

令和 3 年 5 月 12 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04212

研究課題名（和文）スマートマテリアルを用いたアクチュエータで駆動されるサーボ機構の高度化制御

研究課題名（英文）Advanced Control for Servo Mechanism Driven by Smart Material-Based Actuators

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：優れた特性を持つスマートマテリアルを用いた新型アクチュエータは位置決め機構に利用されていることが大変注目されている。しかし、このようなアクチュエータにおいて、その出力特性はアクチュエータに印加される入力特性に直接依存するだけでなく、アクチュエータに掛けられる負荷などの外部環境にも影響される。本研究は、この種類の新型アクチュエータにおいて、その出力と入力との関係及び出力と外部環境との関係を総合的に考察し、その動的数式モデル、同定方法及び制御手法を提案し、さらに、これらのアクチュエータがサーボ機構に応用される際に、そのサーボ機構の高精度ロバスト制御を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

理論面において、スマートマテリアルを用いた新型アクチュエータにおける「入力履歴及び外部環境に依存するヒステリシス特性のモデリング及び制御」及び「このようなヒステリシスを含む動的システムのロバスト制御」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・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ことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Much Attention has been paid to the application of smart material-based actuators to positioning systems. However, the output of this kind of actuators depends on not only the input but also the external environments such as the payload, temperature, etc. In this research, the relationship between the output and the input and the relationship between the output and the external environment have been discussed, and the mathematical model of this kind of actuators has been constructed and identified, and the control method of the actuators has been proposed. Furthermore, the robust control scheme for the servo systems driven by this kind of actuators has been formulated.

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 アクチュエータ 高度化制御 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。例えば、超磁歪アクチュエータに存在するヒステリシスは非対称であるうえ、入力の周波数にも依存する（いわゆる“rate-dependent”特性）。また、超磁歪アクチュエータの入出力関係において、比較的高い高周波の入力が印加される時には、従来のアクチュエータのような単調増加関係が崩れ、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や導電性高分子アクチュエータなどにも同様の現象が見られる。さらに、これらの新型アクチュエータにおける出力特性は掛けられている負荷にも大きく依存する。このような非対称・非単調性・rate-dependent性を有し、負荷にも依存するヒステリシスにおいて、サーボ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、上記のようなヒステリシス特性を持つアクチュエータがサーボ制御に応用される際の高精度制御は実現されていなかった。この問題は最近まで本格的な学術研究テーマとして、ほとんど取り上げられてこなかった。最近、ヒステリシス問題の重要性が認識され、米国内をはじめ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。

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の入出力関係及び出力と外部環境との関係を総合的に考察し、その動的数式モデル、同定方法及び制御手法を提案することであり、さらに、これらの新型アクチュエータがサーボ機構に応用される際に、その機構の高精度ロバスト制御を実現することであった。具体的には、以下の研究課題を明らかにした。

- 研究課題 1: 新型アクチュエータの入出力関係を考察するうえ、負荷と出力の干渉関係も研究し、サーボ制御設計に利用できるような動的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: 提案した動的ヒステリシスモデルに基づき、ヒステリシスの近似逆を求めずに、オンラインロバスト適応制御法を提案する。そして、一定負荷の圧電アクチュエータ及び超磁歪アクチュエータに対し、それらの高精度出力制御を実現する。
- 研究課題 3: 提案した動的ヒステリシスモデルを入力側に含む動的システムに対して、動的ヒステリシスモデルの出力情報を使用せずに、グローバルシステムの入力・出力情報だけを用い、その非線形ロバスト適応制御法を設計する。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。
- 研究課題 4: 圧電アクチュエータや超磁歪アクチュエータなどで駆動される超高精度位置決めナノステージのサーボ機構に対し、高度な出力制御を実現する。

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) 従来の研究成果を踏まえ、リレーや play operatorなどを参考にし、入力に関する non-smooth 型非対称記憶要素を考案した。
- (b) 外部及び内部の環境に依存する時変密度関数を開発し、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。
- (c) 入出力の位相差を考察し、これを表現できるような非線形ダイナミクスを構成した。これらの準備に基づき、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、パラメータによって特徴づけられた動的モデルを構築した。ここで、パラメータの分離・非干渉化などを行って、パラメータの唯一性を確保する必要があった。
- (d) non-smooth 最適同定法を開発し、その収束性を検証した。
- (e) 圧電・超磁歪アクチュエータの実験によって提案手法の有効性を確認した。

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) 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パラメータをオンライン的に推定した。
- (b) モデルの不確かさに対処できるようなロバスト適応サーボ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) 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。

- (d) 一定負荷の圧電アクチュエータ及び超磁歪アクチュエータの高精度出力制御へ応用した。
- (e) 従来の制御法と比較し、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) 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。
- (b) 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。
- (c) 閉ループシステムの安定性を解析した。
- (d) 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) ナノステージをモデル化した。
- (b) そして、研究課題3で得られた結果をナノステージの出力位置決めサーボ制御へ応用し、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。
- (c) 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。
- (d) 従来の制御法と比較し、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をしてきた。

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。

- 出力と入力との依存関係だけでなく、出力と負荷との干渉関係も考慮することにより、新型アクチュエータのサーボ制御設計に利用できるような動的ヒステリシスモデルを提案した。
- 提案した動的ヒステリシスモデルに基づき、新型アクチュエータのモデルnon-smooth逐次同定手法及び非線形ロバスト出力高精度制御方法を提案した。
- 提案した動的ヒステリシスモデルを入力側に含む動的システムに対して、動的ヒステリシスモデルの出力情報を使用せずに、グローバルシステムの入力及び出力情報だけをを用い、その非線形ロバスト適応制御法を設計した。
- 圧電アクチュエータや超磁歪アクチュエータなどで駆動される超高精度位置決めナノステージのサーボ機構に対し、更なる高精度かつ高適応性の出力制御を実現した。

理論面において、スマートマテリアルを用いた新型アクチュエータにおける「入力履歴及び外部環境に依存するヒステリシス特性のモデリング及び制御」という難問、さらに「このようなヒステリシスを含む動的システムのロバスト制御」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、という学術的にも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くなることが期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件/うち国際共著 17件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 X. Zhang, R. Jing, Z.W. Li, Z. Li, X. Chen and C.-Y. Su	4. 巻 8
2. 論文標題 Adaptive pseudo inverse control for a class of nonlinear asymmetric and saturated nonlinear hysteretic systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica	6. 最初と最後の頁 916-928
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JAS.2020.1003435	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 X. Zhang, Y. Wang, G. Zhu, X. Chen, Z. Li and C. Wang	4. 巻 51
2. 論文標題 Compound adaptive Fuzzy quantized control for Qquadrotor and its experimental verification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cybernetics	6. 最初と最後の頁 1121-1133
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCYB.2020.2987811	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 X. Zhang, B. Li, X. Chen, Z. Li, Y. Peng and C.-Y. Su	4. 巻 25
2. 論文標題 Adaptive implicit inverse control for a class of discrete-time hysteretic nonlinear systems and its application	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 2112-2122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMECH.2020.2991666	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 X. Zhang, X. Chen, G. Zhu and C.-Y. Su	4. 巻 67
2. 論文標題 Output feedback adaptive motion control and its experimental verification for time-delay nonlinear systems with asymmetric hysteresis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 6824-6834
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TIE.2019.2938460	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M.L. Nguyen and X. Chen	4. 巻 67
2. 論文標題 MPC inspired dynamical output feedback and adaptive feedforward control applied to piezo-actuated positioning systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 3921-3931
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2019.2916356	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 X. Zhang, Y. Wang, C. Wang, C.-Y. Su, Z. Li, X. Chen	4. 巻 49
2. 論文標題 Adaptive estimated inverse output-feedback quantized control for piezoelectric positioning stage	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cybernetics	6. 最初と最後の頁 2106-2118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCYB.2018.2826519	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 X. Zhang, Y. Wang, X. Chen, C.-Y. Su, Z. Li, C. Wang and Y. Peng	4. 巻 49
2. 論文標題 Decentralized adaptive neural approximated inverse control for a class of large-scale nonlinear hysteretic systems with time delays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems	6. 最初と最後の頁 2424-2437
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSMC.2018.2827101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 M.H.B.M. Ramli, V.M. Tran and X. Chen	4. 巻 27
2. 論文標題 Pseudo-extended Bouc-Wen model and adaptive control design with applications to smart actuators	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control Systems Technology	6. 最初と最後の頁 2100-2109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCST.2018.2849735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 L. Chen, Y. Feng, R. Li, X. Chen and H. Jiang	4. 巻 2019
2. 論文標題 Jiles-Atherton based hysteresis identification of shape memory alloy-actuating compliant mechanism via modified particle swarm optimization algorithm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Complexity	6. 最初と最後の頁 7465461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2019/7465461	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M.L. Nguyen, X. Chen and F. Yang	4. 巻 65
2. 論文標題 Discrete time quasi sliding mode control with prescribed performance function and its application to piezo-actuated positioning systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Industrial Electronics	6. 最初と最後の頁 942-950
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIE.2017.2708024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Zhang, T. Chai, H. Wang, D. Wang and X. Chen	4. 巻 48
2. 論文標題 Virtual unmodeled dynamics modeling for nonlinear multivariable adaptive control with decoupling design	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems	6. 最初と最後の頁 343-353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNLS.2017.2691905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Zhang, T. Chai, H. Wang, D. Wang and X. Chen	4. 巻 29
2. 論文標題 Nonlinear decoupling control with ANFIS based unmodeled dynamics compensation for a class of complex industrial processes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Network and Learning Systems	6. 最初と最後の頁 2352-2366
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNLS.2017.2691905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 G. Cui, S. Xu, X. Chen, F.L. Lewis and B. Zhang	4. 巻 28
2. 論文標題 Distributed containment control for nonlinear multi-agent systems in pure-feedback form	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 2742-2758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.4047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 X. Chen	4. 巻 6
2. 論文標題 Discrete-time adaptive control design for ionic polymer-metal composite actuators	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 28114-28121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2018.2841514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 X. Zhang, B. Li, G. Zhu, X. Chen and M. Zhou	4. 巻 6
2. 論文標題 Decentralized adaptive quantized excitation control for multi-machine power systems by considering the line transmission delays	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 61918-61933
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2018.2873660	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Xinkai Chen
2. 発表標題 Implicit Inverse Based Adaptive Control for Magnetostrictive Actuators
3. 学会等名 2nd International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Nuo Xu, Yanzheng Zhu, Rongni Yang and Xinkai Chen.
2 . 発表標題 Consensus Analysis of Multi-Agent Systems with Uncertain Switching Topology in Finite Frequency Domain
3 . 学会等名 2020 IEEE International Conference on Information, Cybernetics, and Computational Social Systems (ICCSS2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Wang, G. Zhu, X. Chen, X. Zhang, J. Xu, X. Li, and H. Cao
2 . 発表標題 Neural networks-based robust adaptive dynamic surface sliding mode control of flight path angle with tracking error constraints
3 . 学会等名 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 X. Chen
2 . 発表標題 Adaptive control for piezo-actuated stage
3 . 学会等名 1st International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Wen and X. Chen
2 . 発表標題 Discrete-time fractional-order integral based sliding mode control for piezo-actuated system
3 . 学会等名 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Li, J. She, Z. Liu, C. Zhang, M. Wu, Y. Ohyama, and X. Chen
2. 発表標題 Suppression of disturbances in networked control systems with time-varying delay based on equivalent-input-disturbance approach
3. 学会等名 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE IECON) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林広明、陳新開
2. 発表標題 圧電アクチュエータで駆動されるXYステージの適応制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Chen
2. 発表標題 Advanced digital control design for ionic polymer-metal composite actuators
3. 学会等名 The 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE IECON) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 X. Zhang, G. Zhu, X. Chen and X. Li
2. 発表標題 Decentralized adaptive dynamic surface control for large-scale multi-machine power systems with unknown time delay
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 M.L. Nguyen and X. Chen
2 . 発表標題 Discrete-time fractional order integral sliding mode control for piezoelectric actuators with improved performance based on Fuzzy tuning
3 . 学会等名 The 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 G. Zhu, C. Zhong, Y. Liu, T. Wang, X. Chen and X. Zhang
2 . 発表標題 Adaptive fuzzy pseudo inverse output-feedback control for a class of asymmetric hysteresis nonlinear system
3 . 学会等名 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (IEEE ISIE 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 X. Chen
2 . 発表標題 Modelling and control design in discrete-time domain for ionic polymer-metal composite actuators
3 . 学会等名 The Second International Symposium on Autonomous Systems (ISAS 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 青柳智行、陳新開
2 . 発表標題 ヒステリシスモデルに基づく超磁歪アクチュエータの高精度制御
3 . 学会等名 第51回測自動制御学会北海道支部学術講演会 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
カナダ	Concordia University			
ベトナム	ハノイ理工大学			
中国	東北電力大学	華南理工大学	東北大学	他2機関