

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420419

研究課題名（和文）過渡応答データに基づく可視化技術を用いたパラメータ空間設計法の構築

研究課題名（英文）Construction of a parameter space design method using visualization technology based on transient response data

研究代表者

佐伯 正美（Saeki, Masami）

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号：60144325

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）：過渡応答，極配置，ロバスト感度などの複数の制御系設計仕様を同時に満たす制御器を求める問題に対し，新しいパラメータ空間設計法を提案し，設計ツールボックスをMATLAB上で開発した．この方法は医療のMRIデータの可視化に用いられているボリュームレンダリングを利用している．設計制約を満たす制御系パラメータの許容集合が3次元パラメータ空間内の物体としてディスプレイ上に可視化される．

研究成果の概要（英文）：A novel parameter space design method is proposed and a design toolbox is developed using MATLAB. This method utilizes volume rendering, which has been used for visualization of MRI medical data. This method can treat design problems of finding three design parameters that satisfy more than one control-design specifications such as transient response, pole-assignment, robust sensitivity, and so on simultaneously. Permissible sets of design parameters that satisfy design constraints are visualized as objects in 3 dimension parameter space on a display.

研究分野：制御工学

キーワード：制御系設計 可視化 パラメータ空間 並列計算

1. 研究開始当初の背景

モデルの不確かさを考慮できるロバスト制御系設計法は実用性が高いが、モデルの同定と設計の試行錯誤に多くの労力が割かれており、試行錯誤が少ない方法の開発が望まれる。また、非線形制御理論では数式モデルに基づく安定解析や安定化法が主に研究されており、バックラッシュやむだ時間などを含む複雑で非線形な制御対象に対する設計法はない。

このような現状を打破するひとつの研究方向として、数式モデルを介さないデータ駆動制御系設計法の構築の研究は重要と考え、著者らはステップ応答のような過渡応答データを用いたデータ駆動設計法の研究をおこない、PID制御器に対してパラメータ平面法(図1)や数値最適化法を提案した。これらの方法では、PIDゲインが $f=[K_p, K_i, K_d]$ で表されるととき、過渡応答データを用いて表された安定度制約式の下で、外乱抑制の最適化のために積分ゲイン K_i を最大化している。

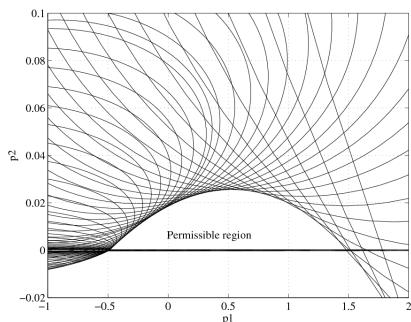


図1 パラメータ平面上的許容集合の表示の例(従来法)

一般に数値最適化法では非凸問題や同時最適化問題の扱いが困難で、大局的に解の性質を知ることができない。パラメータ数が2の場合にはパラメータ平面法はこのような欠点がなく優れている。改善すべき点として、PIDゲインの許容集合の断面を (K_p, K_i) 平面と (K_p, K_d) 平面に交互に表示するため領域の認識が容易でない点やPID制御器しか扱えない点が挙げられる。そこで、3つのパラメータが扱え、より広いクラスの制御器や設計問題に適用できるようなパラメータ空間法を構築することが必要であった。

従来のパラメータ空間法は、制約を表す方程式を解くことで、許容集合の境界の一部を構成する曲線を求めていた。しかし、多くの設計仕様で方程式が解けない問題や、図1のようにパラメータ平面に複数の線が描かれるだけで許容領域が陽に描画されない問題があった。

このような方法をパラメータ数が3の場合に拡張することは極めて困難と考えられ、別の新しい考え方が必要であった。一方、3次元の可視化は、医療現場でのCTやMRI画像に使われ、計算機の高高速化やソフトウェア

の整備が進んでいた。

このような経緯から3Dの描画技術をパラメータ空間に適用する方法を明らかにし、新しい解析設計法の構築を検討することとした。研究はデータ駆動設計から始まったが、モデルに基づく設計問題が主流であるので、これも検討することとした。

2. 研究の目的

制御系の設計仕様には、極配置、過渡応答、ロバスト安定度、2次評価関数などがあり、制御系の解析や設計では、これらを同時に満たす制御器のパラメータや制御対象のパラメータを見つけることが要求される。

PID制御器や位相進み・遅れの補償器は3つの主要なパラメータを含んでおり、これらを3次元のパラメータ空間で扱えるようなパラメータ空間法を開発することは有意義である。

各設計仕様を満たすパラメータの許容集合はパラメータ空間内で物体として認識できるので、それを2次元平面上に描画するGUIシステムを開発する。そのようなシステムを用いることで、ちょうど医師がMRI描画システムを用いて診断するように、許容集合の描画の拡大や回転が自在に行え、全体像を容易に認識できることが期待される。

そのためには、研究背景で述べたように、新しい方法では領域を陽に描画できることが重要である。また、従来のパラメータ空間法では扱えなかった種々の設計仕様や制御問題に適用可能な柔軟性の高い方法であることも重要である。

MRI画像の描画法について調査した結果、ボリュームレンダリングが用いられていることが分かった。この方法はボリュームデータを求め、それをレンダリングすることで可視化する方法である。MRI画像では測定データからボリュームデータが得られるが、制御系設計では数値計算で生成する作業が必要である。

具体的には、図2のように描画範囲を直方体で指定し、その中に格子点を与えて、それらのすべての格子点で設計仕様から得られたスカラー関数の値を計算する。計算結果のリストがボリュームデータである。

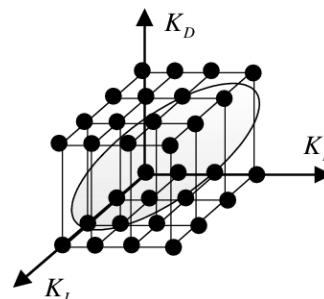


図2 格子点と許容領域

関数は陽に式で与えられなくても、値が得られればよい。この方法では方程式を解かないので適用範囲が広いが、一方、計算量が多く計算時間などの評価と短縮の検討が必要であることがわかった。これらの課題を解決し使いやすい GUI システムを最終的に構築することが目的である。種々の設計仕様について検討することになる。

3. 研究の方法

研究目的で述べたように、MRI 画像の描画にはレンダリングが用いられている。設計仕様から得られるスカラー関数の値を各格子点で計算する。制御系設計に関して関数の計算を明らかにし、計算時間を調べて実用性を明らかにする。また、各格子点での計算は独立性が高いので、並列計算が適していると考えられるので、その可能性を評価する。並列計算では、通常の for ループによる計算、MATLAB の Parallel Computation Toolbox の parfor ループによるマルチコア計算、同様に GPU を用いた並列計算を行い、プログラミングの可能性と計算時間からの実用性を明らかにする。

以下の設計問題を取り上げて上記の観点から検討した。

- (1) データ駆動設計においてプラントの過渡応答データを用いて感度関数の 12 ゲインを評価し、その評価値が指定値以下となる PID ゲインの集合を描画する。
- (2) 線形制御器には本質的な制御性能限界がある。図 3 のゲインと位相を独立に調整できる SPAN 非線形制御器を用いて性能限界を超える制御器をパラメータ空間法で設計する。数式モデルのシミュレーションにより過渡応答を用いて評価する。
- (3) 図 1 は従来の周波数応答に基づくロバスト PID 制御器の設計問題で描かれた図である。この同じ問題に対して 3D パラメータ空間設計を行う方法を検討する。
- (4) 制御対象が線形時不変系で与えられるとして、閉ループ系の極を指定領域内に指定する PID 制御器などに含まれる 3 つの調整パラメータを決定する。
- (5) パラメータ空間法では描画範囲を直方体で指定するが、その適切な与え方を静的出力フィードバック系の安定ゲイン集合について検討する。

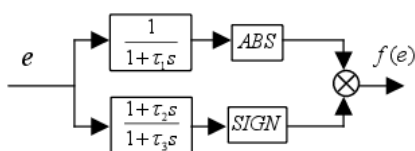


図 3 SPAN 非線形制御器

4. 研究成果

制御器のパラメータ空間設計法にボリュームレンダリングを利用した研究は今までにない。この方法は計算機の高速度化、並列計算、GPU によるグラフィックの高速描画などの技術環境の変化が追い風となっており、提案法が現在の技術で十分に実現できることを本研究で示した。3 つのパラメータを試行錯誤で決定することは至難の業であり、提案法はその労力を大幅に低減するものである。パラメータ数が 3 に制限されるが、制約を満たす解集合を可視化することは、厳密な解析や設計の補助的ツールとして十分に有用と考えている。制御系の解析と設計に限らず、パラメータ集合を可視化したい場合には、本方法は簡便なツールとなると期待している。そのような使用を意図して描画の GUI ツールをホームページで公開した。

3 章の研究の方法で述べた (1) ~ (5) (以下、これらを 3-(1) ~ 3-(5) と表記する) を検討した成果の詳細を以下の (1) ~ (5) に記しておく。

- (1) ボリュームデータの計算では、MATLAB の for ループでプログラムを作成すると、parfor ループを用いたプログラムは直ちに行えることが分かった。これに対して、Parallel Computation Toolbox の GPU のプログラムは関数の引渡しに配列が使えないなど制約が大きく、プログラムを工夫することで、3-(1) の 12 ゲインの評価と 3-(3) の周波数応答のゲインの評価には適用できたが、3-(2) のシミュレーションや 3-(4) の極配置の固有値計算には適用できなかった。MATLAB を用いないで C 言語での並列計算を固有値の計算を例題として専門家グループに検討してもらった (学会発表 3)。この方法は汎用性が高いが MATLAB の各種機能が使えないので、開発コストや専門知識が必要である。

- (2) ボリュームデータの計算時間では 4 コアの parfor の並列計算では for ループに比べて 3 倍程度高速化できた。GPU でプログラムできた計算では桁違いの高速化が達成できた。格子点数が多いほどに描画が精密化されるので、GPU による高速化の環境整備が必要であることを確認した。for ループではシミュレーションや 12 ゲインの計算は計算時間がかかるが、行列の固有値計算はさほど計算時間がかからなかったので parfor でも十分であった。3-(2) の非線形系のシミュレーションは simulink で並列計算を行うと計算時間が膨大となるので、計算精度を犠牲にして MATLAB で差分近似した式の逐次計算をおこなったことから、シミ

ュレーションの高速並列計算環境が望まれる。

- (3) (2)の計算時間の定量的な値の例を示す。3-(2)の非線形シミュレーションでは、格子点数が114885点の場合に、for ループでは2408秒、12コアの計算機でparforを用いて324秒必要であった。MATLABではGPUプログラムは作成できなかった。3-(3)の場合の数値実験では、デスクトップパソコンで、格子点数が29791のときにマルチコアで345秒に対しMATLABのGPUで0.16秒であった。また、3-(4)の極配置のための固有値計算では、5次の正方行列の固有値を計算する場合に、格子点が76800点として、for ループで3.764秒、parfor ループで1.474秒であり、十分に速く計算できた。

- (4) ボリュームデータが与えられれば、MATLABのレンダリングにより3D空間内の集合が物体として2次元平面上に描画できる。各設計問題に対して描画のプログラムを開発した。特に、設計仕様の制約のパラメータを変更した場合に、許容領域の変化を実時間で観察するために、GUIシステムを開発した。図4にパラメータ空間に描画された図を示し、図5にGUIシステムの図を示す。スライダーを変えると物体の形状が実時間で変わる。描画機能は他の問題にも利用できるので、汎用性を意識してGUIシステムを開発し公開することとした。それに関しては[その他]に記載の通りである。

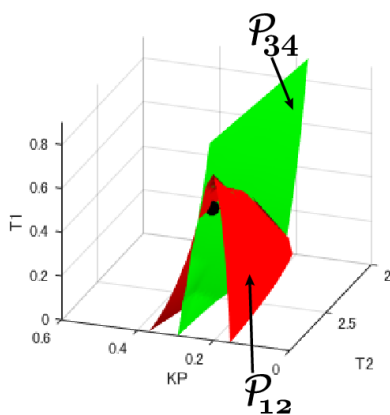


図4 レンダリングによる描画の例

- (5) 3-(5)で述べたように、直方体の描画領域を適切に指定する方法が今までなかった。閉ループ系の設計では安定化ゲイン集合内の要素を対象にするので、安定

化ゲイン集合を推定する方法を与えた。これは、図6に示すように、ひとつの安定化ゲインを与えて、安定化ゲイン集合内に一様に分布する点をランダムに生成する方法である(学会発表の文献1)。ランダムに生成する点数は500点程度であるので、格子点数に比べて遥かに少ない。このため、この計算は比較的短時間でできる。生成した点を含む直方体は容易に得られる。

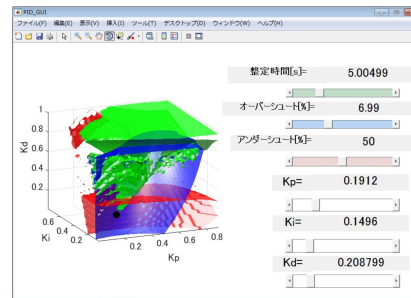


図5 GUIシステム

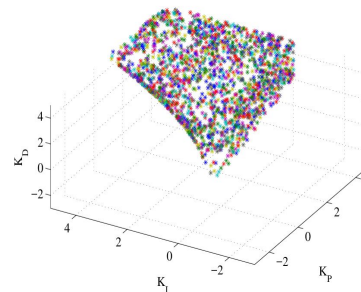


図6 描画領域の決定法

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 2件)

1. M. Saeki, N. Wada, S. Satoh, Stability analysis of feedback systems with dead zone nonlinearities by circle and Popov criteria, Automatica, Vol. 66, No. 1, pp. 96-100, 2016 (査読有)
2. 佐伯正美, 黒坂友亮, 和田信敬, 佐藤訓志, ボリュームレンダリングによる非線形フィルタのパラメータ空間設計, システム制御情報学会論文誌, Vol. 28, No. 10, pp. 419-425, 2015 (査読有)

[学会発表](計 6件)

1. 佐伯正美, 西野光哉, 廣田優史朗, 3Dパラメータ空間におけるPIDゲイン集合の可

視化, 第4回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 岡山, 2017年3月8日
2. 廣田優史朗, 佐伯正美, 西野光哉, ポリユームレンダリングによるPIDゲイン集合の3次元可視化 周波数領域における制御設計, 計測自動制御学会中国支部学術講演会, 東広島, pp. 180-181, 2016年11月26日
3. H. Tokura, T. Honda, Y. Ito, K. Nakano, M. Nishino, Y. Hirota, M. Saeki, GPU-accelerated bulk computation of the eigenvalue problem for many small real non-symmetric matrices, Fourth International Symposium on Computing and Networking, pp. 490-496, Higashi-Hiroshima, 2016年11月24日
4. 佐伯正美, データ駆動ループ整形法によるPID制御のための雑音フィルタ設計, 自動制御連合講演会, CD-ROM, 神戸, 2015年11月15日
5. 黒坂友亮, 佐伯正美, 和田信敬, 佐藤訓志, パラメータ空間設計法によるSPANフィルタの設計, 第57回自動制御連合講演会, 群馬, CD-ROM, 2014年11月12日
6. M. Saeki, K. Kondo, N. Wada, S. Satoh, Data-driven online unfalsified control by using analytic center, 53rd IEEE Conference on Decision and Control, Los Angeles (USA), 2014年12月15日

〔その他〕

ホームページで3次元空間内の集合を可視化するためのGUIシステムの説明とMATLABプログラムを公開しました。

http://home.hiroshima-u.ac.jp/saeki/index_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐伯 正美 (SAEKI MASAMI)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 60144325