の部分呼吸曲線に分割する。その後、得られた部分呼吸曲線の集合をクラスタリング処理にかけ、呼吸曲線を形作る呼吸運動パターンを抽出する。この処理については、 k -means (Euclidean), k -means (DTW), k -means (Soft-DTW), k -Shape という、時系列間距離の計算法が異なる4手法を候補とした (文献)。調査は呼吸曲線の分割とクラスタリングに関する手法比較を中心に行われた。

4. 研究成果

(1) 体圧分布時系列からの信号分離技術の研究開発については、同時計測された多数の圧力変動の時系列を少数の源信号の重みつき和に分解するアルゴリズムを開発し、体圧分布時系列から呼吸運動の成分を分離することに成功した (文献)。図1はこの処理の入出力の例を図式的に

まとめたものである。提案手法では、呼吸運動に関する時系列成分を特定の源信号に集めるために、それぞれが受け持つ周波数帯域が適切に区分されるようにして GMCA の各源信号を初期化するように工夫した。提案手法によって体圧分布時系列から抽出された呼吸努力波形は、他のブラインド信号源分離手法と比較して良好な RIP 信号との類似性を示した。

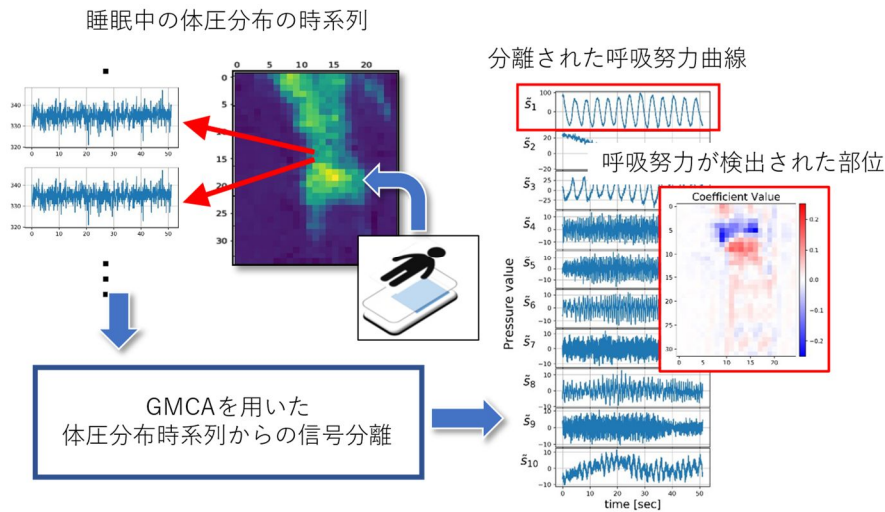


図 1 睡眠時体圧分布時系列からの呼吸運動成分の抽出

提案手法の適用事例からはさらに、閉塞性無呼吸や閉塞性低呼吸が発生しているときに、腹部の呼吸運動が検出される空間領域が拡大することが確認された。閉塞性無呼吸では、外から空気を取り入れようとしても上気道を空気が通れないために、胸部が膨らむのに合わせて腹部の体積が縮むような拳動を身体が示すことがある。体圧分布時系列を提案手法で処理することにより、このような現象の発生を特定し可視化できることが示唆された。

(2) 呼吸曲線からの異常検出技術の開発課題については、呼吸曲線の分割処理に適した SST の設定法と変化度の系列から変化点を決定する時系列分割処理の洗練を進めた後に、部分呼吸曲線の集合から呼吸運動パターンを抽出する処理について重点的な調査を行った。

図 2 のグラフは、ある PSG 被検者の呼吸曲線を提案手法で解析処理して可視化した例である。呼吸曲線が変化点で区分されており、それぞれの部分呼吸曲線が属する呼吸運動パターンのタイプに応じて背景部分が異なる色で塗り分けられている。グラフ最上部の赤色の文字列は当該時区間（30 秒単位）で発生した異常事象のラベルを表す。

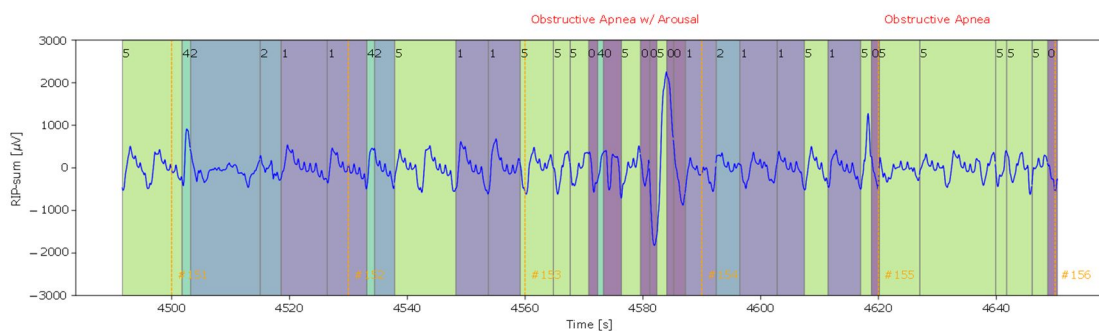


図 2 呼吸曲線に含まれる呼吸運動パターンの可視化の例

部分呼吸曲線はクラスタリング手法を用いていくつかのタイプ（＝クラスター）に分類される。呼吸運動パターンはクラスターの中心となる時系列として得られる。一連の調査では、それぞれの手法を用いて作成した呼吸運動パターンの分類が呼吸異常の発生時区間を予測するのにどれほど役立つかという観点で、4 つの代表的な時系列クラスタリング手法を比較した。個々の呼吸運動パターンの有無および出現度数の情報を用いて異常エポックを検出する予測モデルを作成し、予測モデルの性能による各手法を評価した（文献 ）。その結果、呼吸運動パターンを抽出するための時系列クラスタリング手法として k -Shape 法がより効果的であることが確認された（文献 ）。さらに、クラスタリング手法の特性比較により、呼吸運動間の類似度評価において位相と周期の違いを許容する必要があることと、運動の大きさの違いを許容するスケール不

変な類似度指標は適当でないことが知見として得られた。

(3) 呼吸曲線は複雑な様相を呈するために異常時区間の特定は非常に複雑な問題で、特定の呼吸運動パターンの検知を異常事象発生と結びつける判定アルゴリズムは十分な異常検出性能を示さなかった(文献)。これは、正常とみなされる時区間であっても一時的に呼吸運動の乱れが生じ得ることが一つの要因である。この問題への対処には呼吸運動パターンの組合せがもつ情報の活用が必要と考えられる。

(4) 睡眠中は意識を喪失しているために、異常が生じても本人の自覚症状に乏しい。そのような睡眠の問題に対する調査や処置効果の継続的確認の方法として、在宅環境等で普段どおりの睡眠をとる中で、症状に関する計測情報が自然と収集されることが理想である。体圧分布時系列における異常時区間の検出技術はこのような課題に対する解決策として有望で、前述の二つの取り組みは目的とする検出技術の主要な構成要素となる。体圧分布時系列から得られた呼吸運動波形に対して異常発生時区間抽出処理が適用できるように、これらのアルゴリズムをうまく統合することが今後の課題である。

<引用文献>

高橋裕人，堀口由貴男，他 5 名：一般化モルフォロジ成分分析を用いた睡眠時体圧分布時系列からの呼吸運動特徴の抽出，第 35 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，2019，529-534

堀口由貴男，高橋裕人，他 3 名：特異スペクトル変換を用いた呼吸曲線の分節化に基づく睡眠時無呼吸の検出，第 37 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，2021，113-117
特開 2022-074196：呼吸曲線抽出方法と異常呼吸事象抽出方法

堀口由貴男，李菁：呼吸運動曲線からの異常検出のための時系列クラスタリング手法の比較，第 50 回知能システムシンポジウム講演論文集，2023，151-155

李菁，堀口由貴男：時系列クラスタリング手法に基づく呼吸運動曲線からの異常検出に関する検討，第 39 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，2023，73-78

堀口由貴男，李菁：異常睡眠エポック検出のための呼吸運動曲線のクラスタリングとパターン抽出，第 34 回ソフトサイエンス・ワークショップ講演論文集，2024，51-54

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 堀口 由貴男, 高橋 裕人, 村瀬 亨, 中西 弘明, 榎木 哲夫
2. 発表標題 特異スペクトル変換を用いた呼吸曲線の分節化に基づく睡眠時無呼吸の検出
3. 学会等名 第37回ファジィシステムシンポジウム講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀口 由貴男, 李 菁
2. 発表標題 呼吸運動曲線からの異常検出のための時系列クラスタリング手法の比較
3. 学会等名 第50回知能システムシンポジウム講演論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李 菁, 堀口 由貴男
2. 発表標題 時系列クラスタリング手法に基づく呼吸運動曲線からの異常検出に関する検討
3. 学会等名 第39回ファジィシステムシンポジウム講演論文集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀口 由貴男, 李 菁
2. 発表標題 異常睡眠エピソード検出のための呼吸運動曲線のクラスタリングとパターン抽出
3. 学会等名 第34回ソフトサイエンス・ワークショップ講演論文集
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

睡眠の異常を検出する多次元データ解析技術の開発
<https://www2.itc.kansai-u.ac.jp/~yhorig/ja/?Project/%E7%9D%A1%E7%9C%AO%E8%A8%88%E6%B8%AC>

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
---------	---------