

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870425

研究課題名(和文) 順序パターン解析の理論的基礎とその展開

研究課題名(英文) Theory and application of ordinal pattern analysis

研究代表者

春名 太一 (Haruna, Taichi)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20518659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：順序パターン解析とは、時系列から値そのものではなく値の間の大小関係に基づいて情報を引き出す方法である。本研究では、第一に、時系列の様々なエントロピー(時系列の特徴量)を大小関係のみから測ったとき、適当な条件のもとで両者が一致することを独自の方法を用いて新たに示した。第二に、線形な大小関係を越えたより一般の時系列のパターンに基づく解析方法として様々な半順序エントロピーを提案し、これまで順序エントロピーについて知られていた数理的結果を拡張した。第三に、新たな応用として順序局所伝達エントロピーによるサルの下側頭葉皮質脳波の解析を実践し、視覚刺激に誘発された電位伝播に伴う情報伝達の様式を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Ordinal pattern analysis is a method to extract information from a time series based on the up and down patterns in it. In this study, the following three results were achieved. First, we proved new equalities between entropies of a stationary time series and their ordinal analogs in appropriate conditions. Second, we extended the conventional ordinal pattern analysis based on the linear order relationship to that based on the partial order relationships. Many mathematical results known in the conventional ordinal pattern analysis were generalized. Finally, as a new application of the ordinal pattern analysis, we analyzed the electrocorticogram recorded from the inferior temporal cortex of macaque monkeys by the symbolic local transfer entropy. We revealed the pattern of information transfer associated with the propagation of visually-evoked potential.

研究分野：非線形科学

キーワード：順序エントロピー 残留エントロピー 伝達エントロピー 時系列解析 定常確率過程 半順序集合
脳波

1. 研究開始当初の背景

順序パターン解析とは、値そのものではなく、値の間の大小関係に注目して時系列のエントロピーなどの特徴量を定量化する方法である。一般に、実装が簡便かつノイズに対して頑健な手法として、現実世界のデータ解析においてしばしば用いられてきたが、本研究開始時点では、その理論的基礎に関する研究はエントロピー率（時系列の不確かさの尺度）を除いては、知られている結果がほとんどない状況であった。また、順序パターン解析が適用されている時系列の特徴量も、エントロピー率や伝達エントロピー（時系列間の情報伝達量の尺度）などの一部のものに限られていた。さらに、順序パターン解析は線形な大小関係にのみ基づいており、より一般の時系列内のパターンに基づく方法への拡張可能性があった。このような背景のもと、本研究では、

残留エントロピー（時系列に含まれる大域的相関の尺度）や伝達エントロピー率などの順序パターン解析についての未解決問題を解決すること、より一般の時系列内のパターンに基づく解析方法を提案すること、局所伝達エントロピーといったこれまで順序パターン解析の方法が適用されてこなかった量を用いた時系列解析を実践すること、

を目指して開始された。

2. 研究の目的

上記の三つの項目について以下のような目的で研究を行った。

時系列の数理モデルである有限アルファベット定常確率過程(Finite-Alphabet Stationary Stochastic Process, FASSP)に対して、従来の研究で仮定されていたマルコフ性を仮定せずに残留エントロピーや伝達エントロピー率とこれらの順序パターン解析版（それぞれ、順列残留エントロピー、順列伝達エントロピー率）との間の等号を示すこと。線形の大小関係の自然な一般化となるような時系列のパターンに基づく、順序パターン解析の拡張を行うこと、時空パターンに伴う情報伝達を定量する方法である局所伝達エントロピーの順列版を用いて、マカクザル下側頭葉皮質における視覚情報処理における情報伝播の様式を脳波解析から解明すること。

3. 研究の方法

上述の三つの項目について以下のような方法で研究を行った。

マルコフ性の仮定を取り除く方法として、FASSP の有限状態隠れマルコフ過程による近似を用いる方法、および大小関係だけでなく、等号も考慮した含めたパターンによる方法（修正順列法）の

二通りの方法を用いて、もとの量とその順列版との間の等式を証明することを試みた。

線形の大小関係のもっとも自然な一般化の一つとして半順序関係をアルファベット集合に仮定し、エントロピー率、残留エントロピーまたは伝達エントロピー率などの半順序版を提案し、もとの量との間の関係性を明らかにすることを試みた。

順列局所伝達エントロピーを用いて、マカクザル下側頭葉皮質に設置された電極から測定された電位伝播の時空パターンに伴う情報伝達量を定量した。これに対して組み合わせのホッジ分解を適用して情報流に対するポテンシャルを抽出することで情報流の湧点や沈点、それらを結ぶネットワークを特定し、このネットワークが視覚刺激呈示に伴ってどのように変化するのかを解析した。

4. 研究成果

上述の三つの項目について以下のような成果が得られた。

以下の主張を証明することができた。

(1) 任意のエルゴード的 FASSP に対して n 階隠れマルコフ近似過程を構築し、その順列残留エントロピーを計算する。このとき、 n を大きくする極限で、この量はもとの残留エントロピーと一致する。

(2) 伝達エントロピー率に対しても、同様の主張が成立する。

(3) 修正順列残留エントロピーともとの残留エントロピーは任意のエルゴード的 FASSP で一致する。

(4) 修正伝達エントロピー率についても、(3) と同様の主張が成立する。

これらの結果は、我々が独自に発展させてきた「値と順序の双対性」に基づく方法で証明された。これらの結果においては、与えられた順列に対して何通りの文字列が対応するのかを数え上げてブロックエントロピーと順列ブロックエントロピーの差を評価すること、および順列と一対一に対応する文字列の構造を特徴づけることが鍵であり、我々の方法で初めて示すことができたものである。

また、順列伝達エントロピー率については、もとの伝達エントロピー率との関係が不明なまま時系列解析に利用されていたという状況があり、FASSP という理想化された条件ではあるが、より広いクラスの FASSP に対して順列伝達エントロピー率がもとの伝達エントロピー率の間に等号が成立することが示されたことには、その利用の、数理の観点からの正当化という観点から大きな意義があると考えられる。

半順序エントロピーは、順列エントロピーの場合と同様に、等号を考慮しない場合と考慮する場合の二通りが考えられる。前者を三角半順序エントロピー、後者を正方半順序エントロピーと呼ぶ。まず、エントロピー率に関しては、どちらの場合でも任意の FASSP に対してもとのエントロピー率と半順序エントロピー率は等しくなることが分かった。一方、残留エントロピーについては、次の結果が証明された。

(1) 正方半順序残留エントロピーともとの残留エントロピーがすべてのエルゴード的 FASSP で等しくなるための必要十分条件は、アルファベット上の半順序の自己同型群が自明であること、である。
(2) 三角の場合には、「すべてのエルゴード的 FASSP で」という条件を「すべてのエルゴード的マルコフ情報源で生成される FASSP で」に置き換えた主張が成立する。

また、伝達エントロピー率に対しても残留エントロピーの場合と同様の結果が成り立つ。

以上の結果は、従来の順列エントロピーに対する結果を含むもので、これを半順序エントロピーに対して一般化したものになっている。逆に、この一般化からもとの順列エントロピーの場合を見直すと、線形順序の「自己同型群の自明性」という特性が、例えば残留エントロピーと順列残留エントロピーの間の等式の成立に重要であることが理解できる。

今後の課題として、半順序エントロピーを用いた時系列解析を実践するために、どのような時系列データであれば半順序構造を仮定することが適切であるのか、また、逆に、与えられた時系列データに対して自然な半順序構造を導入して半順序パターン解析を行うことができるのかどうか、などを考えていく必要がある。

マカクザル下側頭葉皮質における電位伝播から順列局所伝達エントロピーを用いて抽出された情報流ポテンシャルの湧点と沈点のなす、空間情報も保持したネットワーク（情報流ネットワーク）の構造から情報伝達の大域的方向性を定量化した。その結果、視覚刺激呈示に伴って、情報伝達の大域的方向が前後方向で向きが複数回反転することが分かった。これは、視覚刺激呈示にフィードフォワード処理よりもフィードバック処理が優位になる状態が存在することを示唆している。

また、情報流ネットワークに対してスモールワールド性の観点からの解析を行い、視覚刺激呈示中は視覚刺激呈示前後に比べて、効率性が上昇し、クラスタ

係数の値が下がることが分かった。これは、視覚刺激呈示中には、より情報統合の度合いが上がり、かつ情報分離の度合いが下がることを意味する。

さらに、情報流ネットワークの成り立ちについて調べると、視覚刺激呈示中においては、特定の少数の電極が動的に情報流の湧点や沈点に高い頻度でなっていることが分かった。すなわち、情報流ネットワークは空間的に局在しつつも動的に変化しながら維持されている。

以上の結果については、複数の個体で同様の傾向がみられた。

本研究で提案された方法は、従来のようにあらかじめ決まった結合ネットワーク上での情報伝達を考えるのではなく、まず情報伝播を担う電位の平面的な流れがあり、これから有効な情報流ネットワークを抽出して解析を行っていく点において独特である。

今後の課題としては、情報流の大域的方向性と情報流ネットワークの構造との関係性をより詳しく調べて明らかにしていくこと、また本解析の生理学的解釈についてより深く議論すること、などが挙げられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

Taichi Haruna, Kohei Nakajima, Permutation Approach to Finite-Alphabet Stationary Stochastic Processes Based on the Duality between Values and Orderings. European Physical Journal Special Topics, 査読有, Vol. 222, 2013, 383-399.

DOI:10.1140/epjst/e2013-01848-5

[学会発表](計 4件)

春名 太一、順列エントロピー：基礎と応用、Nagahama Workshop “From Quantum to Life”, 2014.11.14、長浜バイオ大学(滋賀県)

川崎 圭祐、春名 太一、藤木 裕也、澤畑 博人、谷川 久、飯島 淳彦、鈴木 隆文、長谷川 功、下側頭葉皮質における視覚応答の階層的な活動伝搬、第37回日本神経科学大会、2014.9.13、パシフィコ横浜(神奈川県)

藤木 裕也、春名 太一、川崎 圭祐、溝畑 博人、鈴木 隆文、長谷川 功、マカクザル下側頭葉皮質視覚情報処理

における整流作用：順列局所伝達エントロピー解析、第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2013.12.20、神戸国際会議場（兵庫県）

春名 太一、順列エントロピーと双対性。第 27 回人工知能学会全国大会、2013.6.4、富山国際会議場（富山県）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕
出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

春名 太一（HARUNA, Taichi）
神戸大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：20518659

(2) 研究分担者

（ ）

研究者番号：

(3) 連携研究者

（ ）

研究者番号：