

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 4 月 8 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560553

研究課題名(和文)非対称・速度依存型ヒステリシスのモデリング・高精度制御及びその応用

研究課題名(英文)Modelling and high precision control for asymmetric rate-dependent hysteresis and their applications

研究代表者

陳 新開 (CHEN, XINKAI)

芝浦工業大学・システム工学部・教授

研究者番号：50273347

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において、まず、非対称・速度依存型ヒステリシスの制御設計に利用できるような新型モデルを提案した。そして、ヒステリシスの近似逆を求めずに、その出力を制御する非線形適応法を提案し、超磁歪アクチュエータの高周波出力追跡制御へ応用し、その高精度制御を実現した。それから、ヒステリシスの非線形特性を生かし、非対称・速度依存型ヒステリシスを含む動的システムのグローバルなロバスト非線形制御法を設計した。さらに、本研究で開発した非線形適応制御法を超高精度位置決め装置ナノポジショナへ応用し、更なる高精度かつ高適応性を実現した。

研究成果の概要(英文)：In this project, a new mathematical model which can be used in the control design for the asymmetric rate-dependent hysteresis has been proposed. The nonlinear adaptive control method for the hysteresis without appealing to "approximate inversion" has been synthesized and applied to magnetstrictive actuators to achieve high precision performance. Then, the nonlinear control law for dynamical systems preceded by asymmetric rate-dependent hysteresis has been proposed and applied to the nano-positioners driven by magnetstrictive actuators to realize high precision and high adaptation requirements.

研究分野：制御工学

キーワード：ヒステリシス スマートマテリアル 高精度制御 超磁歪アクチュエータ 圧電アクチュエータ IPMC

### 1. 研究開始当初の背景

スマートマテリアルは次世代の“知能材料”として、医療、福祉、航空、宇宙、ロボット、精密加工、自動車などあらゆる分野に広く応用される見込みがあった。特に、最近、圧電材料、磁歪材料、形状記憶合金、IPMCなどのスマートマテリアルを用い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に利用されていることが国内外において大変注目されていた。しかし、これらのスマートマテリアルはその動作原理からヒステリシス特性があるため、位置決め精度の低下は問題となった。ヒステリシス特性が微分不可能・非線形・時変であるうえ、入力履歴にも関係する。スマートマテリアルの入出力関係に存在するヒステリシス現象はさらに顕著な飽和性を持ち、負荷・温度などの外部条件にも敏感に依存する。特に、超磁歪アクチュエータや形状記憶合金アクチュエータなどの入出力関係にあるヒステリシスは非対称であるうえ、入力の変化率にも依存する(いわゆる“rate-dependent(速度依存)”特性で)。この非対称・速度依存型ヒステリシスにおいて、制御設計に利用できるような数式モデルは未だ確立されていなかったため、上記のアクチュエータの高精度出力が実現できていなかった。高精度制御を実現するために、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い。最近、この問題の重要性が改めて認識され、徐々に研究者が増えつつあり、本格的な研究は緒についたばかりであった。

(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 X. Tan らが中心になって提案・研究されてきた“適応線形近似逆方法”は、Preisach モデルで表す対称・速度不依存(rate-independent)型ヒステリシスに対し、そ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補償する手法であった。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かった。また、超磁歪アクチュエータへの応用ではこの欠点のはっきり現れていた。

(2)ヒステリシスを含む動的システムの高度化制御における研究の状況：従来、ヒステリシスを測定し、これを補償する手法で制御されていた。しかし、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ことがほぼ不可能であるため、ナノポジション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できていなかった。環境に適應できるロバスト的かつ高精度なナノポジションの開発は重要な課題になっていた。ま

た、このような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 X. 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かった。一方、報告者らは Prandtl-Ishlinskii モデルで表す対称・速度不依存型ヒステリシスに対し、その特性を生かし、ヒステリシスを含む動的システムのロバスト制御則を合成し、圧電アクチュエータで駆動するナノステージへの応用を試みた。ヒステリシスの線形近似逆を求めずに、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、申請者の研究以外は進んでいなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、スマートマテリアルを用いたアクチュエータに存在する非対称・速度依存型ヒステリシスについて考察し、その数式モデル、同定方法及び制御手法を提案することであり、さらに、超磁歪アクチュエータの高精度出力制御及び超磁歪アクチュエータで駆動するナノポジションの高精度位置決め制御を実現することである。具体的には、以下の課題を明らかにする。

- (1)非対称・速度依存型ヒステリシスの特性について研究し、その数式モデルを構築し、オンライン同定アルゴリズムを提案する。
- (2)非対称・速度依存型ヒステリシスのオンライン適応制御手法を提案し、超磁歪アクチュエータの高周波出力制御へ応用する。
- (3)非対称・速度依存型ヒステリシスを含む動的システムの適応制御則を提案する。特に、モデルの不確かさを持つ動的システムに対し、そのロバスト制御則を考察する。
- (4)超磁歪アクチュエータで駆動するナノポジションの高精度位置決め制御を実現する。

### 3. 研究の方法

まず、研究課題(1)(2)について、以下のように取り込んできた。

(1)超磁歪アクチュエータの位置決め実験システムを構築した。

(2)従来のヒステリシスのモデルを参考し、非対称・速度依存型ヒステリシス現象及びその遷移を表現できるような数学モデルを提案した。具体的には、リレー及び Stop Operator を参考し、入力に関する非対称記憶要素を開発した。そして、外部及び内部の環境に依存する密度関数を導入し、密度関数及び記憶要素の累積によって非対称・速度依存型ヒステリシスを表す新型モデルを提案した。ここで、オンライン同定できるように、ヒステリシスを表すモデルはパラメータによって特徴づける必要があった。また、複雑な非対称ヒステリシスをモデル化する時、パラメータの分離・非干渉化などを工夫し、パラメータの唯一性を確保する必要があった。それから、超磁歪アクチュエータの実験によって提案したモデルの(物理的かつ現象的)正確性及び合理性を確認した。最後に、圧電

アクチュエータを用いて、提案モデルの速度依存性質を違う側面から検証した。

(3) non-smooth 切り替え多様体を導入することにより、非対称・速度依存型ヒステリシスのオンライン non-smooth 逐次最適同定法を開発し、その収束性を検証した。そして、超磁歪アクチュエータの実験によって提案した同定法の有効性を確認した。また、圧電アクチュエータを用いて、提案した同定法の有効性を違う側面から検証した。

(4)構築された新型モデルに基づき、非線形適応法を導入し、ダイナミッ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、モデルの不確かさを対処できるようなロバスト適応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。

(5)計算機シミュレーションを行い、提案したロバスト適応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。ここで、同定した超磁歪アクチュエータのモデルを用いて、シミュレーションを行った。

(6)提案した制御手法を超磁歪アクチュエータの制御へ応用し、その高精度出力制御を実現した。ここで、シミュレーションで得られたパラメータの選択基準を踏まえて、制御パラメータを選定した。そして、従来の制御法と比較し、本研究で提案した新しい制御手法の精度・ロバスト性を検証した。さらに、圧電アクチュエータの制御にも応用し、提案手法の汎用性・長所・短所を明らかにした。

それから、研究課題(3)(4)を以下のように取り込んできた。

(1)簡単のため、入力側にヒステリシスを含む動的システムを考察した

(2)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ッ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、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。

(3)超磁歪アクチュエータで駆動する高精度位置決め装置ナノポジションナを作り上げた。

(4)ナノポジションナの数学モデルを提案した。

(5)得られた理論成果をナノポジションナへ応用した。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。さらに、提案手法の利点・欠点を明らかにし、実応用を目指して

調整し、より望ましい制御応答を得られるように工夫した。

#### 4. 研究成果

本研究において、以下の主な結果を得ることができた。

(1)非対称・速度依存型ヒステリシスの制御設計に利用できるような新型モデルを提案した。

(2)ヒステリシスの近似逆を求めずに、その出力を高精度で制御する非線形適応法を提案した。特に、超磁歪アクチュエータの高周波出力追跡制御に対して、その高度化制御手法を開発した。

(3)ヒステリシスの非線形特性を生かし、非対称・速度依存型ヒステリシスを含む動的システムのグローバルなロバスト非線形制御法を設計した。

(4)超高精度位置決め装置ナノポジションナの制御に関して、本研究で開発する非線形適応制御法の応用により、更なる高精度かつ高適応性を実現した。

理論面において、本研究は「ヒステリシスを含むシステムの制御」という難問を何処まで解決できるか、またシステム制御理論をどの程度拡張できるか、という興味深い研究である。

応用面において、本研究の目的を達成することにより、各種超高精密微動位置決め装置の性能をさらに向上でき、それから、医療分野・生物分野において対象物の微小化に伴い微小対象物の操作・加工・組立といった微細作業手法を行うマイクロマニピュレータの高精度制御へ拡張でき、バイオテクノロジー・ナノテクノロジーなどの分野においてより高質な成果が得られるように期待できる。また、優れた特性を持つスマート材料を生かす応用領域がより広くなることが期待できる。

#### 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12件)

X. Chen, Y. Feng, and C.-Y. Su, "Adaptive control for continuous-time systems with actuator and sensor hysteresis," *Automatica*, 査読有, vol. 64, pp. 196-207, 2016. DOI:10.1016/j.automatica.2015.11.009

X. Chen and C.Y. Su, "Adaptive control for ionic polymer-metal composite actuators," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 査読有, vol. 46, 2016. DOI: 10.1109/TSMC.2016.2523921

X. Zhang, C.-Y. Su and X. Chen, "Robust adaptive neural control for a class of time-varying delay systems with hysteresis input," *Asian Journal of Control*, 査読有,

2016 (to appear, accepted).  
DOI: 10.1002/asjc.1182  
T. V. Minh and X. Chen, "Precision tracking control for piezoelectric actuator using pseudo discrete-time Bouc-Wen model," *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, 査読有, vol. 6, no.4, pp. 157-165, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1504/IJAMECHS.2015.072704>  
X. Chen, "A nonlinear exact disturbance observer inspired by sliding mode techniques," *Mathematical Problems in Engineering*, 査読有, vol. 2015, Article ID 651601, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1155/2015/651601>  
Y. Zhang, T. Chai, J. Sun, X. Chen, and H. Wang, "A novel estimation algorithm based on data and low-order models for virtual unmodeled dynamics," *IEEE Transactions on Neural networks and Learning Systems*, 査読有, vol. 25, no. 12, pp. 2156-2166, 2014.  
DOI: 10.1109/TNNLS.2014.2306002  
Z. Li, C.-Y. Su and X. Chen, "Modeling and inverse adaptive control of asymmetric hysteresis systems with applications to magnetostrictive actuator," *Control Engineering Practice*, 査読有, vol. 33, pp. 148-160, 2014.  
DOI: 10.1016/j.conengprac.2014.09.004  
Z. Li, C.-Y. Su, X. Chen, and S. Liu, "Prescribed adaptive control of unknown hysteresis in smart material actuated systems," *Production & Manufacturing Research*, 査読有, vol. 2, no. 1, pp. 712-724, 2014.  
DOI: 10.1080/21693277.2014.892443  
Y.-H. Liu, Y. Feng and X. Chen, "Robust adaptive dynamic surface control for a class of nonlinear dynamical systems with unknown hysteresis," *Abstract and Applied Analysis*, 査読有, Article ID 640249, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/640249>  
Y. Zhang, T. Chai, H. Wang, X. Chen, and C.-Y. Su, "An improved estimation method for unmodeled dynamics based on ANFIS and its application to controller design," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 査読有, vol. 21, no. 6, 989-1005, 2013.  
DOI: 10.1109/TFUZZ.2012.2236889  
X. Chen, "High precision adaptive control for piezo-actuated stage," *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, 査読有, vol. 4, No. 3/4, pp.197 - 204, 2012.  
<http://dx.doi.org/10.1504/IJAMECHS.2012.051564>  
J. Ding, T. Chai, H. Wang, and X. Chen, "Knowledge-based plant-wide dynamic operation of mineral processing under

uncertainty," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 査読有, vol. 8, no. 4, pp. 849 - 859, 2012.  
DOI: 10.1109/TII.2012.2205394

[学会発表](計 32 件)

(1) 国際会議

Y. Zhang, T. Chai and X. Chen, "A new control scheme for a class of nonaffine nonlinear input output discrete-time systems," *The 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2015)*, Kobe, Japan, December 15-18, 2015.

A. Yonenaga and X. Chen, "Robust control for magnetostrictive actuators," *The 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (ISCIE SSS 2015)*, Honolulu, Hawaii, USA, December 5-8, 2015.

N. M. Linh, T. V. Minh and X. Chen, "Precise tracking control for piezo-actuated stage using inverse compensation and model predictive control," *2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMECHS 2015)*, Beijing, China, August 21-25, 2015.

X. Zhang, S. Wen, D. Wang and X. Chen, "SVM based adaptive output following control for a networked cooling process," *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (IEEE ICMA 2015)*, Beijing, China, August 2-5, 2015.

T. V. Minh, N. M. Linh and X. Chen, "Tracking control of piezoelectric actuator using adaptive model," *International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR 2015)*, Changsha, China, June 25-27, 2015.

X. Chen, S. Wen, D. Wang and C.-Y. Su, "Adaptive control for micro/nano positioning system driven by piezo electric actuator," *The 24th IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2015)*, Búzios, Rio De Janeiro, Brazil, June 3-5, 2015.

M.V. Tran and X. Chen, "Adaptive control for piezoelectric actuator using discrete-time Bouc-Wen model," *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2014)* (Bali, Indonesia), December 5-10, 2014.

X. Chen, "Adaptive control for ionic polymer-metal composite actuator based on continuous-time approach," *19th IFAC World Congress (IFAC 2014)* (Cape Town, South Africa), August 24-29, 2014.

X. Chen, and C.-Y. Su, "Control design for ionic polymer-metal composite based actuators," *2014 IEEE International*

Conference on Information and Automation (ICIA 2014) in conjunction with 2014 IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL 2014) (Hailaer, China), July 26-28, 2014.

X. Chen and H. Kano, "Modelling and control for ionic polymer-metal composite actuators," *11th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2014)* (Shenyang, China), June 29-July 4, 2014.

X. Chen, Y. Feng and C.-Y. Su, "Adaptive control for magnetostrictive actuated nano-positioner," *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2013)* (Shenzhen, China), December 12-14, 2013.

X. Chen, "Control for unknown linear systems preceded by hysteresis represented by Preisach model," *IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2013)* (Florence, Italy), December 10-13, 2013.

Z. Li, C.-Y. Su, X. Chen and T. Chai, "Prescribed adaptive control of nonlinear system with unknown Bouc-Wen model," *IEEE Conference on Decision and Control (CDC 2013)* (Florence, Italy), December 10-13, 2013

X. Chen and C.-Y. Su, "High precision control for nano-stage driven by magnetostrictive actuator," *Int. Conference on Intelligent Robotics and Applications* (Busan Korean), September 25-28, 2013.

X. Chen, "Control for unknown systems preceded by hysteresis and its application to nanopositioner," *International Conference on Advanced Mechatronic Systems* (Luoyang, China), September 25-27, 2013.

X. Chen, "Advanced control for magnetostrictive actuated nano-stage," *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (Takamatsu, Japan), August 5-8, 2013.

X. Chen, "High precision control for piezo-actuated XY-table," *Proc. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2012)* (Guangzhou, China), December 11-14, 2012.

X. Chen, "Advanced high precision control for XY-table," *5<sup>th</sup> Int. Conference on Intelligent Robotics and Applications* (Montreal, Canada), October 3-5, 2012.

R. Oshima and X. Chen, "Adaptive control for uncertain systems in the presence of actuator and sensor hysteresis represented by Prandtl-Ishlinskii Model," *International Conference on Advanced Mechatronic Systems* (Tokyo, Japan), September 18-21, 2012.

X. Chen and N. Nagaya, "Adaptive control

for piezo-actuated stage based on continuous-time approach," *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (Chengdu, China ), August 5-8, 2012.

## (2) 国内会議

長嶋、陳、狩野、IPMCアクチュエータのロバスト位置制御、第48回計測自動制御学会北海道支部学術講演会、北海道大学、2016年3月1日。

内野、陳、超磁歪アクチュエータの同定及び制御、第48回計測自動制御学会北海道支部学術講演会、北海道大学、2016年3月1日。

居島、陳、圧電アクチュエータで駆動されるステージの適応制御、第48回計測自動制御学会北海道支部学術講演会、北海道大学、2016年3月1日。

M. Hanif and X. Chen, Simulation analysis of differential equation based rate independent hysteresis operator、第48回計測自動制御学会北海道支部学術講演会、北海道大学、2016年2月29日。

米永、陳、超磁歪アクチュエータの広帯域におけるロバスト制御、第58回自動制御連合講演会、神戸大学、2015年11月15日。

関本、陳、圧電アクチュエータで駆動されるナノポジションの広帯域における高度化制御、第58回自動制御連合講演会、神戸大学、2015年11月15日。

竹内、陳、"IPMCアクチュエータの適応制御、"第47回計測自動制御学会北海道支部学術講演会資料、北海道大学、2015年3月9日。

飯塚、陳、超磁歪アクチュエータのモデリング同定、第47回計測自動制御学会北海道支部学術講演会資料、北海道大学、2015年3月9日。

竹内、陳、IPMCアクチュエータのモデリング及びその適応制御、第57回自動制御連合講演会、群馬伊香保 ホテル天坊、2014年11月11日。

大島、陳、ヒステリシス現象を含むシステムの適応制御、第55回自動制御連合講演会、京都大学、2012年11月18日。

服部、陳、XYテーブルの高精度制御、第55回自動制御連合講演会、京都大学、2012年11月18日。

長谷、陳、圧電アクチュエータで駆動するステージの高精度制御、第55回自動制御連合講演会、京都大学、2012年11月18日。

## 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：50273347