

令和元年6月14日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14286

研究課題名（和文）有限個周波数応答モデルを用いたノンパラメトリック制御系設計法の開拓

研究課題名（英文）Development of controller design methods using non-parametric system models represented by a finite number of frequency responses

研究代表者

延山 英汰（NOBUYAMA, Eitaku）

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：50205291

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、有限個周波数モデルというノンパラメトリックモデルを用いた新たな制御系設計法を提案することを目的とし、ロバスト制御に関する研究成果を得た。具体的には、ロバストPID制御器の設計法、固定次数制御器を用いたロバスト制御系設計法等を開発し、数値実験でその有効性を確認した。さらには実機への応用として、磁気浮上系に対して本研究で開発したロバストPID制御器設計法を適用し、実機実験においても良い制御性能を達した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、ノンパラメトリックモデルである有限個周波数応答モデルを制御対象のモデルとして使うことにより、ロバストPID制御器設計や固定次数制御器を用いたロバスト制御系設計が凸最適化問題として定式化することができることを示した点にある。また、有限個周波数応答モデルは実験データから直接導出することができる等の特質により、本研究で開発した設計法は現実の制御対象に適用することが容易であり大変実用的である。この点において、本研究で得られた成果は社会的意義も高い。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research project is to develop controller design methods using non-parametric system models which are represented by a finite number of frequency responses. The research outcomes are as follows: Robust PID controller design methods for the non-parametric system models are developed and their effectiveness is confirmed by some numerical examples. Moreover, to improve the performance of the closed-loop systems robust control design methods with fixed-order controllers are also developed. Because the fixed-order controllers include more design parameters than PID controllers, the fixed-order controllers can achieve the better performance than PID controllers. The effectiveness of robust control with fixed-order controllers are demonstrated by some numerical examples.

研究分野：制御工学

キーワード：制御系設計 PID制御 ロバスト制御 凸最適化 ノンパラメトリックモデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の著しい計算機の発展により、様々な分野で計算機パワーを活用した新しい方法論が登場している。制御工学分野においては、1990年頃のLMI(線形行列不等式)最適化の登場が計算機活用を前提とした新しい制御系設計パラダイムを創出し、制御工学の発展に大きく寄与した。そうした流れの中、本研究開始のきっかけとなったのは、計算機パワーをさらに活用した制御系設計として、ノンパラメトリックモデルに基づく制御系設計が新しい制御系設計パラダイムを創出する可能性があるものと考えに至ったことである。特に、本研究で対象とするノンパラメトリックモデルである「有限個周波数応答モデル」は、これまで国内外で「スペクトルモデル」として呼ばれ、特別な制御問題に適用した研究があったが、それらをより広い一般的な対象や問題を扱い体系化することにより、これまでにない実用的な制御系設計法を体系的に構築できるものと期待された。

2. 研究の目的

上記の背景により、本研究では、有限個周波数応答モデルを用いた制御系設計法を体系立てていくことを目的とし、特に、PID制御器や固定次数制御器を用いた制御系設計法等を開発することを本研究期間での具体的な目的とする。また、有限個周波数応答モデルを用いることの重要な特徴の一つは、むだ時間を含むシステムと含まないシステムを区別せずに同じ枠組みで制御系設計ができるということにあり、この特徴を活かした制御系設計法として、むだ時間を含むシステムへの適用のみならず、むだ時間を制御器に含めて利用する繰り返し制御系の設計法にも展開していく。

3. 研究の方法

本研究で与える制御系設計法の骨子は、対象とする制御系設計問題を凸最適化問題に帰着させることにある。凸最適化問題は数値的に容易に解を得ることができることから、問題を凸最適化問題に帰着することができれば、制御系設計法を開発できたことになる。そのため、本研究では、対象として考える制御系設計問題を定式化し、それを数学的な考察により凸最適化問題に帰着させていくという方法をとる。そして、その設計法の有効性を数値実験することにより確かめる。

4. 研究成果

本研究の主な成果として、ロバストPID制御器設計法、ロバストI-PD制御系制御器設計法、固定次数制御器を用いたロバスト制御系設計法、繰り返し制御のためのPID制御器設計法の開発と実機である磁気浮上系への適用がある。以下では、それらの内のいくつかを説明する。

(1) ロバストPID制御器設計

有限個周波数応答モデルとは、指定された複数の周波数とそれに対する周波数応答の組で与えられるものであり、周波数応答実験等の実験データから直接導出することもできるし、伝達関数が事前に与えられた時にはそれから計算して導出することもできる。現実の制御対象を考えた場合、実験条件や環境の違い、あるいは実験誤差等により、同じ制御対象の場合でも、実験を行うたびに異なる実験データが得られることになり、一つの制御対象に対して複数のモデル(ここでは有限個周波数応答モデル)が得られることになる。本研究では、これらの複数のモデルの中の一つの特定のモデルを対象として制御器を設計するのではなく、複数のモデルすべてを同時に制御するというロバスト制御の観点でPID制御器を設計する方法を開発した。具体的には、図1で示すフィードバック制御系において、制御対象は複数の有限個周波数応答モデルとし

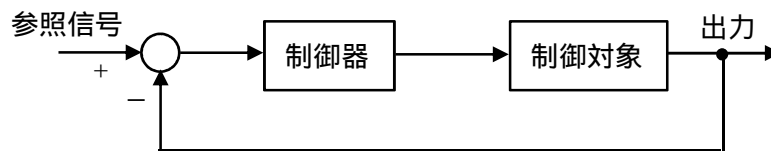


図1 フィードバック制御系

て与えられ、制御器をPID制御器としたとき、フィードバック系の安定性を保ったうえでかつ出力信号が参照信号に追従するようなPID制御器を設計する問題を定式化し、それを凸最適化問題に帰着した。具体的には、フィードバック系の安定性を保つための条件として、ナイキスト安定判別法を利用し、複数の有限個周波数応答モデルを複素平面上でプロットした時の点群がある直線の下にあるという制約条件で表し、それが凸制約条件となることを示した。そして、制御性能としては、参照信号から出力までの性能が望ましくなるようなモデル伝達関数に閉ループ伝達関数が近づけるようなモデルマッチング評価関数を最小化することを考えた。それらを合わせ、設計法としては、フィードバック系の安定性を確保するという制約条件の下でモデルマッチング評価関数を最小化するという凸最適化問題として定式化するという形で提案した。

図2~4に本設計法を適用した場合の数値実験の結果を示す。ここでは、参照信号は単位ステップ信号であるとし、図2は制御対象のステップ応答を示している。制御対象はマス・バネ・ダ

ンパ系の2次系であり、減衰係数と自然角周波数が異なる6つの伝達関数で与えられており、6つのステップ応答は大きく異なるものとなっている。図3、4は、この6つの伝達関数を同時に制御する一つのPID制御器を本研究で提案する設計法で設計した結果で得られた応答である。本設計法は、同じ設計法で制御対象がむだ時間を含むシステムもむだ時間を含まないシステムにも適用できるものであり、図3はむだ時間を含まないシステムに適用した場合、図4は図3の場合のむだ時間を含むシステムに0.4~0.7秒のむだ時間を含ませたものを制御対象とした場合である。図中の赤線はモデル伝達関数のステップ応答を示している。図3のむだ時間を含まないシステムに適用した結果を見ると、制御対象を表す6つのステップ応答(図2)には大きくばらつきがあるのに対して、本設計法の結果に得られたPID制御器を使ったフィードバック系のステップ応答(図3)はばらつきが抑えられ、望ましいステップ応答(赤線)に近づいていることがわかり、本設計法の有効性が確認できる。さらに、図4はむだ時間を含むシステムに適用した場合を示している。むだ時間を含まない図3の場合に比べてばらつきはあるが、この場合も望ましいステップ応答(赤線)に近づいていることがわかり、むだ時間を含むシステムに対しても本設計法が有効であることがわかる。

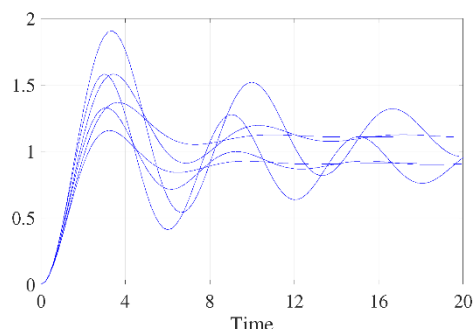


図2 制御対象のステップ応答

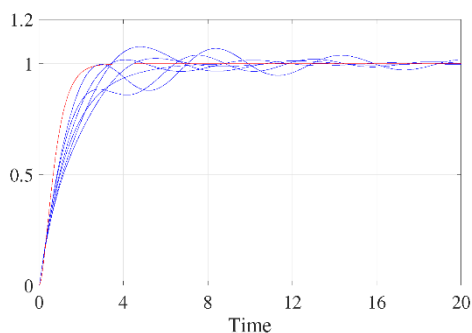


図3 むだ時間を含まない場合

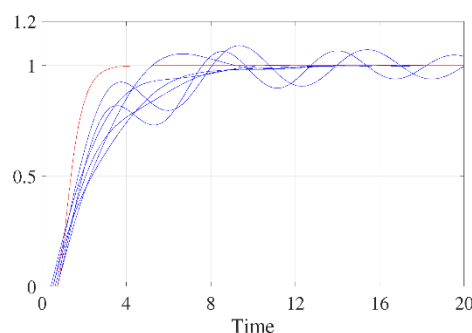


図4 むだ時間を含む場合

(2) 固定次数制御器を用いたロバスト制御系設計

上記の説明したようにロバストPID制御器設計法を凸最適化問題に帰着させる方法を本研究で開発したが、PID制御器は制御器としての設計パラメータの数が高々3つと少ないことから、制御対象によっては良い制御応答が得られるとは限らない。そこで、設計パラメータの数を増やしてより良い応答を得ることを目的とし、設計法を固定次数制御器を用いる場合に拡張した。固定次数制御器は、設計者が予め決めた次数の制御器を用いる方法であり、設計パラメータの数を自由に選ぶことができる(たとえば2次の制御器の場合、最大4つの設計パラメータがあり、3次の制御器の場合、最大6つの設計パラメータがある)。しかし、PID制御器の場合と大きく違うのは、PID制御器の設計パラメータが制御器の分子にのみ含まれるのに対して、固定次数制御器の場合には、設計パラメータが制御器の分子のみではなく分母の方にも含まれるという点にある。PID制御器を用いた場合にフィードバック制御系の安定性を保つための条件を凸制約条件に帰着できたのは、設計パラメータが制御器の分子のみに含まれるという性質によるものであったため、その帰着方法を固定次数制御器の場合に単純に拡張することはできない。そこで、本研究では、PID制御器の場合に用いたナイキスト安定判別法をそのまま用いるのではなく、その根底にある考え方に戻り、固定次数を用いた場合のフィードバック制御系の安定条件を新たに導き出した。この結果が得られたことにより、固定次数制御器を用いた場合においても、PID制御器を用いた場合のときと同じように、固定次数制御器を用いたロバスト制御器設計を凸最適化問題に帰着することに成功した。

図5~7に本設計法を適用した場合の数値実験の結果を示す。図5は、制御対象のステップ応答(青線)と望ましいステップ応答(赤線)を示している。ここでは、制御対象のモデルは、9つの伝達関数として与えられている。図6は、ロバストPID制御器設計法を用いた場合のフィードバック系の応答を示している。安定性は確保されているが、

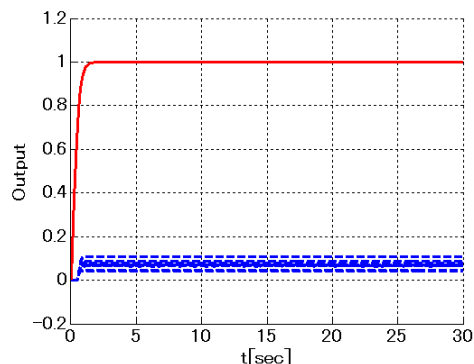


図5 制御対象のステップ応答

応答は大きく振動しており、PID制御器の限界を示している。それに対して図7は固定次数制御器を用いた場合のフィードバック系の応答を示している。ここでは、3次の固定次数制御器を用いている。図6に比べて振動が抑えられ、望ましいステップ応答に近づいており、設計パラメータを増やして設計した効果が確認できる。

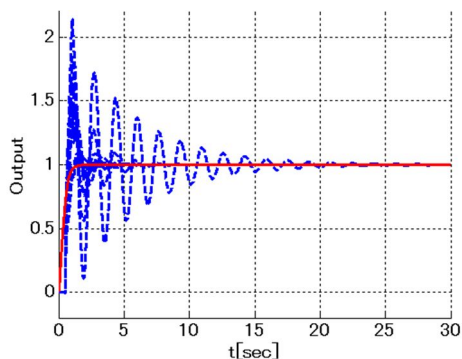


図6 PID制御器を用いた場合

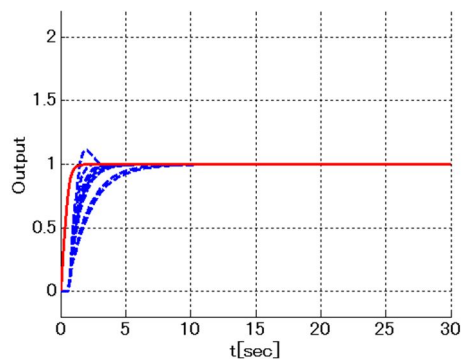


図7 固定次数制御器を用いた場合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

上泰, 田中椋祐, 三谷祐一郎, 延山英沢, 入力信号から構成した有限個周波数応答モデルによるPI-D制御系の設計, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 139, No. 4, 2019, pp. 402-408
DOI: 10.1541/ieejc.139.402

〔学会発表〕(計4件)

Eitaku Nobuyama, Yuki Sakamoto and Kosuke Sakiyama, PID Controller Design for Repetitive Control Using a Finite Number of Frequency Responses Models, ICT-ROBOT 2016, 査読無, 2016

向山虹祐, 延山英沢, 上泰: 有限個周波数応答モデルを用いたロバストPI-D制御器の設計, 第60回自動制御連合講演会, 査読無, 2017

Yuki Sakamoto, Eitaku Nobuyama and Yasushi Kami, Robust Controller Design with Fixed-Order Controllers Using FNFR Models, The 2017 Asia Control Conference, 査読有, 2017

Eitaku Nobuyama and Yasushi Kami, Robust PID Controller Design for Both Delay-Free and Time-Delay Systems, The 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional - Integral-Derivative Control, 査読有, 2018 (IFAC-PapersOnLine, pp. 930-935, 2018, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.06.103)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 上 泰

ローマ字氏名: (KAMI, Yasushi)

所属研究機関名: 明石工業高等専門学校

部局名: 電気情報工学科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 20413809

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。