

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21700249

研究課題名(和文) リカレンスプロットを用いた時系列データの検定

研究課題名(英文) Tests for time series data using recurrence plots

研究代表者

平田 祥人 (HIRATA YOSHITO)

東京大学・生産技術研究所・特任准教授

研究者番号：40512017

研究成果の概要(和文)：本研究は、リカレンスプロットを用いた時系列データの検定手法を提案することを目的とした。特に、リカレンスプロットの点パターンの確率構造・位相幾何学的性質に着目し、背後に存在する力学系の性質を特徴づける検定手法を提案した。提案した手法を用いて検定できる性質は、定常性、系列相関、周期性、定常線形性、カオス性、同期と多岐に渡る。これらの手法を性質の良く分かっている数理モデルから生成したデータで検証するとともに、様々な実データに対して応用した。

研究成果の概要(英文)：This research aimed at proposing tests for time series data using recurrence plots. Especially, we proposed methods that characterize the underlying dynamics by using the probabilistic and/or topological properties. The proposed tests include those for stationarity, serial dependence, periodicity, stationary linearity, deterministic chaos, and synchronization. We validated these tests using toy models whose characteristics are well known, and applied the tests to various real datasets.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：非線形時系列解析

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：複雑系、時系列解析、信号処理、非線形現象、非線形理論

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 実世界には、生命・気象など複雑な現象が多数存在する。これらの現象から観測された時系列データの多くは、時間的に変動し(非定常)、ノイズに汚染されているという共通の特徴がある。しかし、既存の時系列解析の手法には、このようなデータを解析する手法は、十分に発達していなかった。特に点過程データの時系列データ、つまり不規則な間隔にイ

ベントが観測されるデータを解析する手法は十分に構築されていなかった。

(2) 非定常なデータや、ノイズに汚染されたデータを扱う手法として、リカレンスプロットが注目されている。リカレンスプロットは、縦軸、横軸とも時間軸である2次元平面図である。2つの時間の組で状態が近ければ対応する場所に点を打ち、そうでなければ点を打たない。リカレンスプロットは、時系列デー

タを2値化して表現しているため一瞬情報がかなり落ちてしまっているように思われるが、位相幾何学的情報や、スケールの情報を除く距離空間的情報をほとんど保持していることが申請者らの最近の研究によって示されていた。そのためリカレンスプロットは、非定常でノイズに汚染された時系列データを解析する上で有力な手段となり得る。

(3) リカレンスプロットの点のパターンを見ることで、背後の力学系の性質が類推できる。例えば、ガウス乱数のリカレンスプロットでは、点が不規則に一樣に広がる。正弦波などの周期的な時系列データでは、リカレンスプロットは周期的なパターンを示す。ロジスティック写像などのカオス的な時系列データでは、斜めの短い線分が現れる。このように、リカレンスプロットの点のパターンは、背後の力学系の性質と深く関係すると考えられていた。

(4) しかし、本研究開始以前のリカレンスプロットの研究では、表面的な点のパターンの定量化が主流であった。そのため、以下のような3つの問題点があった。1つ目は、リカレンスプロットにできる線分だけに注目が集まり、点のパターンの位相幾何学的性質が無視されていた。2つ目は、平均、生起確率、エントロピーなどの単純な統計量のみが使われ、打たれる点同士の独立性などの確率構造が考えられていなかった。3つ目は、定量化された指標と背後の力学系の性質があまり直接的に結びついていなかった。

## 2. 研究の目的

そこで、本研究は、リカレンスプロットから、位相幾何学的性質・確率構造を用いて時系列データを生成した力学系の性質を検定する手法を開発することを目的とした。特に、リカレンスプロットを用いて、定常性、系列相関、非線形性、周期性、カオス性、同期性を明らかにする検定手法を開発することを目指した。その際、リカレンスプロット上に打たれる点のパターンの確率構造・位相幾何学的性質を主に用い、サロゲートデータやモンテカルロ法などのランダムなデータを大量に生成する手法はできるだけ用いないことを条件とした。

## 3. 研究の方法

研究の方法としては、1年目にそれぞれの性質を調べる手法を開発した。そして、2年目にこれらの手法を実データに応用し、手法

が実データでうまく働くことを確認するとともに、必要があれば手法に修正を加えるという手法を取った。

## 3. 研究成果

(1) 時系列データの以下の性質を特徴づける検定手法を開発した。

①定常性：非定常な時系列データから正常な部分を切り出す手法と、点の打たれる確率が空間的に偏っていないかどうか調べる手法の2種類の手法を開発した。

②系列相関：系列相関のある時系列データでは、リカレンスプロット上で点が斜めに並ぶ性質がある。そのため、点が斜めに並びやすいかどうかを統計的に検定する手法を開発した(Hirata and Aihara, Int. J. Bifurcat. Chaos, in press)。

③周期性：周期性を持つ時系列データでは、中央の線から一定の間隔のところでは点の出現確率が大きくなる。この確率的な性質を利用して、周期性を検定する手法を開発した((Hirata and Aihara, Phys. Rev. E 82 (2010))。

④定常線形性：時系列データが定常な線形確率過程から生成される時、1次元の時系列データから求めたリカレンスプロット上の斜めの線分の長さの分布が線分の長さに関係なく指数関数的に減衰する性質を発見した。それに対して、定常線形でない時系列データでは、短い斜めの線分では線分の数の減衰が速く、線分の長さが長くなるとゆっくり一定のレート減衰するようになる。この性質を利用することで、定常線形なシステムとそれ以外のシステムを切り分けることができる。

⑤カオス性：リカレンスプロットから視覚的にDevaneyの決定論的カオスの性質を調べる手法を開発した(Hirata and Aihara, Phys. Rev. E 82 (2010))。Devaneyのカオスの定義は、位相推移性、周期解の稠密性、初期値鋭敏性からなる。位相推移性とは、任意の近傍に写像を繰り返すと、任意の近傍と空でない共通部分を持つようにできるという性質である。周期解の稠密性とは、任意の近傍に必ず周期解が含まれるという性質である。初期値鋭敏性は、2つの近傍点を持ってきて写像を繰り返すと、近傍点でなくなる時刻が必ず来るといものである。元々のDevaneyのカオスの定義の3つの性質には、それぞれ任意の近傍という表現が含まれており、有限長の時系列データとは相性が悪い。そのため、Devaneyの定義を緩和し、有限長の時系列データのリカレンスプロットからそれぞれの緩和された性質が確認できるようにした。緩和された位相推移性は、リカレンスプロットの各列に打たれる最小行インデックスの最

大値が各列の最大行インデックスの最小値よりも小さいことと言い換えることができる。緩和された周期解の稠密性では、斜めに点が連続する傾向にある線に対応する周期を周期解として見なした時、周期解の近傍である全時刻の集合の和集合を求めると、全体の時刻の集合と一致するとする。初期値鋭敏性は、斜めの線上に点が打たれていないところが必ず存在すると言い換えることができる。これらの緩和された性質が否定されれば、時系列データが短いもしくは元の対応する性質が満たされない。

⑥同期性：2つの時系列が同期するかどうかは、2つの対応するリカレンスプロットを重ねてみて、確率的に同じ場所に点が打たれる傾向にあるかどうか検定すれば良い(Hirata and Aihara, Phys. Rev. E 81 (2010))。

上記のそれぞれの検定手法が正しく働くことを性質が良くわかっている数理モデルから生成した時系列データを使って確認した。

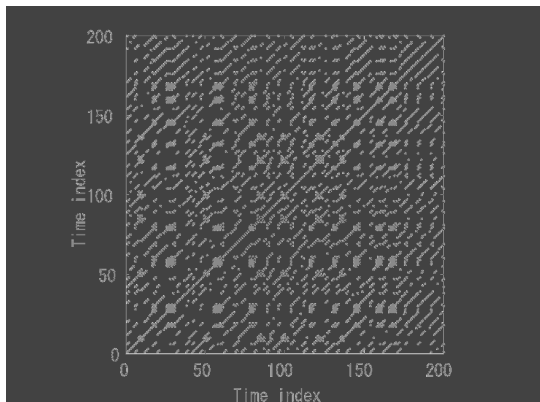


図1：エノン写像のリカレンスプロット

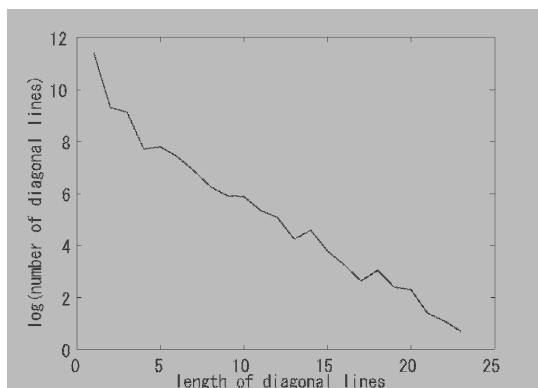


図2：エノン写像から生成した1次元の時系列データから求めたリカレンスプロット上の斜めの線分の長さの数の分布

例として、特に、ここでは、エノン写像のリカレンスプロットを示す(図1)。このリカレンスプロットは、点の打たれる確率の場所に

よる偏りが小さいため、定常であると判断される。このリカレンスプロットからは、系列相関があることがわかる。また、1次元の時系列データからリカレンスプロットを求めて、そのリカレンスプロット上での斜めの線分の長さの分布を求めると、短い線分で線分の数の減少率が大きい(図2)。これは、定常線形過程と異なることを示している。また、図1のリカレンスプロットは、緩和したDevaneyのカオスの3条件を満たす。つまり、Devaneyの意味のカオスと整合的であることがわかる。また、周期7, 8, 9の強い周期性がある。

(2) 開発した手法を様々な時系列データに応用した。

①ヤリイカの巨大軸索のデータ：このデータに上記の手法を応用。その結果、系列相関があり、定常線形過程とは異なり、決定論的カオスと整合的であることがわかった(Hirata and Aihara, Phys. Rev. E 82 (2010))。

②北極振動：北極振動のデータに対しては、系列相関があり、定常線形過程とは異なることがわかった。また、部分的に決定論的カオスと整合的であるところがあることがわかった。

③為替のティックデータ：このデータに対しては、点過程の距離を用いてリカレンスプロットを用いた。上記で提案した定常性の検定を用いると、使用したデータの部分に関しては、定常と見なせることがわかった。また、系列相関があることがわかった。しかし、緩和した位相推移性の条件を満たさないため、決定論的カオスと整合的であると積極的に示すことはできなかった。このデータには、周期1日の周期性があることもわかった。

④地震のデータ：東京周辺の地震を抜き出し、地震の時刻と位置を用いて点過程データの距離を求め、この距離を利用してリカレンスプロットを描いた。このデータに関しても、上記の定常性の検定をパスした。そのため、k個の近傍点を用いてリカレンスプロットを用いる手法等非定常なデータに対する対策を考えていたが、この研究で解析したデータに対しては、これらの手法を用いる必要がなくなった。この地震のデータは、系列相関を示した。このデータに関しても、緩和した位相推移性の条件を満たさないために、決定論的カオスと整合的であると積極的に示すことはできなかった。

(3) まとめとしては、リカレンスプロットを用いて、定常性、周期性、定常線形性、カオス性、同期性を検定する手法を開発した。これらの手法を実データに応用し、ヤリイカと北極振動に関しては、決定論的カオスと整合

的な部分が取れること、為替、地震のデータに関しては、系列相関があることがわかった。

## 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 4 件)

- ① Yoshito Hirata and Kazuyuki Aihara, Statistical tests for serial dependence and laminarity on recurrence plots, International Journal of Bifurcation and Chaos 21, in press. 査読有
- ② Yoshito Hirata and Kazuyuki Aihara, Identifying hidden common causes from bivariate time series: A method using recurrence plots, Physical Review E 81, 016203 (2010). 査読有
- ③ Yoshito Hirata and Kazuyuki Aihara, Devaney's chaos on recurrence plots, Physical Review E 82, 036209 (2010). 査読有
- ④ Satoshi Suzuki, Yoshito Hirata, and Kazuyuki Aihara, Definition of distance for marked point process data and its application to recurrence plot-based analysis of exchange tick data of foreign currencies, International Journal of Bifurcation and Chaos 20, 3699-3708 (2010). 査読有

[学会発表] (計 11 件)

- ① 平田祥人, リカレンスプロット: 時系列の視覚化を越えて, マクロ経済動学の非線形数理, 2010年9月10日, 京都
- ② Yoshito Hirata and Kazuyuki Aihara, Linearity and nonlinearity within recurrence plots, 2010 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2010年9月8日, クラクフ(ポーランド)
- ③ 平田祥人, Time series analysis using distances, GSC セタミーティング, 2010年7月15日, 横浜
- ④ Yoshito Hirata, Yoshiya Matsuzaka, Hajime Mushiake, and Kazuyuki Aihara, Identifying common hidden causes from bivariate time series in the brain, 458<sup>th</sup> WE-Heraeus-seminar, SYNCLNIE 2010 Synchronization in Complex Networks, 2010年5月27日, バッド・ホンネフ(ドイツ)
- ⑤ Koji Iwayama, Kohske Takahashi, Katsumi Watanabe, Yoshito Hirata, Kazuyuki Aihara, and Hideyuki Suzuki, Synchronized brain activity change related to perceptual alternations, The Fifteenth International

Symposium on Artificial Life and Robotics, 2010年2月6日, 別府

- ⑥ 平田祥人, リカレンスプロットと外力の再構成, 複雑系現象の時系列解析 4: 工学・生物・物理現象, 2010年1月28日, 東京
- ⑦ 岩山幸治, 高橋康介, 渡邊克己, 平田祥人, 合原一幸, 鈴木秀幸, 知覚交代に伴う脳活動の変化, 脳と心のシンポジウム第10回冬のワークショップ, 2010年1月12日, 留寿都
- ⑧ 岩山幸治, 平田祥人, 合原一幸, 鈴木秀幸, リカレンスプロットを用いた変化点検出手法の提案, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 2009年11月11日, 屋久島
- ⑨ Yoshito Hirata and Kazuyuki Aihara, Testing serial dependence on recurrence plots, The Third International Symposium on Recurrence Plots, 2009年8月26日, モントリオール(カナダ)
- ⑩ Yoshito Hirata and Kazuyuki Aihara, Recurrence plots and their application in reconstructing driving forces, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, 2009年5月20日, スノーバード(アメリカ)
- ⑪ Yoshito Hirata, Fumiaki Iida, Kiyoshi Kotani, Kevin Judd, Kiyoshi Takamasu, and Kazuyuki Aihara, Identifying coupling types from observed data, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, 2009年5月19日, スノーバード(アメリカ)

[その他]

ホームページ等

<http://www.sat.t.u-tokyo.ac.jp/~yoshito/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平田 祥人 (HIRATA YOSHITO)  
東京大学・生産技術研究所・特任准教授  
研究者番号: 40512017

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者