



Title	Fractal scaling analysis of biomedical time series and its extension to anisotropic multidimensional fractality
Author(s)	Seleznov, Ivan
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/89646">https://hdl.handle.net/11094/89646</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name: Ivan Seleznov	
Title	Fractal scaling analysis of biomedical time series and its extension to anisotropic multidimensional fractality (医療生体時系列のフラクタルスケーリング解析とその多次元非等方フラクタル性への拡張)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>Noise and fluctuations display fractal-like scaling properties associated with long-range correlations in real-world complex systems, such as biological, geophysical, and economical systems. The appearance of such fluctuations has been considered a key marker associated with a universal principle hidden in the complex system dynamics. This thesis aims to develop methodologies to analyze such long-range correlated fluctuations and to gain deeper insights into complex biological systems. In the thesis, the applications of various types of long-range correlation and fractal scaling analysis, such as long-range auto- and cross-correlation analysis, to biomedical time series will be discussed, as well as the extension of scaling analysis to higher dimensions, called Oriented Fractal Scaling Component Analysis (OFSCA) will be introduced. The applicability of novel method was shown on the 2D real world trajectories, such as human postural sway and seismic sensor time series.</p> <p>Chapter 1 provides the overall background of this thesis. To date, much research has shown that biosignal time series observed in the human body, such as electroencephalogram (EEG), heart rate variability, and gate intervals exhibit long-range correlation and fractal scaling behavior, called 1/f fluctuations. Because the biosignal time series are inevitably nonstationary, it has been pointed out that the conventional scaling analysis methods assuming stationary processes are not appropriate to quantify the scaling behavior embedded in biological systems. The analysis methods applicable to nonstationary processes have also been developed to quantify such behavior adequately and accurately. This chapter provides an overview of such scaling analysis methods and their applications to biosignal time series.</p> <p>Chapter 2 focuses on describing some of the existing scaling analysis techniques, such as Detrended Fluctuation Analysis (DFA) and Detrended Moving Average (DMA) analysis, that are currently developed. Moreover, in this chapter the applicability of DFA and DMA analysis are shown to biomedical time series, by applying it to the human brain dynamics (EEG) in various conditions, such as mental counting (serial subtraction) and perceiving human emotional faces. Both DFA and DMA were suitable to evaluate the oscillatory stability, and when used in the combination with more common methods of EEG-data analysis, such as power spectral density (PSD) and coherence, were able to examine the complex nature of EEG time series and provide a more complete picture of cortical functioning.</p> <p>The main goal of Chapter 3 is to introduce a novel method of studying the fractal scaling behavior in two-dimensional (2D) trajectories, called - Oriented Fractal Scaling Component Analysis (OFSCA). Most of the previous studies have characterized the 2D trajectories using the projections onto the orthogonal directions and otherwise under the assumption of 2D isotropic properties. Such approaches cannot provide any information on the geometrically anisotropic structure of the system. Therefore, OFSCA was developed and used to characterize the directional properties of such trajectories and decompose the fluctuations into the original components. The applicability of this method to real-world signals is shown, by applying it to the human postural sway (center-of-pressure (CoP) displacement), which is produced by the complex nature of postural dynamics. The evaluation of the directional dependency of the CoP trajectory could provide useful information on the balancing ability and dysfunction. Furthermore, the OFSCA approach can be extended to higher-dimensional data analysis, e.g. studying complex evolutionary dynamics, or understanding the structure and patterns in high-dimensional RNA sequencing datasets.</p> <p>The final chapter summarizes the main conclusions of this thesis.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 （ Ivan Seleznov ）			
論文審査担当者	(職) 氏 名		
	主 査	教 授	清野 健
	副 査	教 授	野村 泰伸
	副 査	教 授	青井 伸也
<p>論文審査の結果の要旨</p> <p>本博士論文は、生体信号時系列にみられる長時間相関、あるいは、フラクタル性と呼ばれる特徴についての研究成果をまとめたものである。脳波や重心動揺などの生体信号時系列の解析のために、これまでに提案されている方法を適用しただけでなく、2次元軌道時系列において、非等方フラクタル性という新たな特性を仮定し、その解析法を開発している。</p> <p>生体システムにおいて計測される生体信号時系列には、フラクタル性がみられることが多い。ここでいうフラクタル性とは、時系列のパワースペクトルが周波数<math>f</math>に対して、低周波数領域において広く<math>1/f^\beta</math>型の構造をもつことを意味している。生体信号時系列においては、スケーリング指数<math>\beta</math>は1に近い値をとることが多い。また、スケーリング指数<math>\beta</math>の変化が、加齢、生体機能の異常、疾患の有無と関連することが報告されており、臨床的な応用においても、その特性は注目されてきた。</p> <p>本博士論文の第1章では、時系列のフラクタル性の基本概念が丁寧に解説されている。加えて、生体信号時系列のフラクタル性について、先行研究の主要な成果がまとめられている。</p> <p>第2章では、精神作業負荷時の脳波などの解析に、トレンド除去変動解析（detrended fluctuation analysis: DFA）、および、移動平均トレンド除去自己相関解析（detrended moving average: DMA）を適用した結果が報告されている。脳波などの生体信号時系列には、非定常なトレンド成分が含まれるため、DFAやDMAのようなトレンド除去演算を含む解析法を、スケーリン解析において用いる必要がある。ここでは、パワースペクトル解析などの従来法と比較することで、トレンド除去演算を含むスケーリング解析法の有用性を示している。</p> <p>第3章では、2次元軌道時系列にみられる方向依存フラクタル性が議論されている。これまで、2次元軌道時系列のフラクタル性については、特徴的な方向がない等方的なフラクタル性が仮定されるか、直交する2成分に分解した上で各成分のフラクタル性が議論されてきた。本博士論文では、そのようなアプローチと異なり、2次元軌道が非直交かつ異なるフラクタル特性を持つ2信号の重ね合わせである可能性を検討している。ここでは、観測された2次元軌道時系列が非等方性をもった2つのフラクタル成分の重ね合わせである場合に、元のフラクタル成分の方向を特定し、独立な2成分に分解できることを数学的に示している。そして、実際の時系列解析における分析法を提案している。立位時の重心動揺（側圧中心）軌道に対して、提案法を適用することで、非等方性を持つフラクタル軌道の存在を示唆し、その特性について生体力学的な解釈を与えている。</p> <p>本博士論文の成果は、生体信号時系列だけでなく、一般的な時系列解析において広く応用が期待できるものであり、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。</p>			