

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560454

研究課題名（和文） 非線形物理モデルの同定法の開発と予測および制御への応用に  
関する研究研究課題名（英文） Study on Identification of Nonlinear Physical Models with  
Applications to Prediction and Control

研究代表者

佐野 昭 (SANO AKIRA)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：10051765

研究成果の概要：

制御対象である非線形物理系を表現するモデルをモデルパラメータに対して線形表現することにより、実時間同定、適応制御、および適応予測を実装する方法論を開発し、モデル化誤差や不確かさに対して系全体のロバスト安定性を補償した適応アルゴリズムの導出、および具体的な対象として、ヒステリシス特性を含む非線形摩擦の存在下の適応位置制御、MR ダンパの非線形補償、OFDM 通信における高出力増幅器の非線形補償、ハマーシュタイン系の非線形補償、ピエゾ素子を用いたアクティブノイズコントロールなどの事例を通して、提案法の有効性を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：適応制御、適応フィードフォワード制御、非線形補償、MR ダンパ、非線形増幅器、アクティブノイズコントロール、ピエゾアクチュエータ

## 1. 研究開始当初の背景

制御対象の物理モデルを構築する場合、モデルパラメータは非線形の形でモデルに含まれることが多い。このため、実時間で物理対象の出力を予測したり、モデルパラメータを適応同定したり、非線形物理モデルを適応制御するといった現実的な要求に応えるこ

とができない状況であった。非線形系へのフィードバック制御の適応化に関しては、理論的には様々な条件のもとで研究が進められているが、得られた制御則の現実の制御対象系への適用は非常に複雑となり、現時点では実時間での実装や実行が難しいことも周知である。

また非線形系のもつ非線形特性を適応フ

フィードフォワード制御により補償するアプローチは、制御分野だけでなく OFDM 通信系やアクティブノイズコントロールなどの信号分野でもニーズが高い課題である。これに対して非線形 Filtered-x アルゴリズムが主に利用されているが、高速で大域的な動作範囲ではしばしば不安定になることが知られている。安定性を保証した新しい適応的な Filtered-x アルゴリズムの開発が望まれる。

物理モデルの未知パラメータを実時間で同定することにより、適応予測や適応制御を容易に実現することにより、モデルの不確かさに対して極めて高いロバスト性を確保したいというニーズは本研究の大きなモチベーションになっている。

## 2. 研究の目的

一般に制御対象の非線形物理モデルは、モデルパラメータを非線形形式で含むため、その実時間同定や適応制御は極めて困難となる。そこで、本研究では、パラメータに関して非線形となる制御対象モデルあるいはフィードフォワード制御器を線形パラメトリック表現で直接記述する方法を開発し、これらのパラメータを実時間で同定するための適応アルゴリズムの導出およびその安定性やロバスト性を保証するための条件を明らかにすることを共通目標とした。

このプロセスの中で、パラメータが非線形に含まれるダイナミクスを線形パラメタライズすることにより生ずるモデル化誤差を評価する必要があり、このモデル化誤差の存在下においても適応アルゴリズムのロバスト安定性を確保するための方法論および系全体の安定性を解析することが重要な目標の一つである。

さらに、非線形系においては、これまで安定性が保証されていない Filtered-x 型適応アルゴリズムが様々な分野で利用されてきたが、しばしば不安定になることが指摘されている。そこで従来型がなぜ不安定になるのか、安定性を保証するにはどのように構成すればよいのかという視点から、安定性を保証した新しい Filtered-x 適応アルゴリズムを導出することその性能解析を行うことも不可欠な課題である。

最後にこれらの適応的なアプローチの有効性や妥当性を具体的な事例を通して検証する。

## 3. 研究の方法

本研究では、未知パラメータを非線形を含む摩擦特性やヒステリシス特性などの非線形ダイナミクスに関して、パラメータについて線形表現したモデルを構築することによ

り、物理モデルの非線形性を実時間でモデル化し適応的に補償するアプローチを開発する。

そのためにまず具体的な非線形物理モデルを採り上げ、パラメータに関する線形モデルの表現方式とその有効性を明らかにする。例えば、非線形摩擦現象を表現する最も一般的なモデルの一つである **General Maxwell-Slip** モデル、**MR** ダンパのような非線形性に関しては、ピストン速度と制御電圧または制御電流から減衰力までの 2 入力 1 出力特性モデル、**OFDM** 通信系などで利用が期待される非線形高出力増幅器のプレディストータのモデル、パラレル・ハマーシュタイン型の非線形ブロック指向モデル、などに関してモデル表現を。これらのモデルのパラメータを実時間で適応同定する手法を開発した。

次に、これらの未知非線形特性を実時間で適応同定することにより、適応的に非線形補償を安定に実行するための適応制御アルゴリズムを開発した。例えば、パラメータ線形化表現により複雑な非線形摩擦特性を簡単に適応補償する方法の開発、**MR** ダンパを含む振動抑制の適応制御アルゴリズムの開発、非線形特性を実時間補償するための適応フィードフォワード制御を安定に実行するための新しい非線形 **Filtered-x** 型適応アルゴリズムの開発、既に線形系に対して開発している仮想誤差法の非線形対象への拡張、などについて考察し、新しい方式を開発した。

次に、未知の非線形対象に対して導出および開発した新しい適応制御方式の有効性を検証するために、提案アルゴリズムによる全体系の安定性解析、新たに開発した非線形 **Filtered-x** アルゴリズムの安定性解析、などについて検討した。

最後に、数値シミュレーションによる検証、および **MR** ダンパを利用した適応セミアクティブ制御実験、さらにピエゾ素子を利用した選択型アクティブノイズコントロール実験を通して検証を行った。

## 4. 研究成果

得られた研究成果は、以下のようにまとめられる。

- (1) **General Maxwell-Slip** モデルに基づく複雑な未知非線形摩擦現象を、速度に関する非線形関数を線形多項式表現することにより実時間で摩擦現象を補償するための適応アルゴリズムを導出し、これを含む位置制御系および速度制御系の全系のロバスト安定性を満たすための条件を明らかにした。さらに数値シミュレーションにより、提案法の有効性や妥当性を検証し、PID 補償との性能比較などにより、提案法の特徴を明らかにした。
- (2) **MR** ダンパは、速度と減衰力との間にヒステリシス特性を持ち、かつ駆動電流あるいは



駆動電圧に関しても飽和特性を持つため、これを線形パラメタライズしたモデルは極めて有用である。本研究では、駆動電流を制御入力とするために、電流駆動モデルを取り上げ、減衰力が電流と速度に対してヒステリシスを含む非線形現象を多項式線形モデルで表現することにより、線形パラメトリックモデルを実時間で構築する方法を開発し、実時間での適応同定の実現をシミュレーションと同定実験により検証し、モデルの妥当性を確認した。さらに、このモデルに基づいた逆モデルの実装により適応補償器を実時間で実装する方法、および適応補償器自体を線形パラメタライズする適応手法の二つのアプローチを提案し、サスペンションシステムのセミアクティブ適応制御の実験を通して、提案法の有効性を検討し、他手法と性能比較を行い、有効性を明らかにした。

(3) MR ダンパの非線形入出力関係を最も簡単に表現するモデルとして、飽和型のメモリレス非線形要素の後に線形伝達関数が接続するモデルを提案した。これにより非線形ヒステリシス特性を表現できる。ここでは、入力をダンパのストロークの変位または速度とし、出力を減衰力とした入出力モデルを考え、非線形部と線形動的系の両者を同定する新しい方法を与えた。ここでは、入力信号のサンプリング間隔よりも出力のサンプリング間隔を小さくとることにより、ブライント同定が可能となることを明らかにし、非線形同定アルゴリズムを開発することに成功し、実際の MR ダンパの同定実験によりその有効性を明らかにした。

(4) OFDM 伝送方式で重要な役割を果たしている高出力非線形増幅器の線形化補償としてプレディストータの設計が重要な課題となっている。本研究では、このモデルをパラレルハマーシュタイン系として表現することにより、プレディストータを実時間で適応的に調整することにより線形化補償を行う新しい適応 Filtered-x アルゴリズムの導出に成功した。通常の Filtered-x アルゴリズムでは、適応フィルタ部分が未知の非線形動的系の前にあるために安定性に保証がなされていないが、提案法では、実際の出力誤差を利用するのではなく、新たに導入した仮想誤差を最小にするような構造を導入することにより、適応フィルタ部分の後にはダイナミクスがない要素がくるように工夫をしている点に大きな特徴があり、安定性が保証されることを明らかにした。この方法は、対象となる非線形要素が未知であっても適応同定と同時に動作させることが可能であり、有用性は極めて高いと思われる。

(5) ピエゾ素子を用いた 2 重窓の選択的な非線形アクティブ騒音制御アルゴリズムを開発し、その有効性を制御実験により明らかに

した。前述した仮想誤差法をフィードバック制御にも拡張することにより 1 次経路に入る未知雑音の影響を補償することができ、さらにドップラー効果により周波数が変動するサイレン音のみを追従しつつ通過させ、不要騒音は除去する選択的な適応フィードフォワード制御を実現することに成功した。実際に 2 重窓を作成し、適応アクティブノイズコントロールを実現し、提案法の有効性を実証した。

以上により、当初の目的であった線形パラメタライズしたモデルに対する適応予測、適応同定、適応フィードフォワード制御および適応フィードバック制御を容易にかつ安定に実現することが可能となった。

## 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. Lianming Sun, Akira Sano, Weitao Sun, Akihiro Kajiwara, "Channel identification and interference compensation for OFDM system in long multi-path environment", *Signal Processing*, Vol. 89, No. 2, pp.1589-1601, 2009 (査読有)
2. Jiandong Wang, Akira Sano, Tongwen Chen and Biao Huang, "Identification of Hammerstein systems without explicit parameterization of nonlinearity", *International Journal of Control*, Vol. 82, No. 5, pp. 937- 952, 2009 (査読有)
3. Itthisek Nilkhamhang, Akira Sano, Tomoaki Mori, "Robust adaptive approach to semi-active control of suspension systems with MR damper", *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 1, No. 1, pp.26-32, 2008 (査読有)
4. Lianming Sun and Akira Sano, "Identification and error analysis in frequency domain", *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 3, No 5, pp. 1201- 1218, 2007 (査読有)

[学会発表] (計 2 2 件) (すべて査読有)

1. Kazuo Mutoh and Akira Sano, "Adaptive control of piecewise linear systems", *Asian Control Conference (ASCC 2009)*, Hong Kong, China, 27-29 August, 2009 (Accepted)
2. Tomohiro Ohno, Akira Sano and Hiromitsu Ohmori, "New simple filtered-x algorithm for parallel Hammerstein systems", *ICASS-SICE 2009*, Fukuoka, Japan, 18-21 August, 2009 (Accepted)
3. Lianming Sun and Akira Sano, "Output over-sampling approach to direct closed-

- loop identification and its performance", Proc. the 15th IFAC Symposium on System Identification (SYSID 09), Saint-Malo, France, 6-8 July, 2009 (Accepted).
4. Itthisek Nilkhamhang and Akira Sano, "Model-based adaptive friction compensation for accurate position control", Proc. IEEE Conf. Decision and Control (CDC 2008), Cancun, Mexico, 9-11 December, 2008.
  5. Tomohiro Ohno and Akira Sano, "Adaptive feedforward control via virtual error approach with applications to parallel Hammerstein systems", Proc. Control 2008, Manchester, UK, 2-4 September, 2008.
  6. Jingmin Xin, Nanning Zheng and Akira Sano, "On-line Detection of the Number of Narrowband Signals with an uniform Linear Array", Proc. EUSIPCO 2008 (16th European Signal Processing Conference), Lausanne, Switzerland, 25-29 August, 2008.
  7. Tomohiro Ohno and Akira Sano, "Virtual error approach to non-linear adaptive filtering for parallel Hammerstein systems", Proc. EUSIPCO 2008 (16th European Signal Processing Conference), Lausanne, Switzerland, 25-29 August, 2008.
  8. Kazuo Mutoh and Akira Sano, "Adaptive control of a class of linear hybrid system", Proc. SICE Annual Conference 2008, Tokyo, Japan, 20-22 August, 2008.
  9. Hiroshi Okamura and Akira Sano, "Adaptive two degree-of-freedom vibration control for flexible plate with piezo-electric patches", Proc. SICE Annual Conference 2008, Tokyo, Japan, 20-22 August, 2008.
  10. Kazumasa Kaneko and Akira Sano, "MUSIC-like iterative DOA estimation in multi-path environment", Proc. SAM 2008 (The 5th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop), Darmstadt, Germany, 21-23 July, 2008.
  11. Jingmin Xin and Akira Sano, "New subspace updating algorithm for adaptive direction estimation and tracking and its statistical analysis", Proc. SAM 2008 (The 5th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop), Darmstadt, Germany, 21-23 July, 2008.
  12. Itthisek Nilkhamhang and Akira Sano, "Direct and indirect stable adaptive control for suspension systems with MR damper", Proc. the 17th IFAC World Congress 2008, pp.4114-4119, Seoul, Korea, 6-11 July, 2008.
  13. Lianming Sun, Akira Sano, "Nonlinear system identification based on local sub-model network", Proc. the 17th IFAC World Congress 2008, pp. 4030-4035., Seoul, Korea, 6-11 July, 2008.
  14. Itthisek Nilkhamhang and Akira Sano, "Stability-assured robust adaptive control of semi-active suspension systems", Proc. ACC 2008 (American Control Conference), Seattle, USA, 11-13 June, 2008.
  15. Tomoaki Mori, Itthisek Nilkhamhang, and Akira Sano, "Adaptive semi-active vibration isolation considering uncertainties of MR damper and suspension structure", CDC 2007 (The 46th IEEE Conference on Decision and Control), New Orleans, USA, 12-14 December 2007.
  16. Tomoaki Mori, Itthisek Nilkhamhang and Akira Sano, "Adaptive semi-active suspension system by linearly parameterized controller", SICE 07, Takamastu, Japan, September 2007.
  17. Lianming Sun and Akira Sano, "Channel identification and application to OFDM communication systems with limited bandwidth", Proc. EUSIPCO 2007 (15th European Signal Processing Conference, Poznan, Poland, 3-7 September 2007.
  18. Tomoaki Mori, Itthisek Nilkhamhang and Akira Sano, "Adaptive semi-active control of suspension system with MR damper", ALCOSP 07 (The 9th IFAC Workshop on Adaption and Learning in Control and Signal Processing), Saint Petersburg, Russia, August 2007.
  19. Jiandong Wang, Akira Sano, Tongwen Chen and Biao Huang, "Blind Hammerstein identification for MR damper modeling", Proc. ACC 2007 (American Control Conference), New York, USA, 11-13 July 2007.
  20. Satoshi Furuki and Akira Sano, "Adaptive semi-active vibration isolation considering uncertainties of MR damper and structure", Proc. ECC 2007 (European Control Conference), Kos, Greece, 2-5 July 2007.
  21. Itthisek Nilkhamhang, Akira Sano, "Friction compensation using robust adaptive control with linearly parameterized GMS model", Proc. ECC 2007 (European Control Conference), Kos, Greece, 2-5 July 2007.
  22. Lianming Sun, Akira Sano, "OFDM receiver for long multi-path interferences via frequency domain identification approach", Proc. SPAWC 2007 (IEEE Int. Workshop on Signal Processing Advances for Wireless Communications), Helsinki, Finland, 17-20 June 2007.



[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

増幅回路及び無線通信装置

発明者：福岡隆 (住友電工)、佐野昭 (慶應義塾大学)

権利者：同上

第 097101872 号 2008 年 1 月 18 日 (国内)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 昭 (SANO AKIRA)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：10051765

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし