

## 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25日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560474

研究課題名（和文）ヒステリシスを含むシステムの高度化制御及びそのナノサーボステージへの応用

研究課題名（英文）Advanced Control for Systems with Hysteresis and Its Application to Nano-Servo-Stage

研究代表者

陳 新開（CHEN XINKAI）

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号：50273347

研究成果の概要（和文）：圧電アクチュエータや超磁歪アクチュエータなどの入出力関係のヒステリシス現象を表現できる数学モデルを提案した。そして、ヒステリシスを入力側に含む線形システムに対し、ロバスト高度化制御則を合成し、閉ループシステムの安定性及び出力誤差を解析した。さらに、超磁歪アクチュエータで駆動するナノサーボステージへ応用し、提案手法の有効性を確認し、ナノサーボステージの高精度位置制御を実現した。

研究成果の概要（英文）：A new hysteresis model which can describes the nonlinear relation between the input and output of the smart material based actuators, such as piezo actuator and magnetostrictive actuator, has been proposed. The advanced control algorithm for the systems preceded by hysteresis has been synthesized. The stability of the closed-loop system is guaranteed and the output tracking error is analyzed. The effectiveness of the proposed algorithm has been demonstrated by the high precision control performance of the nano-stage driven by magnetostrictive actuator.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：ヒステリシス、高度化制御、動的システム、Prandtl-Ishlinskii モデル、Preisach モデル、圧電アクチュエータ、超磁歪アクチュエータ、ナノサーボステージ

## 1. 研究開始当初の背景

ヒステリシス特性に関しては、古くから知られていた。ヒステリシス特性が微分不可能・非線形・時変・未知であるうえ、入力履歴に関係するため、現存のシステム制御理論における重要成果が応用できなく、有効な制御方法が見当たらなかった。従来、制御工学

において、ヒステリシスなどの非線形特性を扱うとき、線形関係として近似化し、システムの解析・設計を進めることが多かった。最近、超磁歪アクチュエータや圧電アクチュエータなどの優れた新型アクチュエータはナノ単位の超精密位置決め機構などの分野に広く応用されている。しかし、これらのアク

チュエータはその動作原理からヒステリシス特性があり、位置決め精度の低下が問題となっていた。特に、これらのアクチュエータは高周波出力が要求される時、その入出力関係（ヒステリシス特性）を表わすモデルは未だ確立されていないため、望ましい高精度な出力を得られなかった。また、これらのアクチュエータが動的制御系に組み込まれた時、望ましい制御効果を得るのは非常に難しかった。

このような超高精度かつ高速な位置制御を実現するため、ヒステリシスを考慮した非線形モデルに基づいて解析・設計をしなければならない。しかし、この問題は最近まで本格的な研究テーマとして、ほとんど取り上げられてこなかった。その主な理由は、従来の制御理論が微分可能なシステムに対して構築されているため、上記のような微分不可能かつ入力履歴に依存する非線形特性を含むシステムに適用できなかった。この問題自身はかなり複雑で高度な数学理論が必要であり、本格的な研究課題として取り上げる研究者が少なかった。

(1) ヒステリシスの出力制御における研究の状況：米国の研究者 S. Tan らが中心になって提案・研究された“適応線形近似逆方法”は、Preisach モデルで表されたヒステリシスの出力を制御するための新しい理論であり、世界の研究者から大変注目されていた。ヒステリシスの近似逆を適応手法によって求め、フィードフォワードにより実際のヒステリシスを補償することにした。しかし、その計算量が非常に膨大で、閉ループシステムの解析が困難であるうえ、制御の精度も保証できない。また、超磁歪アクチュエータへの応用ではこの欠点もはっきり現れた。ここで、もう一つ考えられる原因は Preisach モデルの不完全さにあった。ヒステリシスのモデル化について、米国内をはじめヨーロッパにも徐々に研究者が増えつつあり、制御設計に使えるヒステリシスのモデルを開発する必要があった。

(2) ヒステリシスを含む動的システムのロバスト制御における研究の状況：ヒステリシスを含む動的システムの制御に関して、先駆的な研究は米国の研究者 G. Tao の研究である。この研究において、非常に単純なヒステリシス（バックラッシュ型）に対して、区分線形化手法によってこのヒステリシスを補償できる適応制御則を合成した。しかし、この方法は一般の高度非線形なヒステリシスを含む動的システムの制御に応用できない。以来、一般のヒステリシスを線形近似化せず

に、制御設計に取り組むような方法に関する研究は、国内・国外において、申請者のグループの研究を開始した以外は進んでいなかった。実制御システムにおいて、ヒステリシスの出力が入手不可能であるため、前述のような S. Tan らの“適応線形近似逆方法”はシステムの制御合成に応用できない。申請者らはヒステリシスの Prandtl-Ishlinskii モデルを用いて、その特性を生かして、線形近似化せずにシステムのロバスト制御の合成を試みた。

一方、ナノサーボステージは圧電アクチュエータ（或いは超磁歪アクチュエータ）で駆動されており、ヒステリシスを含む動的システムと見なすことができる。従来、ヒステリシスを測定して、これを補償できる PID 制御則で制御された。しかし、環境変化など予期できない変化がある場合、多値性を持つヒステリシスを補償するのはほぼ不可能であるため、ナノサーボステージの制御精度は保証できなくなり、ロバスト制御は殆ど実現されなかった。よって、ナノサーボステージの応用条件は非常に制限されていた。環境に適応できるロバストかつ更なる高精度なナノサーボステージの開発は重要な課題になっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、ヒステリシスの出力制御及びヒステリシスを入力側を含む動的システムのロバスト制御について考察し、そのナノサーボステージへの応用を研究した。

**研究課題 1**（ヒステリシスの出力制御）：ヒステリシスの出力を目標信号に追従させるように、ロバスト非線形適応制御入力法の構成法を検討する。

**研究課題 2**（ヒステリシスを含む動的システムのロバスト制御）：ヒステリシスを入力側を含む線形システムに対して、そのロバスト制御手法を開発する。

**研究課題 3**（一般的なシステムへの拡張）：さらに研究課題 2 を外乱などの未知な要素を含む多入出力線形システムへ拡張する。

**研究課題 4**（応用）：超磁歪アクチュエータで駆動された超高精度位置決め装置ナノサーボステージの高度化制御へ応用する。

## 3. 研究の方法

### 研究課題 1 について

(a) 従来のヒステリシスの Prandtl-Ishlinskii モデル及び Preisach モデルを参考し、圧電/超磁歪アクチュエータの入出力関係のヒステリシス現象及びその遷移をよ

り精確に表現できるような数学モデルを提案した。具体的には、入力に関する記憶要素 (Stop Operator を参考する) を開発し、密度関数 (一般に未知で、外部および内部の環境に依存) を導入し、密度関数および記憶要素の累積によって、圧電/超磁歪アクチュエータの入出力特徴 (ヒステリシス) を表す新型モデル (密度関数と記憶要素の累積の区分ダイナミクス) を提案した。

(b) 得られた新型モデルに基づき、非線形適応法を導入し、ダイナミクスのパラメータ及びヒステリシスの密度関数をオンライン的に推定した。そして、ヒステリシスの出力を目標信号に追従させるように、制御入力の構成法を検討し、閉ループシステムの安定性及び出力誤差を解析した。

(c) 計算機シミュレーション及び圧電/超磁歪アクチュエータの実験により、提案した圧電/超磁歪アクチュエータのモデルの合理性 (物理的かつ現象的) を確認し、さらに考案した圧電/超磁歪アクチュエータの出力制御法を検証した。そして、従来の制御法と比較し、本研究で提案した新しい手法の汎用性・精度・ロバスト性を確認し、その長所・短所を明らかにした。

#### 研究課題 2 について

(a) 簡単のため、次のような入力側にヒステリシスを含むシステムを考察した。

$$P(s)y(t) = k_p Z(s)w(t) \quad (1)$$

$$w(t) = H[v](t) \quad (2)$$

ここで、 $y(t)$  と  $v(t)$  がそれぞれ制御システムの出力と入力で、 $H[\cdot]$  はヒステリシスオペレータである。 $w(t)$  はヒステリシスの出力であり、線形システムの入力でもある。 $P(s)$  と  $Z(s)$  は  $s$  の monic 多項式で、そのパラメータは全て未知である。 $k_p \neq 0$  は未知なゲインである。

(b) 本研究では、提案したヒステリシスのモデルを用いて、線形システム (1) とヒステリシスのダイナミクスを併せて一つの複雑なシステムとして取り扱った。適応アルゴリズムを提案し、複雑なシステムのパラメータ及びヒステリシスの密度関数をオンライン的に推定した。そして、これらの推定に基づき、システムの出力誤差は設計パラメータによって高精度で制御できるようなロバスト制御則を合成した。それから、閉ループシステムの安定性を解析した。さらに、計算機シミュレーションを行い、提案した制御法の有効性を検証し、パラメータの選択基準などを明らかにした。

#### 研究課題 3 について

(a) 実用化するために、得られたヒステリシスを入力側に含む線形システムの制御法をより一般的なシステムへ拡張した。制御されるシステムが外乱など (外乱、モデル化できない要素等) を含む線形システムとして考察した (式(1)の右側に外乱やモデル化できない要素などを表す変量  $v(t)$  を加えた)。

(b) 研究課題 2 で提案された非線形適応制御法に可変構造理論の発想を加え、ヒステリシス及び外乱を含む未知の線形システムのロバスト非線形制御法を提案した。

(c) 得られたロバスト制御法を単軸ナノサーボステージへ応用し、外乱などを考慮しない方法の実験結果と比較し、制御性能の改善を実験によって確認した。

(d) (b) で得られた理論成果を、ヒステリシスを入力側に含む未知の多入出力線形システムへ拡張し、ロバスト非線形制御法を開発した。

#### 研究課題 4 について

(a) 単軸ナノサーボステージを下記のようにモデル化した。

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) = H[v](t) \quad (3)$$

ここで、 $x(t)$  が変位、 $v(t)$  が超磁歪アクチュエータへの入力電流、 $m$  が質量、 $b$  が摩擦係数、 $k$  がバネ係数である。研究課題 3 で得られた成果を単軸ナノサーボステージへ応用し、まず、計算機シミュレーションを行い、コントローラの最適パラメータを大まかに選定した。そして、実験を行い、外部条件を変えながら、提案手法の有効性・ロバスト性・実用性を確認した。

(b) XY 軸ナノサーボステージのモデルを定式化した (式(3)を参照)。研究課題 3 で得られたヒステリシスを入力側に含む未知の多入出力システムのロバスト制御法を超磁歪アクチュエータで駆動された XY 軸ナノサーボステージに応用した。まず、計算機シミュレーションを行い、コントローラの最適パラメータを選定した。そして、外部条件を変えながら、実験により提案手法のロバスト性、実用性および有効性を確認した。さらに、従来の PID 法と比較し、提案手法の利点・欠点を明らかにした。

#### 4. 研究成果

圧電アクチュエータや超磁歪アクチュエータなどの入出力関係のヒステリシス現象及びその遷移をより精確に表現できるような数学モデルを提案した。圧電/超磁歪アクチュエータの実験により、提案したモデルの

合理性及び実用性を確認した。

ヒステリシスを入力側に含む線形システムに対して、そのロバスト高度化制御手法を考案した。ここで、提案したヒステリシスのモデルを用いて、線形システムとヒステリシスのダイナミクスを併せて一つの複雑なシステムとして取り扱うことにした。適応アルゴリズムを提案し、複雑なシステムのパラメータ及びヒステリシスの密度関数をオンライン的に推定したうえ、システムの出力誤差が設計パラメータによって制御できるような適応制御則を合成した。計算機シミュレーションを行い、提案した制御法の有効性を検証し、パラメータの選択基準などを明らかにした。

実用化するために、より一般的なシステム(外乱、モデル化できない要素等を含む未知の多入出力線形システム)へ拡張した。理論の厳密性や計算機によってリアルタイム処理の可能性などの視点から改良し、計算機シミュレーションにより、改良手法の妥当性や実用性などを確認し、各設計パラメータの選択基準に関するガイドラインを作成した。

単軸ナノサーボステージ及びXYナノサーボステージを製作した。これらのステージはヒステリシスを入力側に含む動的システムと見なすことができるため、提案した制御手法をステージの高精度位置制御に応用した。外部条件を変えながら、実験によって、提案手法の有効性・ロバスト性・実用性を確認し、提案手法の利点・欠点を明らかにし、より望ましい制御応答を得られた。環境に適応できたロバストかつ高精度なナノサーボステージを実現した。

#### 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5件)

- 1) X. Chen and T. Ozaki, "Adaptive control for plants in the presence of actuator and sensor uncertain hysteresis," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 査読有, vol. 56, no. 1, 2011, pp. 171-177.  
DOI: 10.1109/TAC.2010.2084151
- 2) X. Chen, T. Hisayama, and C.-Y. Su, "Adaptive control for uncertain continuous-time systems using implicit inversion of Prandtl-Ishlinskii hysteresis representation," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 査読有, vol. 55, no. 10, 2010, pp. 2357-2363.  
DOI: 10.1109/TAC.2010.2053737
- 3) X. Chen, T. Hisayama, and C.-Y. Su,

"Pseudo-inverse-based adaptive control for uncertain discrete time systems preceded by hysteresis and disturbances," *Automatica*, 査読有, vol. 45, no. 2, 2009, pp. 469-476.  
DOI: 10.1016/j.automatica.2008.08.004

- 4) C.-Y. Su, Y. Feng, H. Hong, and X. Chen, "Adaptive control of system involving complex hysteretic nonlinearities: A generalized Prandtl-Ishlinskii modelling approach," *International Journal of Control*, 査読有, vol. 82, no. 10, 2009, pp. 1786-1793.  
DOI: 10.1080/00207170902736307
- 5) 陳 新開, メカトロ系におけるヒステリシスのモデリングおよびその制御設計への応用, 計測と制御, 査読有, vol. 49, no. 10, 2010, pp. 444-450.

[学会発表] (計19件)

- 1) X. Chen, Y. Feng and C.-Y. Su, "Adaptive control for continuous-time systems in the presence of actuator and sensor hysteresis," *Proc. 50th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2011)* (Orlando, USA), December 12-15, 2011.
- 2) X. Chen, C.-Y. Su and T. Fukuda, "Advanced adaptive control for piezo-actuated nano-positioner," *Proc. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011)* (Melbourne, Australia), November 7-10, 2011.
- 3) X. Chen, Y. Feng and C.-Y. Su, "Advanced control for the XY-table driven by piezo-actuators," *Proc. 18th IFAC World Congress (IFAC 2011)* (Milan, Italy), August 28 - September 2, 2011.
- 4) X. Chen, "High precision adaptive control for XY-table driven by piezo-actuator," *Proc. 2011 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2011)* (Zhengzhou, China), August 11-13, 2011.
- 5) X. Chen and M. Hattori, "Adaptive control for piezo-actuated XY-table," *Proc. 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (IEEE ICMA 2011)* (Beijing, China), August 7-10, 2011.
- 6) X. Chen, "High precision control for nano-positioner actuated by smart materials," *Proc. 2011 Chinese Control Conference (CCC 2011)* (Yantai, China), July 22-24, 2011.
- 7) X. Chen and T. Ozaki, "High precision adaptive control for piezo-actuated stage," *Proc. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2010)* (Tianjin, China), December 14-18, 2010.
- 8) X. Chen and C.-Y. Su, "Advanced control for nano-positioner driven by piezo actuator,"

- Proc. 6th International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES'10)* (Cairo, Egypt), #114, November 30-December 1, 2010.
- 9) T. Ozaki and X. Chen, "Adaptive high precision control for piezo-actuated nano-positioner," *Proc. 2010 IEEE International Symposium on Intelligent Control (IEEE ISIC2010)* (Yokohama, Japan), # FrC02-2, September 8-10, 2010.
- 10) X. Chen, "Adaptive control for systems preceded by hysteresis represented by Preisach model," *Proc. 10th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP 2010)* (Antalya, Turkey), #Th2A-03, August 26-28, 2010.
- 11) T. Ozaki and X. Chen, "High precision control of the piezo-actuated stage," *Proc. 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control*, (Okayama, Japan), #SatP05-03, July 17-19, 2010.
- 12) X. Chen and T. Ozaki, "Adaptive control for plants in the presence of actuator and sensor hysteresis nonlinearities," *IEEE Conference on Decision and Control (IEEE CDC)* (Shanghai, China), #1413, December 16-18, 2009.
- 13) X. Chen and T. Ozaki, "Control for systems in the presence of actuator and sensor hysteresis," *Proc. IEEE Africon* (Nairobi, Kenya), #146, September 23-25, 2009.
- 14) X. Chen, "High precision control for piezo-actuated positioners," *Proc. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (IEEE ICMA)* (Changchun, China), August 9-12, 2009.
- 15) 尾崎, 陳, 単軸ポジショナの適応制御, 第 43 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 北海道大学, 2011 年 3 月 1 日.
- 16) 袖野, 尾崎, 陳, 2 次元ナノポジショナの高精度制御, 第 43 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 北海道大学, 2011 年 3 月 1 日.
- 17) 袖野, 尾崎, 陳, 圧電アクチュエータで駆動される XY テーブルの高精度制御, 計測自動制御学会 2010 年度産業部門大会, 東京工業大学, 2010 年 11 月 9 日.
- 18) 尾崎, 陳, 圧電アクチュエータで駆動される単軸ポジショナの高精度制御, 第 53 回自動制御連合講演会, 高知城ホール, 2010 年 11 月 4 日.
- 19) 大島, 陳, Preisach モデルで表すヒステリシスを含むシステムの制御, 第 40 回制御理論シンポジウム, 大阪ホテルコスモスクエア, 2011 年 9 月 26 日.

〔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 :  
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

陳 新開 (CHEN XINKAI)  
芝浦工業大学・システム理工学部・教授  
研究者番号 : 5 0 2 7 3 3 4 7

### (2) 研究分担者 ( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者 ( )

研究者番号 :