

平成 30 年 5 月 16 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06152

研究課題名(和文) 入出力関係に単調性を有しないヒステリシスのモデリング・高度化制御及びその応用

研究課題名(英文) Modelling and advanced control for non-monotonic hysteresis and their applications

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において、入出力関係に単調性を有しない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した。そして、提案した手法を導電性高分子アクチュエータと超磁歪アクチュエータの出力制御に応用し、その高精度制御を実現した。さらに、超磁歪アクチュエータで駆動するナノポジションナの高周波位置決め高精度制御を実現した。

研究成果の概要(英文)：This research discusses the modelling and control problems for the non-monotonic hysteresis and the related applications. Firstly, the model, identification algorithm and control strategy for non-monotonic hysteresis have been proposed. Then, the high precision control for IPMC (Ionic Polymer Metal Composite) and magnetostrictive actuator has been fulfilled. Finally, high precision position control in high frequency domain for positioners driven by magnetostrictive actuator has been achieved.

研究分野：制御工学

キーワード：スマートマテリアル ヒステリシス 高精度制御 ナノテクノロジー バイオテクノロジー

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る。特に、最近、圧電材料、磁歪材料、形状記憶合金、導電性高分子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国内外において大変注目されている。しかし、スマートマテリアルの動作原理からヒステリシス特性があるため、これらのアクチュエータの高度化制御は非常に困難であった。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。さらに、スマートマテリアルに存在するヒステリシス現象は非常に複雑で、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。導電性高分子アクチュエータの入出力関係において、従来のアクチュエータのような単調関係がなく、出力の特性が入力の変化率及び振幅に依存する。超磁歪アクチュエータにおいても、比較的高周波入力が印加される時、入出力の単調関係がなくなり、出力の特性が入力の変化率及び振幅に依存する(圧電アクチュエータでも同じ現象が見られる)。この単調性を有しない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いため、上記のような性質を持つアクチュエータの高精度出力制御が実現されていなかった。

(1) ヒステリシスの同定・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、単調性を有する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。申請者は静的ヒステリシスのモデリング・制御手法を考案したうえ、非対称・速度依存型ヒステリシスのモデリング・制御手法について考案し、幾つかの結果を得ることができた。しかし、これらの提案手法は単調性を有しないヒステリシスの出力制御に応用できなかった。

(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：スマートマテリアルを用いた新型アクチュエータで駆動するナノポジショナは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。このようなシステムにおいて、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のはほぼ不可能であるため、ナノポジショナのロボスト制御及び高周波制御は殆ど実現されていなかった。また、このような実制御システムにおいて、アクチュエータ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。申請者らは単調性を有するヒステリシスに対し、その非線形特性を生かし、ヒステリシスの線形近似逆を求めず、ヒステリシスを含む動的システムのロボスト適応制御則を合成した。このような線形近似逆を求めず、制御設計に取り組む方法は、国内・国外において、申請者の研究以外では進んでいなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、入出力関係に単調性を有しない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、導電性高分子アクチュエータと超磁歪アクチュエータの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ナの高周波位置決め高精度制御を実現することである。具体的には、以下の研究課題を明らかにする。

研究課題(1)：単調性を有しない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。

研究課題(2)：単調性を有しないヒステリシスのオンラインロボスト適応制御法を提案し、導電性高分子アクチュエータの出力制御及び超磁歪アクチュエータの高周波出力制御へ応用する。

研究課題(3)：単調性を有しないヒステリシスを入力側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、そのロボスト制御則を考察する。

研究課題(4)：超磁歪アクチュエータで駆動するナノポジショナの高周波位置決め制御を実現する。

3. 研究の方法

まず、研究課題(1)について、以下のように取り込んできた。

(a) 導電性高分子アクチュエータ(人工筋肉)、レーザーセンサ、ホストコンピュータ、アナログ入出力ボードなどを購入し、人工筋肉実験ステージを特注し、人工筋肉実験システムを作り上げた。

(b) 申請者の従来の研究成果を踏まえて、リレーや Stop Operator などを参考し、入力に関する non-smooth 型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開発し、密度関数と記憶要素の累積によってヒステリシスを表す静的モデルを提案した。それから、入出力の位相差を考察し、それを表現できるような非線形ダイナミクスを考案した。それから、この非線形ダイナミクスとヒステリシスの静的モデルを併せて、単調性を有しないヒステリシスの非線形動的モデルを構成した。ここで、静的モデルは動的ダイナミクスの入力側または出力側に配置した。この合成モデルにおいて、オンライン同定できるために、パラ

メータによって特徴づけた。また、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した。

(c) 人工筋肉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・合理性を確認した。最後に、研究室に配備されている超磁歪アクチュエータ及び圧電アクチュエータを用いて、提案モデルの妥当性を違う側面から検証した。

(d) 上記のようなモデルを獲得してから、単調性を有しないヒステリシスのオンライン同定法を考察した。対象とするヒステリシスは動的 non-smooth システムであるため、従来の同定法は応用できなかった。本研究では、non-smooth 切り替え多様体を導入することにより、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、人工筋肉及び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。さらに、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。

そして、研究課題(2)について、下記のように研究してきた。

(a) 構築された新型非線形動的モデルに基づき、非線形適応法を導入し、ダイナミクスのパラメータ及び静的ヒステリシスモデル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。

(b) 研究課題(1)で得られた同定結果に基づき、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、同定した人工筋肉/超磁歪アクチュエータのモデルを用いて、制御シミュレーションを行った。

(c) 提案した制御手法を人工筋肉/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、上記(b)の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PID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)を以下のように取り上げた。

(a) 簡単のため、単調性を有しないヒステリシスを入力側に含む動的システムのロバスト適応制御を考察した。研究課題1の結果により、考察されているシステムはサドイッチシステムとしてまとめた。

(b) 本研究では、簡単のため、動的システムが外乱を含む線形システム(そのパラメー

タが未知)であることを仮定した。適応アルゴリズムを提案し、制御則を構成できるような必要最小限のパラメータ(ヒステリシスの密度関数と合成したものを含む)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、設計パラメータでシステムの出力誤差を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。

最後に、研究課題(4)に下記のように取り込んだ。

(a) 超磁歪アクチュエータで駆動するナノポジショナを動的システムとして表現した。

(b) 研究課題(3)で得られた成果をナノポジショナの高周波出力位置決め高精度制御へ応用し、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。さらに、従来のPID制御法と比較し、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研究した。

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。

- 単調性を有しない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。
- 単調性を有しない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できる非線形適応法を提案した。特に、導電性高分子アクチュエータの出力制御及び超磁歪アクチュエータの高周波出力制御に対して、その制御手法を開発した。
- ヒステリシスの非線形特性を生かし、単調性を有しない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。
- 超高精度位置決め装置ナノポジショナの制御に関して、本研究で開発する非線形適応制御法の応用により、更なる高周波出力を高精度かつ高適応性で実現した。

理論面において、従来のアクチュエータで見られなく、しかしスマートマテリアルを用いた新型アクチュエータでよく見られる「単調性を有しない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、スマートマテリアルを用いた新

型アクチュエータの応用範囲がさらに広げられ、ロボット産業・精密加工・医療分野・生物分野などにおいてより高質な成果が得られる。また、優れた特性を持つスマートマテリアルを生かす応用領域がより広がる事が期待できる。

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 13 件)

- ① Y. Zhang, T. Chai, H. Wang, D. Wang and X. Chen, "Virtual unmodeled dynamics modeling for nonlinear multivariable adaptive control with decoupling design," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 48, no. 3, pp. 343-353, 2018. DOI: 10.1109/TNNLS.2017.2691905
- ② M.L. Nguyen, X. Chen and F. Yang, "Discrete time quasi sliding mode control with prescribed performance function and its application to piezo-actuated positioning systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no.1, pp. 942-950, 2018. DOI: 10.1109/TIE.2017.2708024
- ③ Y.-J. Liu, S. Lu, S. Tong, X. Chen, C.L. Chen and D.-J. Li, "Adaptive control-based Barrier Lyapunov Functions for a class of stochastic nonlinear systems with full state constraints," *Automatica*, vol. 87, pp. 83-93, 2018. DOI: 10.1016/j.automatica.2017.07.028
- ④ X. Jia, X. Chen, S. Xu, B. Zhang and Z. Zhang, "Adaptive output feedback control of nonlinear time-delay systems with application to chemical reactor systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4792-4799, 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2668996
- ⑤ X. Jia, X. Chen and S. Xu, "Adaptive output feedback control of feedforward nonlinear distributed delay systems with unknown delay kernel," *International Journal of Control*, vol. 70, no. 10, pp. 2057-2071, 2017. DOI: 10.1080/00207179.2016.1236215
- ⑥ M.H.B.M. Ramli and X. Chen, "Modeling and control of piezoelectric actuators by a class of differential equations based hysteresis models," *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, vol. 7, no.3, pp. 165-173, 2017. DOI: 10.1504/IJAMECHS.2017.086201
- ⑦ X. Chen, Y. Feng and C.-Y. Su, "Adaptive control for continuous-time systems with actuator and sensor hysteresis," *Automatica*, vol. 64, pp. 196-207, 2016. DOI:

10.1016/j.automatica.2015.11.009

- ⑧ X. Chen and C.Y. Su, "Adaptive control for ionic polymer-metal composite actuators," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 46, no.10, pp. 1468-1477, 2016. DOI: 10.1109/TSMC.2016.2523921.
- ⑨ X. Chen, C.-Y. Su, Z. Li and F. Yang, "Design of implementable adaptive control for micro/nano positioning system driven by piezoelectric actuator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no.10, pp. 6471-6481, 2016. DOI: 10.1109/TIE.2016.2573270.
- ⑩ Z. Li, X. Zhang, G.-Y. Gu, X. Chen and C.-Y. Su, "A comprehensive dynamic model for magnetostrictive actuators considering different input frequencies with mechanical loads," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 3. pp. 980-990, 2016.
- ⑪ 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*, vol. 18, no. 3, pp. 1087-1101, 2016.
- ⑫ T. V. Minh, X. Chen, "Precision tracking control for piezoelectric actuator using pseudo discrete-time Bouc-Wen model," *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*, vol. 6, no.4, pp. 157-165, 2015.
- ⑬ X. Chen, "A nonlinear exact disturbance observer inspired by sliding mode techniques," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, Article ID 651601, 2015.

[学会発表] (計 22 件)

(1) 国際会議

- ① T. Aoyagi and X. Chen, "Adaptive control for magnetostrictive actuators based on modified Preisach model," *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2017)* (Kagawa, Japan), August 6-9, 2017.
- ② M.L. Nguyen and X. Chen, "Discrete time quasi sliding mode control for piezo-actuated positioning systems: a prescribed performance control approach," *IFAC 2017 World Congress (IFAC 2017)* (Toulouse, France), July 9-14, 2017.
- ③ X. Chen, S. Wen and A. Wang, "Adaptive control for piezo-actuated micro/nano positioning system," *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* (Siem Reap, Cambodia), June 18-20, 2017.

- ④ M.H.B.M. Ramli and X. Chen, "Nonlinear discrete prescribed performance control for micro-positioning of smart actuators," *IEEE 4th International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS2016)* (Tokyo, Japan), December 17-20, 2016.
- ⑤ M.H.B.M. Ramli and X. Chen, "An extended Bouc-Wen model based adaptive control for micro-positioning of smart actuators," *2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)* (Melbourne, Australia), Nov. 30-Dec. 3, 2016.
- ⑥ M.L. Nguyen and X. Chen, "Enhanced discrete time sliding mode predictive control for micro/nano positioning devices based on piezoelectric actuators," *Regional Conference on Electrical and Electronics Engineering (RCEEE2016)* (Hanoi, Vietnam), November 17-18, 2016.
- ⑦ M.L. Nguyen and X. Chen, "High precision motion control of piezo-actuated stages using discrete-time sliding mode control with prescribed performance function," *The 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2016)* (Phuket, Thailand), November 13-15, 2016.
- ⑧ M.H.B.M. Ramli and X. Chen, "Control fusion strategy via differential equations based hysteresis operators," *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2016)* (Harbin, China), August 7-10, 2016.
- ⑨ M.L. Nguyen and X. Chen, "Tracking control of piezo-actuated stage based on model predictive control and disturbance observer," *The International Conference on Electrical Engineering (2016 ICEE)* (Okinawa, Japan), July 3-7, 2016.
- ⑩ 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.
- ⑪ 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.
- ⑫ N. M. Linh, T. V. Minh and X. Chen, "Precise tracking Ccontrol 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.
- ⑬ 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.
- ⑭ 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.
- ⑮ 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.

(2) 国内会議

- ① 関根、陳、 Piezostageの適応モデルマッチング、第60回自動制御連合講演会、電気通信大学、2017年11月11日。
- ② 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。
- ③ 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。
- ④ 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。
- ⑤ M.H.B.M. Ramli 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。
- ⑥ 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。
- ⑦ 関本、陳、圧電アクチュエータで駆動されるナノポジショナ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。

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