

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560447

研究課題名（和文） アフィンな調整パラメータを有する非線形制御器のデータ駆動制御系設計論の構築

研究課題名（英文） Construction of a data-driven design method of a nonlinear controller that has affine tuning parameters

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

研究成果の概要（和文）：安定度制約下で外乱抑制を達成するデータ駆動ループ整形法を非線形系の制御器設計に適用する方法を検討し、以下の成果を得た。バックラッシュなどの非線形要素を含む制御対象に対し PID 制御器が設計できることを数値実験で示した。設定値により平衡点が大幅に変動する制御対象に対しゲインスケジュールド制御器の一構成法を与えた。プラント出力の多項式で表される非線形補償器のアフィンパラメータの設計法を与えた。パラメータ許容集合を 3D 空間に表示する方法を提案し基礎的検討をおこなった。

研究成果の概要（英文）：Extension of our data-driven loop-shaping method, by which disturbance attenuation is attained subject to a stability margin constraint, to nonlinear plants has been examined and the following results have been obtained. It is shown numerically that PID controllers can be designed successfully by this method for the plants that have nonlinear elements such as a backlash. A design method of a gain scheduled PID controller is proposed for a nonlinear plant whose equilibrium point changes considerably as the reference input changes. An optimization method of affine parameters of a nonlinear controller is proposed. A visualization method of permissible parameter sets in the 3D space is developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論

## 1. 研究開始当初の背景

数式モデルに基づく制御系設計は標準的で強力であるものの、前提となる制御対象の数式モデルの導出には多大な

労力と専門知識を要し、技術者が設計法を適用する際の大きな障壁となっている。筆者は既に PID 制御器や現代制御の動的制御器の調整法として、制御対象

の数式モデルを用いずに過渡応答データから直接に望ましいループ整形を与える簡便なデータ駆動設計法を提案している。これは適度な安定度のもとで外乱抑制を最適化することを目指している。一方、現在、より高性能な制御系の設計を目指して非線形制御問題が盛んに研究されているが、数式モデルは複雑であり上記の問題が一層重要となる。そこで、非線形系に対して制御器のデータ駆動設計法を確立することが、この問題に対するひとつの解決策となると考えられる。

## 2. 研究の目的

背景で述べたように、すでに筆者はプラントの過渡応答データを用いて安定度の制約下で外乱抑制を最適化する PID 制御器の設計法を提案しており、以下の観点から非線形系への拡張を検討する。

- (1) この方法が非線形特性を有する制御対象に対して良好な制御結果を与えることを検証し、そのための適用法を示す。
- (2) この結果を踏まえて、制御器のクラスを非線形関数に拡張した場合に、非線形制御器に含まれるアフィンパラメータの設計法を与える。これは凸問題になり最適化を考える。
- (3) 解析・設計問題が非凸問題の場合も多くあり、この場合には数値最適化のみでは扱いが困難であるので、これを補助するために解領域を 3D 空間に表示することで大域的な理解を深めるためのツールも開発する。

## 3. 研究の方法

筆者らは、データ駆動制御系設計において、ループ整形法に基づく設計法を提案してきた。これは適度な安定度制約下で外乱抑制の最適化を目的としており、そのために制御器の積分ゲインを最大化する方法を提案している。制御対象が安定な場合には制御ゲインに対し線形な安定度制約を用いることで、設計問題の最適解を線形計画法により容易に求めることができる。

- (1) この方法は制御対象の過渡応答データに基づいているので、準線形な入出力応答を有する非線形系にも良好な結果を与えると期待される。たとえば、入力飽和、量子化誤差、バックラッシュなどの非線形要素を含む系が考えられる。数値実験を通して検証し、適用上の注意点を与える。
- (2) つぎに、制御器も非線形関数の場合への拡張を考える。そのために、非

線形特性が複数の非線形要素のアフィン関数となるクラスを考えて、その係数をデータ駆動設計法で決定する問題設定を考える。これにデータ駆動設計法を適用することで非線形制御器の設計法を得ることができ、数値実験により有効性を確認する。

- (3) 上記では、扱いやすい凸問題となるように安定な制御対象やアフィンパラメータの場合に制限している。これらが満たされない場合には非凸問題になり、数値最適化では適切な解を確実に得る方法がない。そこで、許容領域を描くことで解の大域的な性質を理解し解を求めるために、調整変数が 3 個である場合にパラメータ空間表示法を開発する。今回は基礎的な検討おこなう。

## 4. 研究成果

- (1) 制御対象が安定な場合に線形計画法で最適解を求める方法を検討した。雑誌論文[2, 4]、学会発表[7, 8]で、線形系に対して適用して有用性を示した。さらに、雑誌論文[3]、学会発表[3]で、この方法を非線形系に適用し、複数の動作点まわりでゲインを切り替えるゲインスケジュールド制御系の設計に適用した。これは非線形系への適用可能性を示す結果にもなっている。
- (2) 過渡応答データを用いたシステムの 12 ゲインの推定法を与え、それを用いてパラメータ空間に非反証集合を 3D 表示する方法を提案した。雑誌論文[1]、学会発表[1, 2, 5]で、発表した。PID 制御ゲインの表示例を図 1 に示す。

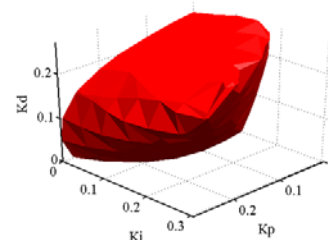


図 1 パラメータ空間の 3D 表示

各軸が PID ゲインであり、この形状の外部が制約を満たさないことが示された、すなわち反証されたゲインの存在する領域である。このため、この内部の集合が良好な性能が得られる可能性が残されたゲインである。領域は仕様を満たすための必要条件で得ら

れたものであるので、通常の十分条件による保証とは考え方が異なっている点は注意されたい。

- (3) 非線形要素を含む制御系に対するデータ駆動設計の数値例による検討を行った。この内容は平成24年度の卒業研究で行っており、発表していない。これはわれわれの通常のデータ駆動設計法を非線形系に適用したものであり、多少の非線形特性があっても良好な結果が得られることが確認できた。具体的には、出力に量子化器がある場合、入力側にバックラッシュ要素がある場合、入力側に飽和要素がある場合を扱っている。これらの要素は産業応用上重要なものであり、これらに対して通常のPID制御器のゲインの適正値が容易に得られたので、実用性が数値例を通して示された。
- (4) 本課題の主要テーマである非線形制御器が非線形要素のアフィン関数で表されるとき、その適切なゲインを求めるデータ駆動の方法を検討した。以下でこれについて数値例を用いて説明する。発表は今後行う予定である。

制御対象が次式で表され、 $a_1 = 3, a_2 = 1$ とする。これは入力むだ時間のある非線形系であり、筆者の知る限り、このクラスの制御系に対する設計を行える非線形制御理論は確立されていないと思う。また、ここで扱うモデルの不確かさや特性変動を考慮した非線形制御器の設計は一層難しい課題である。

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -5x_1 - x_2 + x_3 - a_1 x_1^2 - a_2 x_1^3$$

$$\dot{x}_3 = -x_3 + u_1$$

$$u_1(t) = u(t-2)$$

$$y = x_1$$

$a_1 = a_2 = 0$  のとき、この状態方程式は線形となり、伝達関数は次式で表される。

$$y = \frac{1}{(s^2 + s + 5)(s + 1)} u_1$$

$$u_1 = e^{-2s} u$$

この線形モデルに対し、データ駆動ループ整形法により

$$\operatorname{Re}\{P(j\omega)K(j\omega)\} > -0.3, \omega \in [0, \infty)$$

の安定度制約下で積分ゲインを最大化するようにPID制御器を設計した。その結果、次式が得られた。

$$K(s) = 2.3684 + \frac{1.3843}{s} + \frac{1.4011}{1 + 0.01s}$$

このPID制御器を非線形の制御対象に用い、過渡応答を測定し、制御器の再設計に用いることにする。

制御対象は $a_1 = 3, a_2 = 1$ であるので非線形特性を有する。そこで、制御対象の出力 $y$ の非線形関数となる補償器を制御出力に付加する。この例では非線形補償器は次式で表されるとする。

$$\begin{aligned} u(t) &= \theta_1 y(t) + \theta_2 y^2(t) + \theta_3 y^3(t) \\ &= \theta^T \psi(y(t)) \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} \theta^T &= [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3] \\ \psi(y) &= [y \quad y^2 \quad y^3]^T \end{aligned}$$

である。最初に述べた安定度制約を考慮しながら、補償器のアフィンパラメータ $\theta$ を設計する。すなわち、設計手順は以下のようになる。

外乱抑制に基づくデータ駆動による制御器設計のために、次式で表されるフィードバック制御系を考える。

$$y = P(a_1, a_2) u_1$$

$$u_1 = e^{-2s} u$$

$$u = K(s) e$$

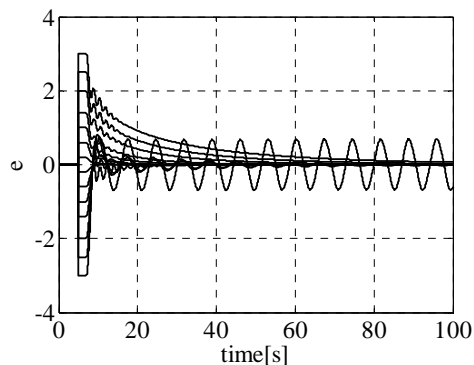
$$e = w - \theta^T (\psi(y))$$

$w$ が仮想的な外乱である。調整パラメータが $\theta$ であり、データ駆動設計法における制御対象は $P(a_1, a_2), e^{-2s}, K(s)$ で構成され、この

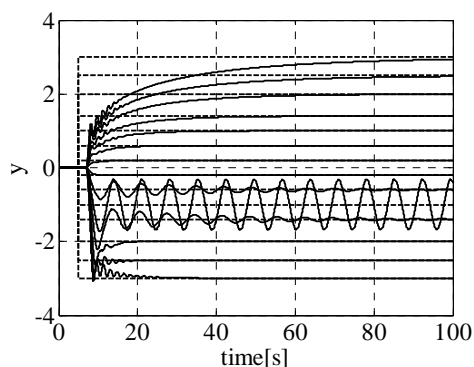
入力が  $e$ , 出力が次式で与えられる.

$$\psi(y) = [y \quad y^2 \quad y^3]^T$$

$\theta = [1 \quad 0 \quad 0]^T$  に設定したフィードバック制御系に対して, テスト信号として次式のステップ関数を加えて, 設計のためのプラントの入出力データを求めた.



(a) プラント入力信号



(b) プラント出力信号

図2 ステップ外乱に対するフィードバック制御系の応答 (線形フィードバック補償の場合)

$$w(t) = [-3.0, -2.5, -2, -1.4, -1, -0.6, -0.2, 0.2, 0.6, 1, 1.4, 2, 2.5, 3]$$

シミュレーション結果を図2に示す. この応答は  $\theta = [1 \quad 0 \quad 0]^T$  に対して得られたので, 非線形補償要素は付加されていない. 応答波形より, 振幅が大きくなるに伴い振動的な応答が見られるなど, 応答が大きく乱れている.

そこで, この応答データを用いて, データ駆動ループ整形法により  $\theta$  を求めた. PID 制御器の設計の場合には積分ゲインを最大化したが, 非線形補償器の場合には原点付近での性能を劣化させないために,  $\theta_1$  を最大にすることとした. これは非線形補償器が原点付近で線形補償器の特性になるべく近いほうがよいという考えに基づいている. これを解いた結果,

$$\theta = [0.5299 \quad 0.1786 \quad 0.0138]$$

が得られた. この補償器の非線形特性を図3に示す.

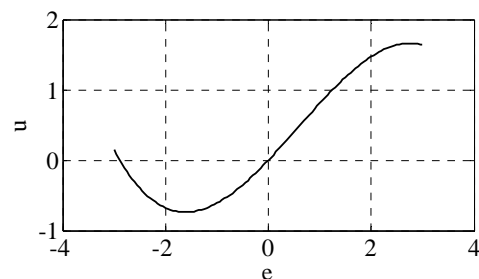
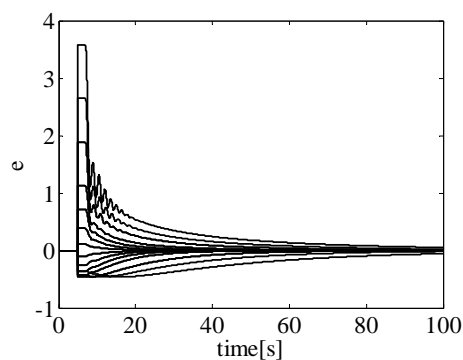
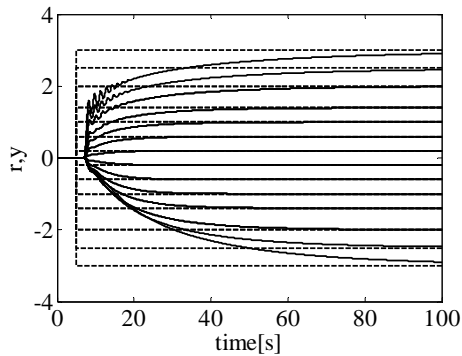


図3 非線形補償器の特性

この補償器を追加した場合のステップ目標値に対するプラントの入出力応答を図4に示す. この図の入出力応答は全体的に応答が遅くなっているが, 振動モードが消えて滑らかになっており, 応答の乱れも小さくなっている. 良好な結果と言える.



(a) プラント入力信号



(b) プラント出力信号

図4 ステップ外乱に対するフィードバック制御系の応答（非線形フィードバック補償の場合）

この数値例では補償器が出力の多項式で表される場合を扱った。多項式の場合には各非線形要素が全区間の特性に影響するので非線形特性を局所的に調整するには適さない。そこで、局所的な要素のアフィン関数となる場合として、RBF ネットワークや1次スプライン関数のクラスを考え、このクラスについて現在検討中である。上記も含めて、成果が得られ次第に公表する予定である。

#### 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4件）

1. 佐伯正美, 和田信敬, 佐藤訓志, 過渡応答データを用いたフィルタバンクによるゲイン推定と Extension 定理, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 49 巻, 2013, pp. 425-431
2. 佐伯正美, 過渡応答データに基づく PID 制御器の直接設計, 電気学会論文誌 C, 査読有, 131 巻, 2011, pp. 722-725
3. 佐伯正美, 小川恭右, データ駆動ループ整形法によるゲインスケジュールド PID 制御器の設計, 電気学会論文誌 C, 査読有, 131 巻, 2011, pp. 758-763
4. Masami Saeki, Sugitani Yosuke, Partial tuning of dynamical controllers by data-driven loop-shaping, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration,

査読有, 4 巻, 2011, pp.71-76

〔学会発表〕（計9件）

1. Saeki Masami, Rendering of unfalsified PID gain sets for parameter space control design, ASCC2013, Istanbul Turkey, 23-26 June 2013
2. Saeki Masami, Gain characteristics estimation for data-driven control design and extension theorem, American Control Conference, 査読有, 巻無し, pp. 4028-4033, Montreal Canada, 2012. 6. 27-29
3. Saeki Masami, Application of data-driven loop-shaping method to multi-loop control design of benchmark PID 2012, IFAC Conference on Advances in PID Control, 査読有, 巻無し, CD-ROM, Brescia Italy, 28-30 March 2012,
4. 近藤耕, 佐伯正美, 和田信敬, 楢円体非反証制御法による PID ゲインのオンラインチューニング, システム制御情報学会研究発表講演会, 査読無, 巻無し, pp. 595-596, 大阪, 2012. 5. 21
5. 佐伯正美, 枘田恒平, 和田信敬, 最大感度制約による非反証 PID ゲイン集合の3次元パラメータ空間表示, 計測自動制御学会 第12回部門大会, 査読無, 巻無し, CD-ROM, 奈良, 2012. 3. 14-16
6. 佐伯正美, モデルマッチングによるデータ駆動制御器設計のための凸問題, 計測自動制御学会 第12回部門大会, 査読無, 巻無し, CD-ROM, 奈良, 2012. 3. 14-16
7. Saeki Masami, Kishi Ryosuke, A data-driven PID control design by linear programming for stable plants, 18<sup>th</sup> IFAC World Congress, Mirano, Italy, 査読有, 巻無し, 2011, pp. 7420-7425, 28 Aug-2 Sep 2011
8. 山成真輝, 佐伯正美, 安定度制約を付加したモデルマッチングによる PID 制御設計, 第55回システム制御情報学会研究発表講演会, 査読無, 巻無し, pp. 69-70, 2011. 5. 17-19, 大阪
9. 佐伯正美, 過渡応答データを用いた多数のバンドパスフィルタによるゲイン特性の評価, 第11回制御部門大会, 査読無, 巻無し, CD-ROM, 沖縄, 2011. 3. 16-18

〔図書〕（計2件）

1. 佐伯正美, 朝倉書店, 制御工学, 2013, 単著, 198 ページ
2. Saeki Masami, Kishi Ryoyu, PID control, Implementation and Tuning, INTECH, 2011, pp. 145-162

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/control/>

## 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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：