

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06496

研究課題名（和文）モデルベース設計とデータ駆動設計の長所を生かした制御系設計法の構築

研究課題名（英文）Construction of a control system design method that utilizes the advantages of model-based design and data-driven design

研究代表者

佐伯 正美（Saeki, Masami）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・名誉教授

研究者番号：60144325

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：プラントの入出力応答を用いてPID制御器のような簡便な制御器をオフライン調整するデータ駆動設計は不安定・振動的なプラントに適さない。この問題に対処するために、モデルベース設計でプラントをロバスト安定化し、その閉ループ系にデータ駆動設計を適用する2段階の方法を提案した。モデルベース設計ではデータ駆動設計に適した安定化制御器の実装法を与えた。データ駆動設計ではPIDゲイン集合をパラメータ空間で描画する方法や入出力応答データを用いたシステムゲインの評価法を与え、従来の設計法を多入出力系に拡張した。これらを組み合わせた2段階法の有効性を数値実験で示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

モデルベース設計の成果によりオーバーシュートの小さい目標値応答を与えるロバスト安定化制御器の簡便な実装が可能となり、データ駆動設計の成果によりステップ応答を用いたシステムゲインの下界の評価や既存のデータ駆動設計のゲイン調整法の多入出力系への拡張が可能となった。モデルベース設計を併用することでデータ駆動設計を不安定、非最小位相系などを含む幅広い制御対象に適用可能となった。

研究成果の概要（英文）：Data-driven design, in which a simple controller such as a PID controller is adjusted off-line using the plant's input-output response, is not suitable for unstable and oscillatory plants. To deal with this problem, a two-step method was proposed in which the plant is stabilized by model-based design and data-driven design is applied to the closed-loop system. In the model-based design, an implementation method of stabilized controllers that are suitable for data-driven design was presented. In data-driven design, a method for drawing PID gain sets in parameter space and a method for evaluating system gains using input-output response data were presented, and the conventional design method was extended to multi-input-output systems. Numerical experiments showed the usefulness of the two-step method.

研究分野：ロバスト制御系の解析と設計法およびデータ駆動設計法の研究

キーワード：データ駆動設計 ロバスト制御 2自由度系 ループ整形 パラメータ空間設計 H 制御 システムゲイン

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

制御対象を数式モデルで記述し制御器を設計するモデルベース設計は最も標準的であり、線形時不変系に対し、古典制御から現代制御を経て  $H^\infty$  制御理論が 1990 年ごろに完成した。この理論は制御系のロバスト安定化や外乱抑制などに強力な設計法を提供するが、数式モデルの同定とモデル誤差の扱いに高度な知識を要し、産業応用の PID 制御のゲイン調整には適用できない。そこで、安定な制御対象の入出力応答から PID 制御器に代表される簡単な構造の制御器のゲイン調整を行う方法が検討された。この種のデータ駆動設計は 20 年以上研究されてきた。代表的な方法である VRFT (Virtual reference feedback tuning) では、スカラー系の制御対象に対して、一巡ループ伝達関数と望ましい閉ループ系のそれとの差の評価関数を最小化するように、制御器にアフィンに含まれるパラメータを最小二乗法で決定している。この方法の多変数系への拡張では近似的に最小二乗法に帰着する方法が提案されており、それは行列の非可換性の制約から不完全なものである。これらはモデルマッチングによるオフラインゲイン調整法であり、制御対象が不安定や非最小位相の場合には適用が困難である。

以上のように、モデルベース設計は標準的で強力であるものの、モデル誤差により制御対象の数式モデルの同定と制御器設計の試行錯誤が必要になる場合が多く、データ駆動設計はこの労力を大幅に軽減できると期待されるが、適用可能な制御対象のクラスが限定的で特に不安定な制御対象への適用が困難である。そこで、図 1 のように、悪特性の制御対象  $P$  を安定で非振動的なフィードバック系となるように制御器  $K$  をモデルベースで設計し、このフィードバック系に対し望ましい特性  $y = Mr$  を実現する制御器  $F$  をデータ駆動で設計する 2 段階法により試行錯誤の軽減を図り、それらの設計法の長所を生かした設計法を構築することとした。

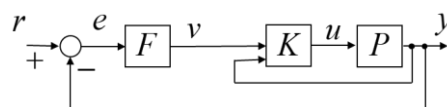


図 1 2 段階設計のシステム構成

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、数式モデルによるロバスト安定化設計とデータ駆動設計の長所を生かした制御器設計法を検討し、モデルベース設計でロバスト安定化されたフィードバック系を制御対象として、データ駆動設計法で望ましい目標値応答を実現する PID ゲインを調整する 2 段階法を構築することである。各設計法に関する研究目標を以下に述べる。

ロバスト安定化に  $H^\infty$  ループ整形を用いることとした。この方法はモデル誤差の定量的評価を必要とせず、不安定・非最小位相系を含む幅広い対象に適用可能である。 $H^\infty$  ループ整形制御器を単一フィードバック系に実装するとステップ目標値応答はオーバーシュートが過大になりやすくデータ駆動設計に不適なので、そのようなにならない新しい実装方法の開発を 目標 A とした。データ駆動設計に VRFT 法を用いることとした。この方法は十分に安定な最小位相系に適しており、スカラー系に対しては適用事例も多い。VRFT で得られた系が安定であることは保証されない。そこで、ひとつの目標は VRFT にロバスト安定制約を付加した設計法の構築である。すでに、ロバスト安定性を考慮したデータ駆動設計は提案されていたが、その方法ではシステムゲインを評価するための入出力応答が豊富に必要とされたので、ステップ応答からシステムゲインの下界を評価する方法の開発を 目標 B とした。さらに、VRFT を多入出力系に適用する方法は行列の可換性の制約から限られた設計仕様下でしか適用できていない。そこで、VRFT 法の多入出力系への拡張を 目標 C とした。上記の検討結果を用いて、ロバスト安定化した制御系にデータ駆動

設計を適用する方法の有用性を数値実験で検証することを目標 D とした。

### 3. 研究の方法

目標 A では、 $H_\infty$ ループ整形の制御器の実装法として、単一フィードバック系(システム A)、オーバーシュートの小さい既存のフィードバック系(システム B)、および、提案のフィードバック系(システム C)の 3 つを与え、閉ループ伝達関数の共振ピーク値の大きさの上界の評価式を与えた。数値実験により、数種の線形時不変系に対して数値実験で評価値と実値を比較検討した。これにより、新たに提案した  $H_\infty$ ループ整形の制御器の実装法が優れていることを確認した。

目標 B では、入出力応答の  $l_2$  ノルムの比で  $l_2$  ゲインの下界を評価する方法を採用した。ステップ応答だけでは精度が悪すぎるので、ステップ応答データをフィルタリングすることで仮想的な入出力応答を多数生成する方法を適用した。フィルタリングには多数の異なる共振ピークを有する線形フィルタを用いて推定精度を高めた。この方法を PID 制御器のパラメータ空間設計に用い、数値実験により 3D 空間内で許容領域を可視化した。

目標 C では、VRFT の多入出力系への拡張のために各目標信号に独立にステップ入力を加える方法を提案した。これにより、評価関数や制御器の制約が除去され、有用性を数値実験で示した。

目標 D では、VRFT に目標 B で得られたゲイン評価法を用いてロバスト安定の必要条件を導出し、その制約下で VRFT の評価関数を最小化する PID ゲインを求める数値最適化問題に帰着した。また、目標 A の  $H_\infty$ ループ整形制御器の実装で得られたシステム C に対し、ロバスト安定制約を付加したデータ駆動設計法を適用し、数値実験と温度制御実験で有用性を検証した。

### 4. 研究成果

#### (1) モデルベースド設計

追従制御のための  $H_\infty$ ループ整形制御器の実装方法を与えた。 $H_\infty$ ループ整形で設計された制御器を正規化左既約分解し、図 2 のブロック線図で実装することを提案した。ここに、プラント  $P_0$ 、重み  $W_1$ 、 $W_2$ 、制御器  $K = M_k^{-1}N_k$  である。この閉ループ系が最小位相であるための必要十分条件はプラントが最小位相系であることに等価である。目標値  $r$  から  $y_0$  への閉ループ伝達関数は共振ピークゲインが直流ゲインと等しく、これは共振ピークがないことを意味する。このため、この閉ループ系は VRFT のデータ駆動設計に適した低域通過型の動特性をもつ。数値例で 3 つの方法を比較し、図 3 の結果を得た。これは提案法のシステム C が最良の特性であることを示している。この成果は  $H_\infty$ ループ整形の新しい 2 自由度系の実装法としても有用性が高い。

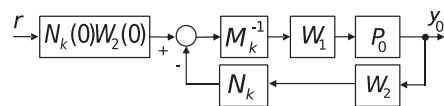


図 2  $H_\infty$ ループ整形制御器の新しい実装方法(システム C)のブロック線図

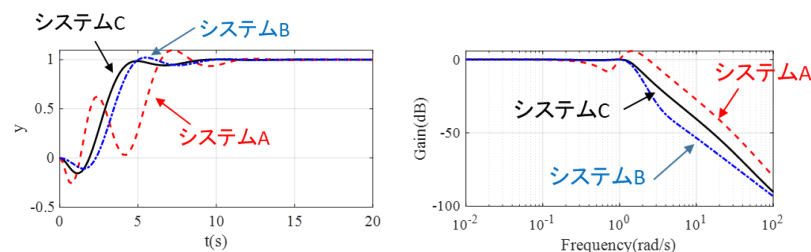


図 3 閉ループ伝達関数のステップ目標値応答とゲイン特性

システム A (単一フィードバック系), システム B (従来法), システム C (図 2 の系)

## (2) データ駆動設計

### ①パラメータ空間での制御ゲインの可視化

$H_\infty$ ループ整形の評価関数の下界を制御対象の入出力応答データを用いて評価する方法を与えた。この方法では、多数のバンドパスフィルタを通した入出力信号を用いることで下界値を真値にかなり近づけられることが数値実験で確認された。PID ゲインの直方体領域内のすべての格子点について評価関数値の下界を提案法で計算することで、ボリュームデータを生成した。それを用いて評価関数値を指定値以下にするような PID ゲイン集合を描画した。図 4 にゲイン集合の真の集合 (左側) と提案法で得られた下界の集合 (右側) を示す。この下界の集合は真の集合を含み、差が少ないほど高精度である。設計で解集合の存在領域の効率的な絞り込みに役立つ。

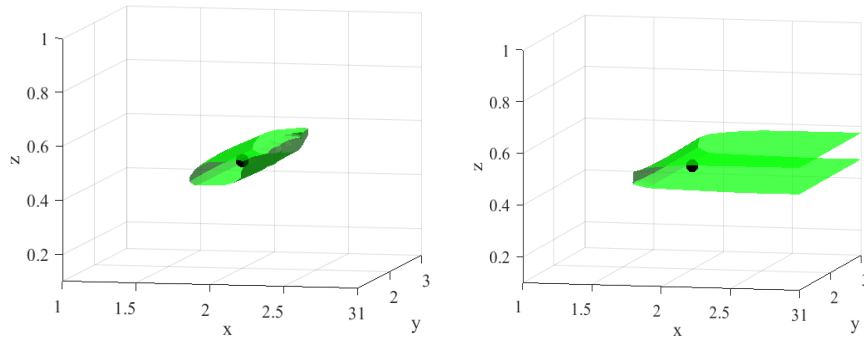


図 4 PID ゲインの集合 (a) 真の集合 (b) 入出力応答でから推定された集合

### ②バンドパスフィルタを用いた $H_\infty$ ノルムのデータ駆動推定

線形時不変系  $y = Gu$  の  $H_\infty$  ノルムの下界は長さ  $q$  の離散時間データ  $\pi_q y, \pi_q u$  を用いて、 $\|G\|_\infty \geq |\pi_q y|_2 / |\pi_q u|_2$  で評価される。ステップ応答を多数のバンドパスフィルタでフィルタリングしたデータを用いることで下界の推定精度が大幅に改善する。 $F^k(z) := [F(z, \omega_k/a)]^{n_f}$ ,  $k = 1, 2, \dots, n_\omega$  をフィルタとして用いる。ここに、 $F(z, \omega_n)$  はサンプリング周期  $h$  で連続時間系のフィルタ

$F_c(s/\omega_n) := \frac{s/\omega_n}{(s/\omega_n + \alpha)^2 + 1}$  を離散時間近似して得られる。有限長データのフーリエ変換では下界の計算

は厳密にはできないのに対し、提案法はそれが可能である点に優位性がある。

### ③安定な多入出力プラントに対するモデル参照制御器のデータ駆動調整

VRFT の考え方を多入出力系に拡張するために、多入出力プラントの各要素のステップ応答データを用いる方法を提案した。このクラスのデータを用いることで、パラメータをアフィンに含む制御器に対するモデルマッチング問題を線形最小二乗問題に帰着できることを示した。ステップ応答実験は入力数だけ必要であるが、評価関数や制御器のクラスに余計な制約は不要となる点に特長がある。

## (3) 2つの方法を併用したゲイン調整法

### ①ノイズフィルタを付加した PID 制御器のデータ駆動設計

制御器は  $\hat{K}(z) = F(z)K(z)$  で、 $K(z)$  は PID 制御器、 $F(z)$  は低域通過フィルタ  $\tilde{F}(s) = 1/(1 + T_f s + 0.5T_f^2 s^2)$  をゼロ次ホールド付きで離散時間近似したものである。調整パラメータは  $K_p, K_I, K_D, T_f$  である。測定雑音は PID 制御器の微分器で増幅されプラントへの操作入力を過大に変動させ、制御対象に悪影響を及ぼす。そこで、 $F(z)$  により雑音を低減する。1 入力 1 出力の安定なプラントに対し、安定度制約の必要条件式と雑音の制御入力への影響の近似式を応答データを用いて PID ゲインに関する線形行列不等式で表した。外乱抑制効果を積分ゲインの逆数で評価した。そこで、 $T_f$  に適当な値を与えて、これらの制約式下で積分ゲインを最大にする PID ゲインを凸最適化で求

める。最適な $T_f$ は設計者が与えた区間内の離散点の中から求める。図 5(a)のグラフから操作入力  
の振幅を表す $|u_m^2|$ が十分に小さくなる $T_f = 0.4$ におけるPID ゲイン値を用いると、図 5(b)に示  
すように測定雑音を抑制された操作入力を用いて十分に速いステップ目標値応答と外乱応答が  
得られる。

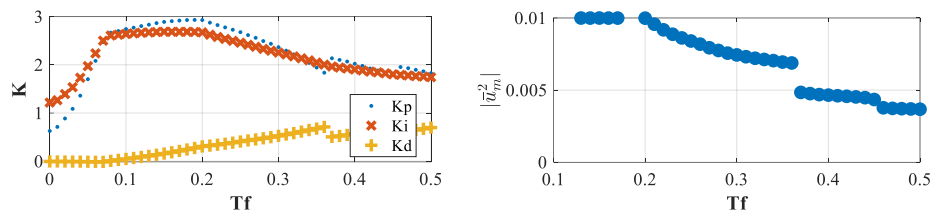


図 5 (a) フィルタ時定数に対するPID ゲイン最適値と入力振幅の評価値

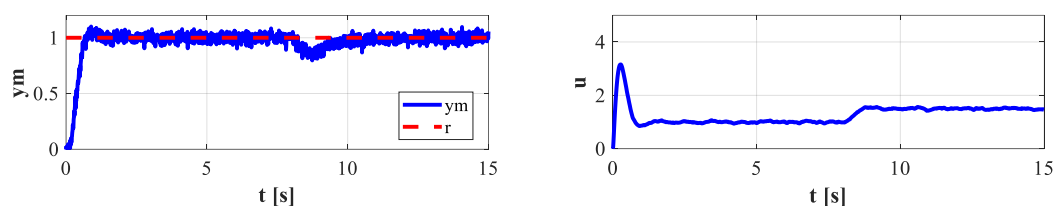


図 5 (b) ステップ目標値と外乱の応答波形 (プラント出力と雑音が抑制された入力)

### ②モデルに基づくロバスト安定化を併用したデータ駆動制御系設計

図1のフィードバック系で、(1)の①で提案したモデルベース設計法を適用して $K$ を設計した。  
これにより、 $v$ から $y$ への閉ループ伝達関数 $T_{yv}$ は共振ピークが存在しないロバスト安定なシステ  
ムとなる。この閉ループ系を制御対象として、ステップ応答データ $v, y$ を用いて、安定度制約付  
きのVRFTを用いてPID制御器 $F$ を設計した。数値実験では、VRFTが適用できない不安定非最小  
位相系に適用したところ、極めて良好な目標値応答が得られた。

$$P = \frac{-s+1}{s^3+1.7s^2-0.64s-0.08}, M = \frac{1}{(s+1)^2}$$

に対し、ステップ目標値と外乱に対する閉ループ系の応答を図6に示す。プラントの特性が変動  
して閉ループ系の応答が悪化した場合には、データ駆動設計によりPID制御器 $F$ を再調整するこ  
とで良好な特性を回復するが、特性変動が大きすぎる場合には $K$ の再設計が必要となる。

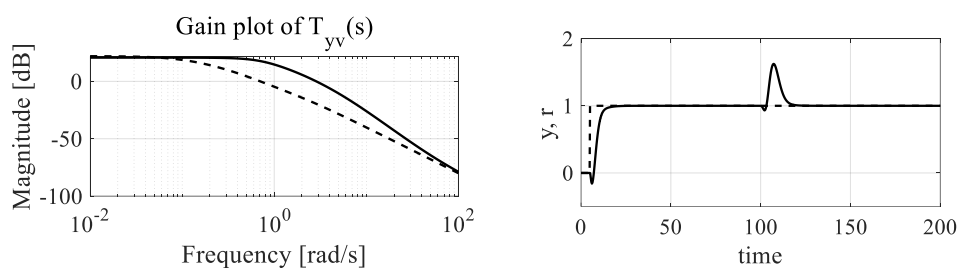


図 6 ゲイン特性 (実線 $T_{yv}$ , 破線 $P$ ) , ステップ目標値と外乱に対する応答

<引用文献>

- ① K. Zhou, J.C.Doyle, K. Glover, Robust and optimal control, Prentice-Hall, 1996
- ② M. C.Campi, A.Lecchini, S.M. Savaresi, Virtual reference feedback tuning: A direct method for the design of feedback controllers, Automatica, vol. 38, 2002, 1337-1346
- ③ L. Campestrini, D. Eckhard, L.A. Chia, E. Boeria, Unbiased MIMO VRFT with application to process control, Journal of Process Control, vol. 39, 2016, 35-49

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masami Saeki	4. 巻 117
2. 論文標題 Nonparametric methods for the estimation of L2 gain and gains at sample frequencies using bandpass filters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2020.108999	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 N. Wada, K. Satoh, M. Saeki	4. 巻 34
2. 論文標題 An LMI-based controller design method for a discrete-time linear system with time-varying state delays	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IMA Journal of Mathematical Control and Information	6. 最初と最後の頁 405-424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/imamci/dnv052	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Saeki	4. 巻 24
2. 論文標題 L1 synthesis of a static output controller for positive systems by LMI iteration	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Robust and Nonlinear Control	6. 最初と最後の頁 1319-1333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/rnc.3956	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 M. Saeki, K. Hinokimoto, N. Wada, S. Satoh	4. 巻 12
2. 論文標題 A data-driven design method of PID controller with noise filter	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 S71-S81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22552	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M.Saeki	4. 巻 131
2. 論文標題 Data-driven tuning of model-reference controllers for stable MIMO plants	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2021.109786	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 佐伯正美
2. 発表標題 安定な多入出力プラントに対する追従制御系のデータ駆動設計
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐伯正美
2. 発表標題 モデルに基づくロバスト安定化を併用したデータ駆動制御系設計
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐伯正美
2. 発表標題 H <sub>∞</sub> ループ整形設計に対するデータ駆動ゲイン調整
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐伯正美
2. 発表標題 H ループ整形で設計された制御器の実装方法
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯正美
2. 発表標題 バンドパスフィルタを用いたH ノルムとゲイン特性のデータ駆動推定
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	和田 信敬  (Wada Nobutaka)  (50335709)	広島大学・先進理工系科学研究科(工)・教授    (15401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------