

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22700227

研究課題名（和文） 動的に変化する多変量複雑システムの動画表現・構造同定・最適化工学への応用

研究課題名（英文） Identifying the structure of dynamical multivariate complex systems and its visualization and application for optimization engineering

研究代表者

鈴木 智也 (SUZUKI TOMOYA)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：70408649

研究成果の概要（和文）：

自然界に存在する実システムは多数の要素の相互作用によって成り立ち、特に予期せぬ振舞いによって我々を翻弄する。この振舞いを予測するには過去の観測値を利用できるが、しかし観測した要素の全てが予測対象のシステムを構成している保証はない。そこで我々は、過去の観測値に対する予測精度を最大化するように、予測にとって本質的な要素を特定し、予測モデルを最適化する。またターケンスの埋め込み定理によれば、1変量データを多次元アトラクタに変換することでシステム全体の振舞いを再現できる。これにより因果関係にある要素を特定する必要はない。しかし埋め込みにはパラメータが存在し、これらを最適化する必要がある。つまり、いずれにせよ最適化問題を解く必要があり、本研究ではメタ解法の一つである遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた。さらに、実システムは動的に構造変化する可能性があるため、予測モデルの最適化を動的に繰り返した。この動的最適化の有用性を検証すべく、実際の為替取引市場に対して適用したところ、予測精度の向上を実現できた。これはシステムが実際に構造変化していることを裏付けている。

研究成果の概要（英文）：

Real systems are often composed by many elements interacting with each other and show us complex behavior. To predict these complex systems, we can refer to their past behavior, but all of the observed elements do not always compose the same system. Thus, we have to detect some essential elements from the observed elements so as to improve the prediction accuracy of learning data. Moreover, if we apply Takens's embedding theorem to reconstruct an attractor only by single element, we don't have to select elements, but we have to optimize embedding parameters. In any case, because we have to solve above optimization problems, we applied the genetic algorithm (GA) as one of the meta-heuristic techniques. Moreover, real systems might be nonstationary and their own mechanism changes dynamically. Therefore, we reiterated the GA for each optimization with simple algorithms to embed and to predict time-series data for saving numerical costs. Through some simulations, we confirmed that our dynamical optimization can improve prediction accuracy of multivariate nonlinear systems, even financial markets, and can help us to examine whether the structure of a complex system dynamically changes or not.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，感性情報学・ソフトウェア

キーワード：複雑系，非線形時系列解析

### 1. 研究開始当初の背景

自然界の多変量システムを効果的に予測するためには，システムを構成する要素間の因果構造を反映させた予測モデルを構築する必要がある。しかし我々は，時系列データとして多数の要素の振舞いを観測することができるが，どの要素が予測対象と関連があるのかを知ることは難しい。

この問題を解決する方法は2通り考えられる。まず1つ目は，何らかの方法で全要素( $N$ 個)の中から予測に必要な要素を厳選する方法である。しかし組合せ総数は $2^N$ 通り存在し，要素数 $N$ に応じて組合せ爆発を起こすのでしらみつぶしに調べ上げるのは困難である。そこで我々は，遺伝的アルゴリズム(以下，GA)を用いることで，この組合せ最適化問題の解法を検討してきた。

2つ目の方法は，関連する変数を特定することを放棄し，予測対象変数の1変量時系列データのみで予測モデルを構築する方法である。この場合，ターケンスの埋込み定理を用いて予測モデルを構築するが，この方法においては，埋込み次元 $d$ や遅れ時間 $\tau$ を最適化する必要がある。従来では，誤り近傍法や自己相関関数を用いることで $d$ や $\tau$ を設定することが一般的であるが，この方法においても我々はGAを用いて各パラメータを最適化する方法を検討してきた。

### 2. 研究の目的

自然界の複雑システムは定常ではなく，因果構造のパターンやダイナミクス自体が動的に変化している可能性がある。例えば金融市場を考えれば，ある国の金融財政政策の変化は国際金融市場全体に影響を与え，各国間の因果構造は変化する。その結果，過去のデータに基づいて最適化されたモデルは刻々と劣化していく。したがって，前章で述べたモデルの最適化を動的に繰返す必要がある。本研究では，この動的最適化の有用性を検証すべく，実際の金融データを用いて計算機実験を行った。さらに，動的最適化の効果を調べることで，実システムの構造変化の有無を検証する。

### 3. 研究の方法

観測できる要素数を $N$ ，各要素の時系列データを $x_i(t)$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )とすると，システム全体の振舞いは以下のように記述される。

$$V(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t), \dots, x_N(t)\} \quad (1)$$

本研究では $V(t)$ の将来変動を予測するために，近傍の振舞いを参考にすることで局所線形近似的に非線形予測を行う。そのため $V(t)$ の近傍点 $V(k_n)$ を $t-L \leq k_n < t$ より探索し，その1ステップ後の振舞いを平均化することで， $V(t+1)$ の予測値(次式)を得る。

$$V'(t+1) = \langle V(k_{n+1}) \rangle \quad (2)$$

しかし，一般的に式(1)を適切に構成することは容易ではない。観測した変数がシステムを構成する変数かどうかは未知であり，たとえ構成する変数であっても予測対象の変数と直接関連しているとは限らない。

この問題を解決する方法は2通り考えられる。まず1つ目は，何らかの方法で全変数の中から予測に必要な変数を厳選する方法である。例えば，変数 $i$ が変数 $i_1, i_2, i_3$ からの影響を受けていれば，変数間の因果構造は次式のように書ける。

$$x_i(t+1) = F(x_i(t), x_{i1}(t), x_{i2}(t), x_{i3}(t)) \quad (3)$$

ここで $F$ は関数， $i$ は目的変数， $i_1 \sim i_3$ は説明変数である。この場合は，式(1)を

$$V(t) = \{x_i(t), x_{i1}(t), x_{i2}(t), x_{i3}(t)\} \quad (4)$$

に修正し，式(2)を適用する方が優れた予測精度を期待できる。しかし，予測対象変数 $i$ と直接的に相互作用する要素集合 $\{i_j\}$ は $2N$ 通りの可能性があり，この組合せ総数は要素数 $N$ に応じて組合せ爆発を起こす。よって式(3)のような因果構造を推定し，式(4)のように予測モデルを最適化する問題は組合せ最適化問題となる。そこで我々は，先攻研究において，GAを用いることで，この問題の解法を検討してきた。

まずGAで用いる遺伝子型を $g_i = \{1001\dots\}$ のように2値表現した。ここで $g_i(j) = 0$ であれば変数 $i$ の予測の際に，式(1)の $V(t)$ として変数 $j$ を用いないことを意味し， $g_i(j) = 1$ であれば変数 $j$ を用いることを意味している。さらに，各遺伝子型の適合度を求めるために，それぞれの $V(t)$ を用いて過去に観測されたデータを予測することで予測精度を算出し，その予測精度を適合度とした。交叉や突然変異などGAのアルゴリズムによって世代を進めると遺伝子型が最適化され，これを基にシステムの因果構造や最適な予測モデルを推定することができる。

2つ目の方法は，関連する変数を特定することを放棄し，予測対象変数 $i$ の1変量時系列データのみで予測モデルを構築する方法である。この場合，ターケンスの埋込み定理を用いれば次式を，式(1)の代わりとみなす

ことができる。

$$V(t) = \{x_i(t), x_i(t-\tau), \dots, x_i(t-(d-1)\tau)\} \quad (5)$$

しかしこの方法においては、埋込み次元  $d$  および遅れ時間  $\tau$  を最適化する必要がある。そこで本研究では、先と同様に GA を用いて  $d$  や  $\tau$  を最適化する方法を検討した。まず  $d$  や  $\tau$  を 2 進数に変換し、それらを直列に並べることで GA の遺伝子型を構成する。各遺伝子型は  $g = \{11001\dots 0\}$  のように 10 ビットで表現した。各遺伝子型に対して式 (5) を構成し、前手法と同様に、過去のデータを予測することにより予測精度を求め、それを各遺伝子型の適合度とする。

以上の手法の有用性を検討するために、実際の多変量システムとして、1996 年の外国為替市場における 25 種の取引価格を予測した。各取引価格は 30 分毎に記録され、時系列データを構成している。ただし実システムは一般的に予測が難しいことから、1 ステップ後の変動が上昇するか、または下降するかを予測した。つまり  $x'_i(t+1) - x_i(t) > 0$  であれば上昇、 $x'_i(t+1) - x_i(t) < 0$  であれば下降と予測し、その的中率を予測精度 [%] とした。

#### 4. 研究成果

予測精度を図 1 に示す。実際のシステムを対象とする場合、外部の影響によってシステムの構造が変化する可能性がある。もし構造変化が起これば、予測モデルの当てはまり悪くなるので予測精度は低下する。そこで本研究では、過去 20 回の予測精度が閾値  $\theta$  [%] を下回ったら、再び GA にて因果構造を推定し直し、予測モデルを動的に最適化する実験を行った。ただし図中の C1 は、最初に GA を適用した後、予測モデルを固定する方法を意味し、C2 は毎時刻の予測において GA にて予測モデルを最適化し直す方法を意味している。

結果として、閾値  $\theta$  [%] を大きくして動的最適化の回数を増やすほど予測精度が向上するので、GA による予測モデルの最適化の有用性は明らかである。さらにこの結果は、外国為替市場の構造が動的変化している事実を裏付けている。このように実システムを予測対象とする場合には、本研究で用いた動的最適化法が有効である。

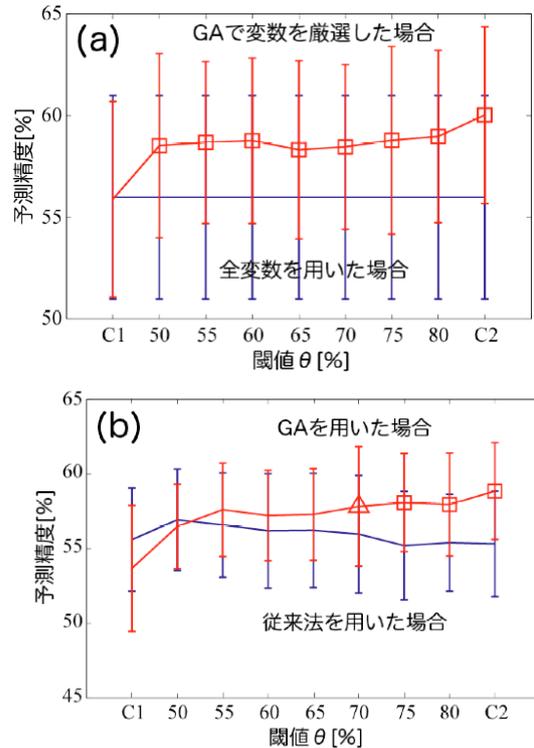


図 1: (a) GA によって予測モデル構築に用いる変数を厳選した場合と、単純に全変数を用いて予測した場合の比較。(b) GA によって  $d$  や  $\tau$  を最適化した場合と、従来法 (誤り近傍法および自己相関関数を利用) の比較。予測は 25 市場の為替取引価格に対して行い、その予測精度の平均値を実線で表し、その標準偏差をエラーバーで示している。さらに GA の有用性を検定するために、ウィルコクソン符号付順位検定を行い、5 [%] の有意水準で有用性が示されたら  $\Delta$  印で、1 [%] の有意水準でも有用性が示されたら  $\square$  印を付加している。なお C1 と C2 を比較し、C2 の予測精度が高い場合は、システムは動的に構造変化していると考えられる。

#### 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 6 件)

- ① Tomoya Suzuki, Appropriate Time Scales for Nonlinear Analyses of Deterministic Jump Systems, Physical Review E, Vol. 83, No. 6, 066203/1-9, 2011. (査読有り)
- ② 大塚陽介, 鈴木智也, 決定論的ジャンプ過程のシステム同定と長期予測に適したサンプリング手法の検討, 情報処理学会論文誌

数理モデル化と応用, Vol.5, No.1, pp.30-39, 2012.(査読有り)

- ③ Yuta Ueoka, Tomoya Suzuki, Seiichi Yamamoto, Analysis on the Efficiency of Statistical Measures to Identify Network Structure of Chaos Coupled Systems, International Journal of Modern Physics C, Vol.21, No.8, pp.1065-1079, 2010.(査読有り)
- ④ Inose Satoshi, Tomoya Suzuki, Stock Portfolio Management with Nonlinear Time Series Prediction, Proceedings of International Symposium on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp.744-747, 2012.(査読有り)
- ⑤ Yousuke Otsuka, Tomoya Suzuki Data Sampling Strategies for Long-Term Predictions of Deterministic Jump Systems, Proceedings of International Symposium on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp.88-91, 2012.(査読有り)
- ⑥ Kazuya Nakata, Tomoya Suzuki, Evaluating the Risk of Nonlinear Prediction with the Bagging Algorithm, Proceedings of International Symposium on Nonlinear Circuits and Signal Processing, pp.748-751, 2012.(査読有り)

[学会発表] (計 17 件)

- ① 田中清春, 鈴木智也, バギングによる平均分散ポートフォリオモデル, 電子情報通信学会 2011 年総合大会, 岡山, 2012 年 3 月 21 日.
- ② 林大賀, 鈴木智也, ペアトレーディングにおける非線形テクニカル分析, 電子情報通信学会 2011 年総合大会, 岡山, 2012 年 3 月 21 日.
- ③ 鈴木智也, 猪瀬悟史, 田中清春, 林大賀, 大倉佑嗣, 金融工学における非線形時系列モデリング, 電子情報通信学会 2011 年総合大会, 岡山, 2012 年 3 月 21 日.
- ④ 水野翔太, 鈴木智也, 投資持続時間とリスクを考慮した合理的な手仕舞い戦略: 損小利大戦略は最適か?, 日本物理学会 2011 年次

- 大会, 神戸, 2012 年 3 月 25 日.
- ⑤ 鈴木智也, 猪瀬悟史, 田中清春, バギング型非線形予測による平均分散ポートフォリオモデル, 日本物理学会 2011 年次大会, 神戸, 2012 年 3 月 25 日.
- ⑥ 仲田和也, 鈴木智也: バギングによる非線形予測のリスク評価, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 静岡, 2011 年 10 月 20 日.
- ⑦ 猪瀬悟史, 鈴木智也, 非線形時系列予測による株式ポートフォリオの運用, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 静岡, 2011 年 10 月 20 日.
- ⑧ 岡澤政幸, 鈴木智也, カオスニューラルネットワークによる多目的最適化, 電子情報通信学会非線形問題研究会, 静岡, 2011 年 10 月 20 日.
- ⑨ 猪瀬悟史, 鈴木智也, ポートフォリオ構築問題における時系列予測モデルの活用, 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, 北海道, 2011 年 9 月 16 日.
- ⑩ 大塚陽介, 鈴木智也, 決定論的ジャンプ過程のシステム同定と長期予測に適したサンプリング手法の検討, 情報処理学会数理モデル化と問題解決研究会, 北海道, 2011 年 9 月 16 日.
- ⑪ 大塚陽介, 鈴木智也, 決定論的ジャンプ過程の長期予測に適したデータサンプリング手法の検討, 情報処理学会 2010 年全国大会, 東京, 2011 年 3 月 4 日.
- ⑫ 猪瀬悟史, 鈴木智也, 非線形予測誤差に基づいた株式ポートフォリオの構築, 情報処理学会 2010 年全国大会, 東京, 2011 年 3 月 4 日.
- ⑬ 仲田和也, 鈴木智也, バギングを用いた非線形時系列予測のリスク評価, 情報処理学会 2010 年全国大会, 東京, 2011 年 3 月 4 日.
- ⑭ 上岡祐太, 鈴木智也, 山本誠一, 複雑システムの構造推定のためのグレンジャー因果性に基づく閾値決定法, 情報処理学会 2010 年全国大会, 東京, 2011 年 3 月 4 日.
- ⑮ 岡澤政幸, 鈴木智也, 多目的組合せ最適化問題におけるカオスニューラルネットワークの性能評価, 情報処理学会 2010 年全国大会, 東京, 2011 年 3 月 4 日.
- ⑯ 上岡祐太, 鈴木智也, 山本誠一,

カオス結合系の挙動と構造同定手法の関係，日本物理学会 2010 年次大会，新潟，2011 年 3 月 26 日．

- ⑰ 鈴木智也，大塚陽介，決定論的ジャンプ過程のシステム同定と長期予測，日本物理学会 2010 年次大会，新潟，2011 年 3 月 27 日．

[その他]

ホームページアドレス

[http://tsuzuki.ise.ibaraki.ac.jp/TS\\_lab/](http://tsuzuki.ise.ibaraki.ac.jp/TS_lab/)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

鈴木 智也 (SUZUKI TOMOYA)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：70408649