

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870546

研究課題名(和文)モデル誤差を抑制する補償器構造による新たなロバスト制御

研究課題名(英文)New robust control method using control structure including nominal model

研究代表者

岡島 寛(Okajima, Hiroshi)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40452883

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：制御系設計を行う場合には、対象の数式モデルに基づいて制御器の設計を行うことが一般的である。このとき、数式モデルと制御対象の動特性との間にギャップがあれば、それに起因して所望の制御性能を得られない。本研究では、制御対象の出力とモデルの出力の差をフィードバックすることで見かけ上の両者間のギャップを小さくする新しいロバスト制御手法について研究を行った。誤差抑制のみに特化するような補償器を付加するため、既存の制御系設計法と併用することができ、良好な制御性能を簡単な設計手順で実現できる。さらに、通常ロバスト化しにくい非線形システムや無限次元システムなど様々な対象への適用も期待できる。

研究成果の概要(英文)：Design methods of control systems based on plant models have been developed in many fields. If the plant model is accurately obtained by the input-output relation of the plant, the designed controller for the model act as good performance. On the other hand, the desired control performance may not be achieved when the modeling error is not small. To overcome this problem, We have proposed the model error compensator(MEC) to minimize the modeling error between the plant and model. MEC works well for many control systems such as unstable systems, non-linear systems and so on.

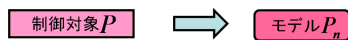
研究分野：制御工学

キーワード：ロバスト制御 内部モデル制御 非線形制御

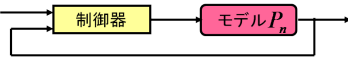
1. 研究開始当初の背景

(1) 制御系設計において、正確な制御対象の運動特性を数式モデルとして実現できれば、最適レギュレータなどの様々な既存の制御系設計手法により所望の動作を実現することができる。まず、制御対象から数式モデルが導出(図1の1)される。次にモデルと設計仕様に基づいて制御系設計手法により制御器を求める(図1の2)。最後に、制御対象に対して2.で求めた制御器を実装する(図1の3)。このとき、もし制御対象とモデルの動特性が一致している、もしくは限りなく近い場合には、制御対象(3)の応答はモデル(2)の応答に近くなり、望ましい制御性能が実現される。

1 制御対象の入出力応答などからプラントのモデルを導出



2 モデルに対してよい性能となるよう制御器を設計



3 制御対象に制御器を適用

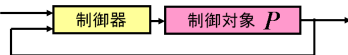


図1 基本的な制御系の設計手順

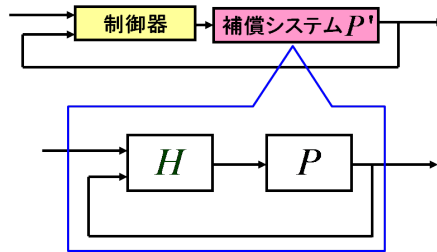
しかし、必ずしも(1)で正確なモデルが求まるとは限らず、その場合には、図1の2で得られた制御器を実装しても制御対象でよい応答が得られない。動特性を数式モデルとして完全に表すことは難しく、対象パラメータの個体バラツキ、経年劣化、バックラッシュに代表される非線形性など、対象の挙動を完全に把握しモデル化することは不可能に近い。また、ロボットが様々な重さの物体を運ぶような場合では、重さによらず同じ制御器で動作させることになるためバラツキに強い制御系の構築が必要となる。

(2) そのような背景から、モデル化誤差に着目した**ロバスト制御**が展開されているが、通常、ロバスト制御においては、モデル集合のうちどの対象が与えられても所定の制御性能を満たすことを目的として制御器が設計される。これは、モデル集合のうちの最悪ケースに対しての性能保証を目指した制御器設計を意味し、結果として遅い応答となる場合が多い。また、評価関数がH指標に限られるため扱いにくく、直接的に実際の設計仕様を扱えないことなどの理由により産業界などでは積極的に利用されていない。

(3) 本研究は、**従来のロバスト制御とは別の視点からモデルと制御対象とのギャップの補償について考える**。具体的には、制御対象Pで起こり得る全てのダイナミクスに対し、そのモデル Pn からのバラツキを小さくする

補償器(図2)を設計する。補償器Hを適切に設計することで、**PがばらついてPがPnと近くなるように補償する**。このとき、図1の3の制御対象Pの代わりにP'(図2上)を用いて制御を行えば図1の2と同じ制御応答が期待できる。

既存手法で得た制御器を用いてP'を制御する



P_nに近づくよう補償されたシステム

図2 本研究のコンセプト

2. 研究の目的

これまでの研究で、図3に示す補償器構造を提案している。これは、従来より知られているIMC(内部モデル制御)と同様に**モデル出力と制御対象の出力差を利用した補償器**となっている。さらに、提案した補償器におけるフィルタの設計法をモデル集合の最小化の観点から研究しており、設計問題を通常のμ設計問題に帰着させている。これはMATLAB等の数値計算ソフトウェアで解くことができ、Pnが安定かつ最小位相、SISO系場合に限定されてはいるものの良好なバラツキの抑制性能を確認している。この結果に基づき扱える制御系を拡大することが本研究の目的である。

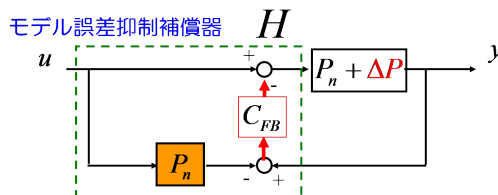


図3 補償器の基本構造

3. 研究の方法

研究期間内に、以下の3つの課題について研究を実施する。

課題1: 線形制御系に対する一般化(不安定、非最小位相、MIMOの制御対象に対する設計法)

制御対象が不安定極を有する場合、モデルPnも不安定なシステムとして与えられる。このとき、外部の制御器によって補償器を安定化する必要があり、系の内部安定性の解析手法やバラツキの抑制性能の評価についてさらなる研究が必要となる。また、逆プレなどの

現象で知られる非最小位相系や MIMO 形についてもその設計法の構築を行なう。

課題 2：非線形システム・無限次元系に対する設計法

制御対象が非線形システムとして与えられる場合、モデル P も非線形システムとして与えた上でフィルタ C_{FB} の設計を考える必要がある。このとき、系の内部安定性の解析手法やパラツキの抑制性能の評価について研究が必要となる。この結果、非線形システムに対する実質的なロバスト化を実現できる。さらに、制御系設計が困難な無限次元系についても補償器の設計法を構築する。

課題 3：規範モデル設計

本研究の補償器は入出力特性をモデル P_n に近づけることを目的としている。このとき、 P_n をどのように与えるのが適切であるかは一つの重要課題である。通常モデル化では制御対象 P で起こり得る応答の中心値を与える。一方、むだ時間を含む制御対象に対して、モデルのむだ時間を長めに設定することで制御結果が良くなる経験則が知られており、中心値モデルが必ずよいわけではない。このような背景から、モデルとパラツキ抑制性能の関係についての解析を行なう。

4. 研究成果

制御対象の集合を考え、その集合が H ゲインの意味で小さくなるような補償器設計法を提案することが、本研究の基礎となるアイディアである。この結果を拡張することで、より広いクラスの線形システムに対応した補償器の統一的な設計法を考えた。対応すべき制御対象として、不安定制御対象、非最小位相系、MIMO 系が挙げられる。不安定な制御対象に対しては、入出力特性と不安定なモデルに近づけた場合に、制御器を含む全体のシステムが安定か否かが重要である。そのため、最初に内部安定性の解析法の構築を行なう。

内部安定性の解析

不安定な制御対象の場合、必ずフィードバック制御が行なわれる。よって全体系の内部安定性について解析手法を与える必要がある。フィードフォワードの場合は補償器内のフィードバックのみ考えればよいのに対し、フィードバック制御を併用する場合は制御器だけでなく図 3 自体にもフィードバックループが含まれることから、全体に対する安定性解析が必要になる。フィードバック制御器が既知なものとして、安定性解析の手法を構築した。

パラツキ抑制性能の評価

の制御対象が不安定な場合に加え、MIMO 系や非最小位相系など様々なクラスの制御対象に対する設計法の構築を行なった。特に MIMO 系においては“どの出力が制御において重要か”によって評価方法を変更する必要があると考えられ、柔軟に評価関数を調整できる設計の枠組みが必要であった。と同様

に、既存のロバスト制御系設計法においても MIMO 系に対する解析・設計法が多く確立されていることから、この研究を進めるに当たっての困難は少なく十分な成果を得た。また、非最小位相系に対しては、パラレルフィードフォワードフィルタを利用する手法を提案し、想定以上の成果を得た。この結果は、学術論文としてまとめ、掲載された。

非線形システムに対する設計法

制御対象が非線形システムの場合に対する設計法を構築した。非線形システムに対するフィードバック制御系の設計法は既存の結果として数多く存在する。動作点近傍でのテイラー展開を利用する近似線形化や、非線形座標変換を利用したフィードバック線形化が代表的であり、本論文においても**非線形システムを線形化**することで補償器の設計を行った。この結果は学術論文としてまとめた。また、非線形システムの設計の応用先としてピークル制御を考え、車両のパラメータ変動にロバストな自動運転制御系を構築し、学会発表を行った。

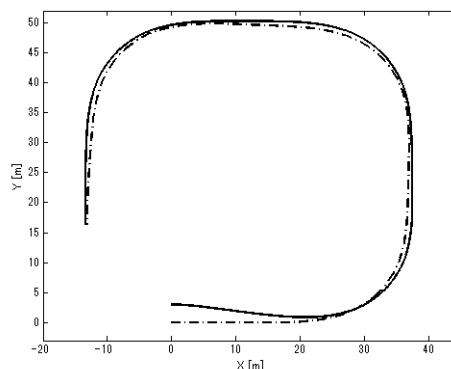


図 4 従来法 (パラメータ誤差あり)

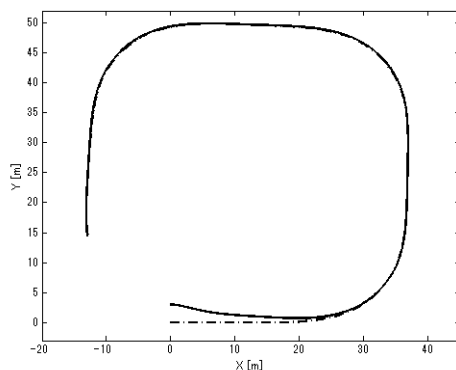


図 5 提案法 (パラメータ誤差あり)

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 6 件)

[1] 藤岡巧, 岡島寛, 松永信智: モデル誤差抑制補償器と周波数整形型終端状態制御の

併用による 3 慣性ベンチマーク問題の一解法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 12, pp. 861-868 (2014), 査読有

[2] 岡島寛, 西村悠樹, 松永信智: モデル誤差抑制補償に基づく非線形システムのフィードバック線形化, 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 12, pp. 869-874 (2014), 査読有

[3] 梅井啓紀, 岡島寛, 松永信智, 浅井徹: モデル誤差抑制補償器の多入出力システムに対する設計, システム制御情報学会論文誌, Vol. 27, No. 2, pp. 67-72 (2014), 査読有

[4] 丸野裕太郎, A. T. Zengin, 岡島寛, 松永信智, 中村憲仁: モデル誤差補償による福祉用前輪駆動型パーソナルビークル STAVi の操縦特性の改善, JSME(C 編), Vol. 79, No. 808, pp. 4721-4733 (2013), 査読有

[5] A. T. Zengin, Y. Maruno, H. Okajima, N. Matsunaga: Maneuverability Improvement of Front-Drive-Type Electric Wheelchair STAVi; SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 6, pp. 419-42 (2013), 査読有

[6] H. Okajima, H. Umei, N. Matsunaga and T. Asai: A Design Method of Compensator to Minimize Model Error; SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 6, No. 4, pp. 267-275 (2013), 査読有

[学会発表](計 11 件)

[1] T. Sugano, Y. Dan, H. Okajima, N. Matsunaga, Z. Hu, Indoor Platoon Driving of Electric Wheelchair with Model Error Compensator along Wheel Track of Preceding Vehicle, The 5th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, 2014 年 5 月 28 日, 査読有

[2] K. Nabekura, H. Okajima, N. Matunaga and N. Nakamura, On Collision-Avoidance Steering Assistance of Piggyback Type Electric Wheelchair with Inference of Driver's Intention, ICT-PAMM Workshop on Mobility Assistance and Service Robotics, p20-25, 2013 年 11 月 9 日, 査読有

[3] Y. Maruno, Y. Dan, A. T. Zengin, H. Okajima, N. Matsunaga, Maneuverability Analysis of Front Drive Type Personal Vehicle STAVi using Modeling Error Compensation System, 7th IFAC Symposium on Advanced in Automotive Control, 2013 年 9 月 7 日, 査読有

[4] 奥村, 岡島, 松永: センサノイズを伴う制御系に対するモデル誤差抑制補償器の設計, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会(2015 年 5 月 20 日~22 日, 大阪) Proceeding of the 59th Annual Conference of the Institute of Systems, Control and Information Engineers (ISCIE), Osaka, May 20-22, 2015 講演番号: 124-3, 査読無

[5] 金丸瑛佑, 岡島寛, 松永信智: VTOL 機に対するロバストな飛行制御系の設計, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 731-4, 2015 年 3 月 7 日, 査読無

[6] 一政豪, 岡島寛, 松永信智: 温度制御系に対するモデル誤差抑制補償器の設計, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 511-4, 2015 年 3 月 4 日, 査読無

[7] 金丸瑛佑, 岡島寛, 松永信智, ロバストな入出力線形化手法を用いた油圧システムの制御, 第 32 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 201A2, 2014 年 11 月 30 日, 査読無

[8] 一政豪, 岡島寛, 松永信智, 2 自由度 IMC 構造を用いた温度制御系の設計, 第 32 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 201A1, 2014 年 11 月 30 日, 査読無

[9] 岡島寛, 松永信智, モデル誤差抑制補償器の非最小位相系に対する構成, 第 57 回自動制御連合講演会, 2014 年 11 月 10 日~12 日

[10] 岡島寛, 松永信智, モデル誤差抑制補償器に基づく自動車のロバスト経路追従制御系の設計, 第一回制御部門マルチシンポジウム, 2014 年 3 月 4 日, 査読無

[11] 藤岡巧, 岡島寛, 松永信智, 終端状態制御とモデル誤差抑制補償器によるロバスト制振制御, 第 56 回自動制御連合講演会, 1030, 2013 年 11 月 16 日~17 日, 査読無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡島 寛 (OKAJIMA HIROSHI)
熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 40452883