

令和元年6月4日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26420417

研究課題名(和文) 実用的な制御系の設計と実装に関する研究

研究課題名(英文) Design and Implementation of Practical Control Systems

研究代表者

太田 有三(Ohta, Yuzo)

神戸大学・システム情報学研究科・名誉教授

研究者番号：80111772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：4次以下のスカラー系を制御対象とし、任意の整定時間を持つ積分型サーボシステムの設計法を提案した。実際の制御対象が高域に共振項を持つ場合やシステムの不確かさに対応するために、先の設計法を適用したフィードバック制御系を規範モデルとするモデルフォロ잉制御法を適用することを検討した。実際の制御対象が不安定零点を含む場合にも良い応答が得られるように改良したモデルフォロ잉制御系の構成法を提案した。リファレンスガバナを用いた拘束系の制御のための拘束条件の新しい特徴付けを提案し適用可能な制御対象のクラスを拡大した。得られた結果の有効性は、ハードディスク装置、振り装置、ガソリン機関などを用いて確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LQR・H<sub>∞</sub>理論・LMIなどロバスト制御系の設計方法は目覚ましい発達を遂げてきた。これらの方法は、高速な追従などの仕様を直接的に取り込んでいるわけではないので、整定時間やオーバーシュートといった観点から見ると必ずしもよい結果をもたらさない場合も少なからずある。したがって、直接的に整定時間を制御仕様とした制御系の設計方法の研究も重要である。本研究では、低次元のスカラー系に対しては任意の整定時間を実現できる積分型サーボシステムの設計方法を明らかにしており、実用上の有効性は高い。また、不安定零点が現れることも多々あるので、改良したモデルフォロ잉制御系の構成法も有用である。

研究成果の概要(英文)：We proposed a design method of the integration type servosystem which achieves arbitrary assigned settling time for the  $n$ -th order plant, where  $n$  less than or equal to 4. To reduce the bad effect caused by the existence of resonant terms and uncertainty included in the real plant we use a model following control scheme where the reference model is the integration type servosystem designed by applying the proposed method for a low dimensional plant model, but sometimes it shows a bad response when the actual plant has unstable zeros. We proposed a modified configuration of the model following control scheme so that the actual plant shows good response if the actual plant has unstable zeros. We also proposed a new implementation of a reference governor so that a class of an applicable control system was expanded. Usefulness of the proposing methods was checked using a simulation of a hard disk drive and experiments of a pendulum equipment and a gasoline engine.

研究分野：制御工学

キーワード：拘束系の制御 リファレンスガバナ PID制御系 ロバストM%制御 オーバーシュートの抑制 逆動作の抑制 ハードディスク ガソリン機関回転速度系

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

### 1. 研究開始当初の背景

LQR・ $H_\infty$ 理論・LMIに基づく方法などロバスト制御系の設計方法は目覚ましい発達を遂げてきた。これらの方法は、目標位置・軌道への高速な追従に関しても良好な結果をもたらす場合も少なくないが、それらの仕様を直接的に取り込んでいるわけではないので、整定時間やオーバーシュートといった観点から見ると必ずしもよい結果をもたらさない場合も少なからずある。したがって、直接的に整定時間やオーバーシュートを制御仕様とした制御系の設計方法の研究も重要である。

また、実際の制御系では、系の状態やアクチュエータの出力などに制約が課せられる場合が多く、拘束系としての取り扱いも重要である。拘束系の制御に関しては、モデル予測制御法、アンチwindアップ制御法、リファレンスガバナを用いる方法などの方法があるが、モデル予測制御法はオンライン最適化問題を解かねばならないので、制御系を高速に動作させる必要がある場合へ適用するには実装の点から更に研究が必要である。また、アンチwindアップ制御法は、目標位置への高速な追従を直接的に制御仕様とはしていないことと制御入力の飽和の問題以外の拘束問題に対しては考えられていない。リファレンスガバナを用いる方法は制御対象が積分器を含まない場合への適用、最大出力許容集合の算出の問題、オンラインでの高速処理の問題などをさらに検討する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、1入力1出力の線形システムで比較的低次元の主モードを持つが、高域に共振項を有するシステムを対象として、(1)目標位置への高速で高精度な追従を実現でき、かつ、(2)不確かさや外乱による影響を抑制することができる積分型サーボシステムの設計方法を確立することと、さらに、(3)そのように設計されたシステムを拘束系として取り扱う実用的な方法を提案することを目的としている。そして、それらの有効性をシミュレーションや実験を通じて確認することも目的としている。

目標位置への高速で高精度な追従に関して言えば、整定時間を小さくすることが実用上最も重要である。本研究では、積分型サーボシステムを考え、ゲイン交差周波数の上限  $\omega_D$  を与えた下で整定時間を最小とする制御器のパラメータ  $K(\omega_D)$  を算出する。なお、線形フィードバック系を考えているので、ゲイン交差周波数の上限  $\omega_D$  を与えた下で整定時間を最小とする制御器のパラメータ  $K(\omega_D)$  が算出されており、制御器パラメータを  $K(\omega_D)$  とした時の整定時間を  $T_s(\omega_D)$  とすると、ゲイン交差周波数の上限を  $\bar{\omega}_D$  に変えた場合の整定時間最小となる制御器パラメータ  $K(\bar{\omega}_D)$  は  $K(\omega_D)$  と  $\gamma = \bar{\omega}_D / \omega_D$  から簡単に計算でき、それに対する整定時間  $T_s(\bar{\omega}_D)$  は  $T_s(\bar{\omega}_D) = T_s(\omega_D) / \gamma$  となる。このことから、 $\omega_D$  を与えて  $K(\omega_D)$  を計算するという事は、実用上非常に意味がある。

### 3. 研究の方法

(1) 整定時間はパラメータに関して不連続であり、さらに多峰性であるので、低次元のシステムに対しても、理論的にすっきりした解を得ることはほとんど不可能である。本研究では、積分型サーボシステムを考え、微分を必要としない粒子群最適化法を用いてゲイン交差周波数の上限  $\omega_D$  を与えた下で整定時間を最小とする制御器のパラメータ  $K(\omega_D)$  を算出する。粒子群最適化法は最適解の近傍でも収束が遅いので、近傍で収束を加速する方法を考える必要がある。

(2) ロバスト安定性や制御モデルに入れなかった高域における不確かさを含む共振項の影響を低減させるためには、LQR・ $H_\infty$ 理論・LMIに基づく方法などロバスト制御系の設計方法が有効であるが、単純にこれを適用すると、目標位置への高速な追従が実現できないことが少なくない。このため、(1)の結果を適用した低次元のシステムに対するフィードバック制御系を規範モデルとして、モデルフォロ잉制御を用いるのが妥当と考えられるが、共振項が不安定零点を含んでいる場合は、対応策を考える必要がある。

(3) リファレンスガバナの考え方を基にした改良した拘束系の制御について検討する。リファレンスガバナを用いる拘束系の制御では、最大出力許容集合を用いることが前提のようになっているが、制御対象が積分器を含んでいる場合以外は、基準入力に応じて最大出力許容集合が変化するので、この方法を適用できない。しかし、変化の仕方に特殊性があり、この特殊性を利用することを検討する。

(4) 研究結果の有効性は、シミュレーション、振子装置、ガソリン機関などを用いて確認する。

#### 4. 研究成果

(1) 4次以下の制御対象に対して積分型サーボシステムを考え、ゲイン交差周波数の上限  $\omega_D$  を与えた下で、整定時間最小となる制御器パラメータ  $K(\omega_D)$  を算出した。整定時間は最適解近傍でパラメータに関して不連続であるので、微分を必要としない方法として、粒子群最適化法を適用した。粒子群最適化法は最適解の近傍でも収束が遅いので、非線形シプレックス法と組み合わせることで収束速度の改善を図った。

(2) 上の結果を適用した低次元のシステムに対するフィードバック制御系を規範モデルとして、モデルフォロイング制御を適用することを検討した。規範モデルのゲイン交差周波数が共振項の周波数に近接するまで整定時間を短くすると、ノッチフィルタを用いて共振を抑制する必要がある。ノッチフィルタのパラメータも最適化手法を用いて決定した。これによってゲイン特性に関しては共振を抑制できたが、共振項が不安定零点を含んでいる場合は、不安定零点によってもたらされる位相遅れのために意図した応答を得ることができなかった。最終的には、従来のモデルフォロイング制御系にもうひとつ制御器を追加することを考案し、これにより良い応答をえることができるようになった。

(3) リファレンスガバナを用いた拘束系の制御のための拘束条件の新しい特徴付けを提案した。これにより、制御対象が積分器を持つ場合に限らずリファレンスガバナを用いた制御を比較的容易に行えるようになった。さらに、オーバーシュートの抑制や不安定零点を持つ場合の逆動作の抑制なども拘束系の制御と同様な枠組みで行うことが可能となった。また、サーボプレスの制御に関連して複数のリファレンスガバナを用いる方法を提案しこれによりオンラインでの計算量を削減することができることを示した。

(4) 有効性の確認。①ハードディスクのヘッドの制御への適用(シミュレーション)、②振子の移動実験、③ガソリン機関回転速度制御系への適用実験などを行い、上の(1)~(3)の方法の有効性を確認した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10件)

① 瀧山武, 吉川達哉, 野 仁人, 太田有三. 整定時間指定サーボ系設計手法を用いたガソリン機関回転速度制御系の適応化の検討, 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.84, 2018, pp.1-8

<https://doi.org/10.1299/transjsme.17-00562>

② Masubuchi Izumi and Sakaguchi Shohei, Consensus-Based Rendezvous Control of Double Integrators via Binary Relative Positions and Velocity Feedback, IMA Journal of Mathematical Control and Information, 査読有, Vol.35, 2018, pp.1371-1389

<https://doi.org/10.1093/imamci/dnx033>

③ 瀧山武, 太田有三, 整定時間指定サーボ系設計手法のガソリン機関回転速度制御系への適用の検討, 自動車技術会論文集, 査読有, Vol.47, 2016, pp.1177-1183

<https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.47.1177>

④ 太田有三, 拘束系の制御, IEICE Fundamentals Review, 査読有, Vol.10, 2016, pp.113-121

[https://doi.org/10.1587/essfr.10.2\\_113](https://doi.org/10.1587/essfr.10.2_113)

⑤ I. Masubuchi, S. Ishii, Y. Ohta and M. Saeki, Gain-Scheduled Control via Switching of LTI Controllers and State Reset, Asian Journal of Control, 査読有, 2016, pp.1-11

<https://doi.org/10.1002/asjc.1272>

⑥ I. Masubuchi, T. Wada, T. Asai, L. T. H. Nguyen, Y. Ohta and Y. Fujisaki, Distributed Multi-Agent Optimization Based on an Exact Penalty Method with Equality and Inequality Constraints, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration 査読有, Vol.9, 2016, pp. 179-186

<https://doi.org/10.9746/jcmsi.9.179>

⑦ Izumi Masubuchi, Takayuki Wada, Ryosuke Morita, Yuzo Ohta, Yasumasa Fujisaki, Distributed Multi-Agent Optimization Based on a Constrained Subgradient Method, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol.8, 2015, pp. 234-240

<https://doi.org/10.9746/jcmsi.8.234>

⑧ 太田有三, 瀧山武, 増淵泉, 整定時間を指定するサーボ系設計, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.27, 2014, pp.1-7

<https://doi.org/10.5687/iscie.27.1>

⑨ 増淵泉, 松阪亮, 太田有三, 離散時間ゲインスケジュールド制御系設計のための新たなパラメータ依存LMI, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.27, 2014, pp.36-41

<https://doi.org/10.5687/iscie.27.36>

⑩ 郭 昊, 太田 有三, 増淵 泉, 拘束システムに対するリファレンスガバナの実装, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol. 27, 2014, pp.187-192

<https://doi.org/10.5687/iscie.27.187>

[学会発表](計 10件)

① Yuzo Ohta and Hao Guo, Seek Control of Hard Disk Drives Using Model Following Control: An Improved Result, the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2018

② Takeshi Takiyama, Tatsuya Yoshikawa, Jinto Noh, and Yuzo Ohta, PI and Adaptive Model Matching Control System that Satisfies the Settling Time Application to Engine Speed Control, IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative

Control, 2018

- ③ Yuzo Ohta, Integral-Type Servo Systems Achieving Minimum M% Settling Time Under Constraint of the Upper Bound of the Gain Crossover Frequency, IEEE 15th International Workshop on Advanced Motion Control, 2018
  
- ④ Yuzo Ohta, Parametric Stability, 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 2017
  
- ⑤ Izumi Masubuchi and Takahiro Kikuchi, Lyapunov Density for Almost Attraction of Nonlinear Time-Varying Systems: A Condition without Assuming Local Stability, the 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2017
  
- ⑥ Tsukasa Sakaguchi and Izumi Masubuchi, Exponential Convergence Analysis of Nonlinear Systems via Lyapunov Densities, the SICE Annual Conference 2017, 2017
  
- ⑦ Izumi Masubuchi and Yuzo Ohta, Analysis of Almost-Everywhere Stability of a Class of Discontinuous Systems via Lyapunov Densities, 2016 European Control Conference, 2016
  
- ⑧ Y. Ohta, Y. C. Tong and I. Masubuchi, Finite A% Settling Time Control of Discrete Time Nonlinear Constrained Systems, 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, 2015
  
- ⑨ Y. Ohta, Y. Shibutani and I. Masubuchi, Control of a Servo Press Using Distributed Reference Governors, the 41th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society , 2015
  
- ⑩ Y. Ohta and I. Masubuchi, On the Implementation of Reference Governor, the 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society , 2014

## 6.研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 増淵 泉

ローマ字氏名: Izumi Masubuchi

所属研究機関名: 神戸大学

部局名: 大学院システム情報学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 90283150

研究分担者氏名： 瀧山 武

ローマ字氏名： Takeshi Takiyama

所属研究機関名： 大阪市立大学

部局名： 大学院工学研究科

職名： 准教授

研究者番号(8桁)： 20206923

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。