

機関番号：34310

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560428

研究課題名 (和文) フィードバックおよび非線形システムの部分空間同定法に関する研究

研究課題名 (英文) Identification of Feedback and Nonlinear Systems by using Subspace Methods

研究代表者

片山 徹 (KATAYAMA TOHRU)

同志社大学・文化情報学部・客員教授

研究者番号：40026175

研究成果の概要 (和文) : 筆者らが 1996 年に発表した部分空間同定法を利用して, フィードバックシステムに対する新しい同定アルゴリズムを発表し, シミュレーションおよび高圧蒸気コンデンサーの実データを用いた同定実験を行い良好な結果を得た. さらに, LQ 分解法によって複合線形システムの「確率成分」を同定する部分空間法を見出した. これにより, MOESP 法では無視されていた問題に対する解を与えることに成功した. また, 非線形システムの同定法に関しては, Wiener-Hammerstein システムという複雑なシステムに対する逐次的同定法を提案し, 国際会議のベンチマークセッションで発表した.

研究成果の概要 (英文) : Based on the orthogonal decomposition (ORT) method 1996, we have developed a new closed loop subspace identification algorithm under the assumption that measurable disturbances are available, and obtained successful numerical results for both simulated and industrial data. We have also considered an LQ decomposition based subspace identification method for identifying the stochastic part of a combined deterministic stochastic system, showing that the stochastic part is derived by using a single LQ decomposition under the assumption that the past horizon is sufficiently large. This result complements the well-known MOESP method, for which the identification of stochastic part has been ignored for many years. Concerning the identification of nonlinear dynamical systems, a method of identifying Wiener-Hammerstein systems, in which a static nonlinearity is sandwiched by two linear systems, is derived by using a method of alternately identifying Hammerstein system and a linear system, where the data driven local coordinate-based gradient method is used for minimizing output errors. The algorithm and numerical results for the benchmark problem are presented at the special session of SYSID 2009, Saint-Malo.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：システム同定, フィードバックシステム, 非線形システム, 部分空間同定法  
カルマンフィルタ, 非線形フィルタリング

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は確率実現と部分空間同定法の理論を深く追求する立場から、外生入力を受ける確率システムの実現理論と部分空間同定法に関する新しいORT法を提案し、また近年は閉ループ系の同定に関する研究を開始していた。本研究の着想は、ORT法をごみ焼却プラントの同定に適用した研究から生まれた。その研究では、データ収集の過程において閉ループ同定法的前提条件であるテスト信号を加えることが許されず、したがってモデルと実プラントの間には大きな隔りがあり、同定結果は必ずしも満足できるものではなかった。

このため、テスト信号がなくても運転中のデータのみからプラント特性を同定できる方法を開発することの必要性を強く認識することとなり、テスト信号を用いることなく閉ループデータに基づいてプラントを同定する方法に関する予備的な結果を発表した。また、実システムのモデリングという観点からは非線形システムの同定も非常に重要な問題であり、近年HammersteinモデルおよびWienerモデルの同定に関する研究が非常に注目されている。しかし、Ljung (2006) が指摘しているように、非線形要素の出力はパラメータの非常に複雑な非線形関数であり、Wienerモデルやより複雑なWiener・Hammersteinモデルの同定問題はまだ十分には解明されてはいないと考えられる。

## 2. 研究の目的

(1) 研究代表者は確率実現と部分空間同定法の理論を深く追求する立場から、イタリアのパドバ大学 Picci 教授と共同研究を行い、外生入力を受ける確率システムの実現理論と部分空間同定法に関する新しい方法 (ORT法と略記) を提案した。本研究では、テスト信号を用いることなく、システムに加わる外乱を利用して閉ループシステムを同定する方法を開発することを目的とする。基本となる考え方は、ORT法によってフィードバックシステムを「確定フィードバックサブシステム」と「確率フィードバックサブシステム」に分解して、それぞれに部分空間同定法を適用することによって、新しい閉ループ同定アルゴリズムを提案することである。

(2) 非線形モデルの代表である Wiener モデルおよび Wiener・Hammerstein モデルの同定法に関する研究では、線形要素の同定にORT法を適用するとともに、一般化誤差法の考え方に基づいて非線形要素の逆関数を最小2乗法によって同定する精度のよいアルゴリズムを開発することを目的とする。

(3) 非線形システムの状態およびパラメータの推定に関して、とくに非線形力学系を対象とした研究を行ってきた。この方法を、Wienerシ

ステムと Hammerstein システムの同定に応用する研究も行う。

## 3. 研究の方法

(1) フィードバック系の同定に関しては、ORT法によってフィードバックシステムを「確定サブシステム」と「確率サブシステム」に分解して、それぞれを部分空間法によって同定して、それら2つの同定結果を再結合するという方法を考案する。

(2) Wienerモデルの同定に関する研究方法は、非線形要素のパラメータと線形要素を交互に推定する分離最小2乗法を応用する。そのために、非線形要素は Legendre 多項式に基づく基底関数の線形結合で近似する。

(3) 静的非線形要素が2つの動的線形要素で囲まれた Wiener-Hammerstein という複雑な非線形システムを1つの線形システムと1つの Hammerstein モデルが結合したものと捉えて、これらを交互に同定するという方針を採用する。

(4) Hammersteinモデルを近似するのはラゲール多項式がよく用いられるが、ここでは三角多項式を用いる方法を考える。これによって、いままで考えられていなかった入力信号が非線形変換を受けたあとのPE条件について検討する。

(5) 実現法に基づく部分空間同定法における確率成分の同定は未解決のまま10年以上も放置されていたが、この問題にLQ分解が利用できることに気がついたので、問題をさらに掘り下げて考案する。

(6) 非線形フィルタリングにおいて近年注目されている Unscented カルマンフィルタ (UKF) を Wiener モデル、Hammerstein モデルの同定に応用する。

## 4. 研究成果

(1) ORT法によってフィードバックシステムを分解して得られる「確定サブシステム」と「確率サブシステム」、それぞれを部分空間法によって同定して、それらを再結合するための条件を与えることにより、新しい同定法を提案した。これは、現在外国で発表されているフィードバック系の同定法と性能においてほぼ匹敵するものであることをシミュレーションおよび実データを用いた同定実験によって確認した。[論文②, 学会発表⑥]

(2) 線形動的システムの出力端に非線形要素が結合した Wiener モデルの同定に関する研究において、分離最小2乗法を用いた効率のよい方法を提案することに成功した。非線形要素は Legendre 多項式に基づく基底関数

の線形結合で近似して、出力誤差規範を用いて同定問題を定式化した。さらに、データ依存局所座標系 (DDL; Data driven local coordinates) を用いて、線形システムと非線形要素を近似する係数を交互に同定する 2 段階の同定法を提案した。[学会発表⑤]

(3) 静的非線形要素が 2 つの動的線形要素で囲まれた Wiener-Hammerstein という複雑な非線形システムを 1 つの線形システムと 1 つの Hammerstein の結合と考えると、これらを DDLC 表現を用いて状態空間モデルとして表し、2 つのシステムを交互に同定する新しい同定法を提案した。結果は IFAC システム同定シンポジウム SYSID 2009 のベンチマークセッションで採択され、連携研究者が発表した。[学会発表③]

(4) 非線形特性を三角多項式を用いて近似するという方法を用いた Hammerstein モデルの同定法を提案した。ここでは、入力信号が非線形変換を受けたあとの PE (persistent excitation) 条件について新しい知見を得た。[雑誌論文③]

(5) 実現法に基づく部分空間同定法 (Relization-based N4SID) における確率成分の同定は未解決のまま 10 年以上も放置されていた。ここでは、過去のデータ行列の行数 (past horizon) を十分大きくとることで、PO-MOESP 法で用いられるデータ行列に LQ 分解を一回施すことだけで、一般の確率システムの部分空間同定を行うことができることを証明し、さらにシミュレーションによってアルゴリズムの正しさを確認した。これにより、実現法に基づく部分空間同定法を完全なものにすることができた。[雑誌論文①, 学会発表②]

(6) 非線形フィルタリングにおいて近年 Unscented カルマンフィルタ (UKF) が注目されてきたが、Sarkka (2007) は連続・離散 UKF アルゴリズムを提案している。ここでは、この連続・離散 UKF に対する数値アルゴリズムを提案した。すなわち、確率ホイン法を利用して確率微分方程式で記述されるシステムを近似し、時間更新アルゴリズムには確定ホイン法を援用した新しい計算アルゴリズムを提案した。さらにこの方法を利用した連続時間ウィナーモデルの同定について、良好なシミュレーション結果を得た。[学会発表①]

(7) 最近の論文を中心として部分空間同定法に関する研究の動向を述べた。

## 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 T. Katayama, A note on LQ decomposition in stochastic subspace identification, Lecture Notes in Control and Information Science, 査読有, Vol. 398, 2010, pp. 355-364
- ② H. Ase and T. Katayama, A realization-based method for identification of closed-loop systems using measurable disturbance, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 2, No. 1, 2009, pp. 10-19
- ③ 田中秀幸, 葉末俊介, 三角多項式を用いた Hammerstein モデルの同定, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 22, No.1, 2009, pp. 13-20
- ④ 片山 徹, 部分空間同定法の発展, 計測と制御, 査読有, Vol. 47, No.2, 2008, pp. 909-914

[学会発表] (計 6 件)

- ① M. Takeno, T. Katayama, A numerical method for continuous-discrete unscented Kalman filtering, 42<sup>nd</sup> ISICIE Int. Symp. Stochastic Systems Theory and its Applications, 2010 年 11 月 26 日, 岡山理科大学 (岡山)
- ② T. Katayama, Subspace identification of combined deterministic-stochastic systems by LQ decomposition, Proc. 2010 American Control Conference, 2010 年 7 月 1 日, ボルチモア, 米国
- ③ H. Tanaka, A state-space approach to identification of Wiener-Hammerstein benchmark model, Preprints 15<sup>th</sup> IFAC Symposium on System Identification, 2009 年 7 月 7 日, サンマロ, フランス
- ④ H. Tanaka, An indefinite realization algorithm via Riccati difference equation, Preprints 15<sup>th</sup> IFAC Symposium on System Identification, 2009 年 7 月 6 日, サンマロ, フランス
- ⑤ T. Katayama, Identification of Wiener models by separable least-squares, Proc. 40<sup>th</sup> ISICIE Int. Symp. Stochastic Systems Theory and its Applications, 2008 年 11 月 14 日, 京大会館 (京都)
- ⑥ T. Katayama, A new subspace identification method for closed-loop systems using measurable disturbance, Proc. IFAC World Congress, 2008 年 7 月 8 日, ソウル, 韓国

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

片山 徹 (KATAYAMA TOHRU)

同志社大学・文化情報学研究科・客員教授

研究者番号：40026175

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

田中 秀幸 (TANAKA HIDEYUKI)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：90303883