

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06133

研究課題名(和文) ロバスト性能設計問題の最終解決を目指して

研究課題名(英文) Toward the final solution for the design problem of robust performance

研究代表者

劉 康志 (Liu, Kang-Zhi)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70240413

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)：本研究は、ロバスト性能設計問題の最終解決を目標に研究を進めた結果、以下の研究成果を収めることができた。

1. 正実型の不確かさを有するシステムに対するロバスト性能設計理論を確立した。2. 虚負型の不確かさを有するシステムに対するロバスト性能設計理論を確立した。3. 不確かさの正実性、虚負性といった位相性質に加え、不確かさのゲイン情報も活用できるロバスト性能設計理論を確立した。4. 実システムに応用した結果、不確かさのゲイン情報のみを利用する従来のロバスト制御理論より、ロバスト性能を格段に向上できた。本研究成果は、ロバスト制御理論を大きく前進させ、産業システムの高性能化に高く貢献できた。

研究成果の概要(英文)：This project aims at solving the robust performance design problem of uncertain systems. The following outcomes are obtained:

1. We succeeded in establishing a design theory of robust performance for the systems with positive real uncertainty. 2. We succeeded in establishing a design theory of robust performance for the systems with negative imaginary uncertainty. 3. Besides the uncertainty phase property characterized by the positive realness or negative imaginarity, we succeeded in incorporating the frequency-dependent gain bound into the uncertainty model and establishing the associated design theory of robust performance for these classes of uncertain systems. 4. These methods enable high performance control design for a large class of practical systems. Applications to real systems validate that a significant improvement of robust performance can be achieved as compared with conventional methods which only use the uncertainty gain.

研究分野：制御理論

キーワード：ロバスト性能 不確かさの位相 不確かさのゲイン

1. 研究開始当初の背景

フィードバック制御の最大の目標は、よい目標値追従、外乱抑制と高い速応性を実現することにある。これらは総称して、制御性能と呼ばれる。当然、高い性能を持つフィードバック制御系を設計するためには、制御対象のモデルが欠かせない。一方、制御対象動特性の複雑さや、解析・設計を単純化するためのモデル簡略化に起因して、正確なモデルはほとんど得られない。したがって、よい制御系を設計するためには、モデルと実システムとの差である不確かさを十分に考慮しなければならない。

このような背景から、ロバスト制御研究が発展し、応用もされるようになってきた。しかし、これまでのロバスト制御理論では、不確かさのゲイン情報しか用いておらず、実用上保守的になる場合が多く見受けられる。1990年代以降、不確かさの位相性質に注目する動きが現れ、それが受動性(正実性)に基づくロバスト制御方法として発展してきたが、安定化問題しか扱えなかった。

実システムの制御性能を高め、生産効率を向上させるためにはより保守性の少ない、実用的なロバスト性能の設計理論が産業界から切望されていた。

2. 研究の目的

本研究では、ロバスト制御理論において完成に至らなかった、保守性のないロバスト性能設計問題にチャレンジし、その最終的な解決を目指す。

今までのロバスト制御理論は不確かさのモデリングにさほど注意を払ってこなかった。ノルム有界型や正実型の不確かさモデルは、いずれも不確かさの部分的な情報しか用いていない。すなわち、不確かさのゲインもしくは位相の情報だけを使っていた。そのために、現実の問題より遥かに大きな不確かさ集合を想定することになり、当然制御性能を限界まで上げられない。

本問題を解決することによって、制御系の性能を最大限に引き出すことが可能になる。これによって、既存の制御系に関しては制御則を変更するだけでシステムの性能を大幅に向上させることができ、新しいシステムの構築に対しては最高の制御法を提供できる。

3. 研究の方法

従前の研究における課題は、上述した不確かさモデルの貧弱さのほか、ロバスト性能問題へのアプローチも大きな要因であった。ロバスト性能問題において、如何に性能仕様と不確かさの特性を同じ土俵に乗せて議論するかは中心課題である。これまでの手法を突き詰めて考えると、いずれもシステムベースのものである。具体的には、ロバスト性能問題を、仮想的な不確かさを導入することによって等価なロバスト安定化問題に変換してから、小ゲイン原理を用いるアプローチであった。しかし、小ゲイン原理はこの等価問題に対しては十分条件にしかない。

以上の課題に対して、本研究では次のようにアプローチした。

- 1) 正実型不確かさと虚負型の不確かさについて、そのナイキスト軌跡を細かく観察し、ゲインと位相両方の境界を表すことのできる不確かさモデルを模索した。
- 2) システムベースのアプローチを改め、入出力信号からのアプローチを提案した。時間域におけるリヤプノフ法では、このようなアプローチはよく用いられたが、周波数域で議論すべき性能問題に関してはこのようにアプローチするのは本研究が初めてであった。

4. 研究成果

以下の研究成果が得られた。

- 1) 正実型の不確かさを有するシステムに対するロバスト性能設計理論を確立した。
入出力信号ベースのアプローチを用いて制御性能仕様と不確かさを統一的に表現した上、周波数域の S-Procedure、KYP 補題などの数学ツールを用いて数値設計がしやすい行列不等式形式のロバスト性能条件を導出できた。さらに、変数変換法により制御器を設計できるようにした。
- 2) 虚負型の不確かさを有するシステムに対するロバスト性能設計理論を確立した。
不確かさに対してある変換を導入することにより、上記ロバスト性能設計理論を虚負型の不確かさを有するシステムに拡張し、その応用範囲を広げた。

- 3) 不確かさの正実性、虚負性といった位相性質に加え、不確かさの周波数依存のゲイン情報も活用できるロバスト性能設計理論を確立した。

上記二つのクラスに対して、不確かさの位相性質と周波数によって変化するゲイン情報を表現できる、全く新しいタイプの不確かさモデルの確立に成功し、これに対応するロバスト性能設計理論も確立できた。

- 4) ハードディスクの磁気ヘッド位置決め制御、エンジンベンチのトルク制御など、実システムに応用した結果、不確かさのゲイン情報のみを利用する従来のロバスト制御理論より、ロバスト性能を格段に向上させることができた。

本研究成果は、ロバスト制御理論を大きく前進させ、産業システムの高性能化に高く貢献できる。

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、すべて査読付き)

K. Koiwa, K.Z. Liu and J. Tamura: Analysis and Design of Filters for Energy Storage System: Optimal Trade-off between Frequency Guarantee and Energy Capacity/Power Rating, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65-8, pp.6560-6570, DOI 10.1109/TIE.2017.2688974 (2018.08, *IF 7.168*)

K.Z. Liu, M. Ono, X. Huo and M. Wu: Robust Performance Design for Systems with Output Strictly-Passive Uncertainty, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.65-5, pp.4207-4215, DOI: 10.1109/TIE.2017.2762643 (2018.05, *IF 7.168*)

P. Yu, M Wu, J. She, K.Z. Liu and Y. Nakanishi: Enhancement of Disturbance-Rejection Performance of Uncertain Input-Delay Systems: A Disturbance Predictor Approach, IET Control Theory & Applications, DOI: 10.1049/iet-cta.2017.1343 (accepted, 2018.04, *IF 2.536*)

P. Yu, M Wu, J. She, K.Z. Liu and Y. Nakanishi: Robust Tracking and Disturbance Rejection for Linear Uncertain System with Unknown State Delay and Disturbance, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, DOI 10.1109/TMECH.2018.2816005 (accepted, 2018.02, *IF 4.357*)

P. Yu, M Wu, J. She, K.Z. Liu and Y.

Nakanishi: An Improved Equivalent-Input-Disturbance Approach for Repetitive Control System with State Delay and Disturbance, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65-1, pp. 521 - 531, DOI: 10.1109/TIE.2017.2716906 (2018.01, *IF 7.168*)

Kang-Zhi Liu, Masao Ono, Xiaoli Li, Min Wu: Robust Performance Synthesis for Systems with Positive-Real Uncertainty and An Extension to The Negative-Imaginary Case, Automatica, Vol. 82-8, pp. 194-201, DOI 10.1016/j.automatica.2017.04.037 (2017. 8, *IF 5.451*)

小岩 健太, 鈴木 賢太, 劉 康志: H_∞ 制御による電力貯蔵装置の容量低減化, 電気学会論文誌 B, Vol. 137-8, (2017. 8)

X. Huo, S. Feng, K.Z. Liu, L. Wang, and W. Chen: Aerodynamic Drag Analysis of 3-DOF Flex-Gimbal GyroWheel System in the Sense of Ground Test, Sensors, Vol. 16-12, p. 2081, DOI 10.3390/s16122081 (2016.12, *IF 2.677*)

Xin Huo, Xin-Gang Tong, Kang-Zhi Liu, Ke-Mao Ma: A compound control method for the rejection of spatially periodic and uncertain disturbances of rotary machines and its implementation under uniform time sampling, Control Engineering Practice, Vol. 53, pp. 68-78 (2016. 8, *IF 2.602*)

小岩健太, 劉康志, 田村: 電力系統の周波数特性に基づく電力貯蔵装置容量の決定法と制御系設計法に関する検討, 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 8 (2016. 8)

T. Zanma, M. Azegami and K. Z. Liu: Optimal Input and Quantization Interval for Quantized Feedback System With Variable Quantizer, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64-3, pp. 2246-2254, DOI 10.1109/TIE.2016.2625240 (2016. 3, *IF 7.168*)

Kang-Zhi Liu: A High Performance Robust Control Method Based on The Gain and Phase Information of Uncertainty, International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 25, No. 7, pp. 1019-1036 (2015. 5, *IF 3.393*)

[学会発表](計24件、すべて査読付き)

Y. Takagi, K. Kenta, T. Zanma, M.

Wakaiki, K.Z. Liu: Electrical angle estimation of rotor for PMSM in model predictive current control, Proc. of CCC 2017, pp. 4614-4617, Dalian, China (2017. 7)

S. Takayasu, T. Zanma, M. Wakaiki, K.Z. Liu: Stability and Performance Analysis of Receding Horizon Quantizer in Single-Input System, Proc. of CCC 2017, pp. 7783-7786, Dalian, China (2017. 7)

D. Hashimoto, T. Zanma, M. Wakaiki, K.Z. Liu: Estimation of Network Traffic Status for Networked Control Systems with Data Dropout and Its Control, Proc. of CCC 2017, pp. 7793-7796, Dalian, China (2017. 7)

G.B. Li, T. Zanma, M. Wakaiki, K.Z. Liu: Design of Networked Control Systems in Consideration of Quantization Error and Channel Capacity, Proc. of CCC 2017, pp. 7837-7840, Dalian, China (2017. 7)

H. Haraike, S. Nugroho, K.Z. Liu, M. Wu: Economic Operation of Power System with Large Scale Wind Farms Based on Statistics of Wind Power, Proc. of CCC 2017, pp. 9193-9196, Dalian, China (2017. 7)

S. Shimonomura, K.Z. Liu, T. Akiyama, T. Yamaguchi, Y. Tadano, M. Nomura, M. Wu: A Passivity Based Robust Design Method for The Control of Engine Benches, Proc. of CCC 2017, pp.3194-3197, Dalian, China (2017. 7)

S. Akita, K. Koiwa, K.Z. Liu, T. Yoshida, Y. Tadano, M. Nomura, M. Wu: An Online Parameter Estimation Method for the Four-Quadrant Vector Control of Induction Motors Based on UKF, Proc. of CCC 2017, pp. 3349-3352, Dalian, China (2017. 7)

K. Koiwa, K. Suzuki, K.Z. Liu, J. Tamura, M. Wu: H_∞ Control Approach to the Minimization of Energy Capacity of Energy Storage System, Proc. of CCC 2017, pp. 10584-10587, Dalian, China (2017. 7)

Y. Takagi, S. Tozawa, K. Koiwa, T. Zanma, M. Wakaiki, K.Z. Liu, Y. Aoki, H. Yoshida and M. Fujitsuna: Electrical angle estimation of rotor for PMSM in model predictive current control, Proc. of ICEMS 2016, Makuhari, Japan (2016)

S. Fujisawa, T. Zanma and K.Z. Liu: Optimal plant data transmission in networked control systems, Proc. of

IECON 2016, Firenze, Italy (2016.10)

A. Tokunaga, T. Zanma and K.Z. Liu: Optimal dynamic quantizer and input in quantized feedback control system, Proc. of IECON 2016, Firenze, Italy (2016.10)

M. Watanabe, K. Koiwa and K.Z. Liu: New optimization method for the smoothing of wind farm output by using kinetic energy, Proc. of IECON 2016, Firenze, Italy (2016.10)

S. N. Christian, K.Z. Liu: Online wavelet based control of hybrid energy storage systems for smoothing wind farm output, Proc. of IECON 2016, Firenze, Italy (2016.10)

Kenta Koiwa and Kang-Zhi Liu: Design of Battery Capacity and Control System Based on the Frequency Characteristics of Power System, Proc. of CCC2016, Chengdu (2016.07)

Enkhtuvshin Munkhbayasgalan, Kang-Zhi Liu and TADANA O ZAMMA: A New Peak-Cut Method for Smart Grid, Proc. of CCC2016, Chengdu (2016.07)

Watanabe Mizuki, Kenta Koiwa and Kang-Zhi Liu: An Optimization Approach to The Fluctuation Control of Wind-Farm Output, Proc. of CCC2016, Chengdu (2016.07)

Sho Shimonomura, Kang-Zhi Liu, Takao Akiyama, Yugo Tadano and Masakatsu Nomura: A Passivity Based Robust Design Method for The Control of Engine Benches, Proc. of CCC2016, Chengdu (2016.07)

Munkhbayasgalan Enkhtuvshin, Kang-Zhi Liu, and Tadanao Zanma: Economic Operation of Smart Grid Based on The Statistics of Renewable Energy, Proc. of IEEE ISGT Asia 2015, CD-ROM, Bangkok (2015.11)

Kang-Zhi Liu, Masao Ono and Xiaoli Li: A Positive Real Method for Robust Performance Design Problem from An Input-Output Signal Approach, Proc. of SICE2015, pp.654-659, Hangzhou (2015.07)

Kang-Zhi Liu, Masao Ono and Xiaoli Li: Revisiting The Robust Performance Problem, Proc. of SICE2015, pp.650-653, Hangzhou (2015.07)

21 Tomo Inafuku and Kang-Zhi Liu: Improvement of power system's transient stability with a saturation control method, Proc. of SICE2015, pp.1082-1085, Hangzhou (2015.07)

- 22 Kang-Zhi Liu, Msashi Yokoo and Keiichiro Kondo: Direct vector control of induction motors based on independent estimation of resistance and flux, Proc. of ASCC2015, Kota Kinabalu (2015.06)
- 23 Satoshi Tozawa, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu, Yasuaki Aoki and Hideji Yoshida: Model predictive current control for PMSM considering trade-off between current ripple and number of switching operations, Proc. of ASCC2015, Kota Kinabalu (2015.06)
- 24 Koki Hoshikawa, Tadanao Zanma, Noriaki Ogura, Kang-Zhi Liu: Optimal formation control of two-wheeled vehicles using model predictive control, Proc. of ASCC2015, Kota Kinabalu (2015.06)

〔図書〕(計 1件、査読付き)

Kang-Zhi Liu and Yu Yao: [Robust Control: Theory and Applications](#), 460 pages, John Wiley & Sons (2016.8)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.sc.te.chiba-u.jp/people/liu_j.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

劉 康志 (Kang-Zhi Liu)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70240413