

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2009

課題番号：19560443

研究課題名(和文) 平常運転時の入出力データによるデータ駆動制御系設計と制御性能監視

研究課題名(英文) Data-driven controller design and control performance assessment by using input-output data in normal operation

研究代表者

佐伯 正美 (SAEKI MASAMI)

広島大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60144325

研究成果の概要(和文)：ステップ応答程度のプラントの過渡応答データを用いて、安定余裕を保証し外乱抑制を最適化する制御器の設計法を与えた。特徴は数式モデルが必要でないことと、設計のための評価関数が技術者にも容易に与えられることである。周波数応答データを用いた場合の次数固定 H^∞ 制御器の設計法も構築した。制御性能監視は今後の検討が必要である。

研究成果の概要(英文)：Controller tuning method that optimizes disturbance attenuation with a specified stability margin by using a plant transient response such as step response is presented. Features are that mathematical models are not necessary and that a parameter of the performance index can be easily determined by engineers. Design method of fixed order H^∞ controllers by using frequency response data is also presented. Further study is necessary for control performance assessment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：PID制御, 制御系設計, 数値最適化, 非反証制御, 周波数応答, データ駆動設計, ループ整形

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、前提となる制御対象のモデルや不確かさの大きさの同定が困難である

ことが適用上の大きな障害となっている。また、平常運転時に見られるランプ応答程度の穏やかな時間応答を用いた制御器調整が現

場で望まれているが、このようにモデル同定のための情報が十分に得られない場合に対処できる設計法は整備されていない。さらに、近年、熟練労働者の退職により、プロセス系におけるPID制御器の調整や制御性能監視が行える技術者の不足が問題になってきており、その対策として専門知識を必要としない制御器の調整法の開発が急務となっている。これらの現状から、数式モデルを介さないデータ駆動制御系設計の構築の研究が一層重要性を増している。

申請者らは、(1)プラントモデルの次数やむだ時間は分からないが周波数応答が得られる場合に、制御器を設計する方法の構築、(2)制御対象のモデルを陽に求めずに、プラントの入出力データから非反証制御に基づき、制御器を直接に設計する方法の構築を目指して研究してきた。(1)については多変数系に対する最適設計法の構築とシミュレーションなどによる詳細な検討が必要である。(2)については、いままでの方法では多数の応答データを得るために多くの実験を必要とするので、通常運転データでも設計できる方法の開発とその多入出力系への拡張が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者らによるこれまでの研究成果を基礎として、データ駆動型制御系設計法を構築することにある。より具体的には、つぎの点を明らかにする。

(1) 制御対象が線形時不変系として十分に近似できる対象に対して、入出力応答データをフィルタリング前処理することで数多くの入出力データを生成する方法を構築する。そのために、バンドパスフィルタによるデータ処理の有効性を明らかにする。

(2) (1)で求めた反証条件を用いて、1入力1出力PID制御系の場合のパラメータ平面

設計法を開発する。さらに、多変数制御系のPID制御器や動的制御器に対する設計法に拡張するための数値最適化法を構築する。

(3) (1)(2)で求めた反証アルゴリズムにより、通常運転時の応答データから制御器の適切なゲイン値をオンラインで求める方法を検討する。これにより、制御対象の特性変動を制御器のゲイン変動として捉えられるか検討する。

3. 研究の方法

制御対象のノンパラメトリックモデルとして、周波数応答と過渡応答が考えられる。研究の目的で述べたように、過渡応答が与えられた場合の設計問題が本研究の最終的なテーマであるが、この問題には未経験の部分が多い。そこで、より扱いやすい周波数応答での問題を並列に検討し、過渡応答の場合の研究に活かすこととした。シミュレーションと実験装置を用いた検証実験を行う。

検討事項を以下に述べる。周波数応答が与えられた場合の H_∞ 制御問題に対して、PID制御器や構造を固定した制御器を探索する数値最適化法を検討する。これは過渡応答データによる方法での評価関数の選定や解の性質の比較に用いる。

過渡応答データを用いて効率的に反証が行えるためのフィルタリング処理と反証の効果の関係を調べ、その可能性を明らかにする。さらに、評価関数に用いるノルムの種類と外乱の影響との関係を調べ、適切な評価関数の与え方を明らかにする。

上記で得られた方法の評価実験を1入力1出力系でおこない設計法に反映する。さらに、多変数系の調整法を構築し、数値実験で検討する。実験装置を用いてアルゴリズムの有効性や問題点の有無を明らかにする。これらの成果に基づき、制御性能の監視手法の検討をおこなう。

4. 研究成果

(1) 周波数応答データによる制御設計

提案法を用いると、 H_∞ 制御問題に対して、従来の低次元化法より遙かに低次で性能劣化も少ない制御器やPID制御器が得られる。

H_∞ 制御問題を満たす多変数PID制御器の数値最適化法を学会発表⑧で提案した。これを一般化して多変数制御器の分子係数を最適化する方法を学会発表④で与え、さらに、これを μ 解析法と組み合わせることで、 H_∞ 評価の単調減少性を保証する μ 設計法を雑誌論文③で与えた。雑誌論文①では、この方法を制御器のすべての係数に対する最適化問題の場合に拡張した。

以下に、学会発表④の内容を簡略に述べる。制御対象と制御則は次式で表される。

$$z = G_{11}(s)w + G_{12}(s)u \quad (1)$$

$$y = G_{21}(s)w + G_{22}(s)u$$

$$u = K(s)y \quad (2)$$

ここに、 $z \in R^{q1}, y \in R^{q2}, w \in R^{m1}, u \in R^{m2}$ は、それぞれ、制御量、観測量、外乱、操作入力である。 w から z への閉ループ伝達関数を $T_{zw}(s)$ とおくと、評価関数は H_∞ ノルムを用いて次式で表される。

$$\|T_{zw}(s)\|_\infty < \gamma \quad (3)$$

制御器のクラスとして、以下を考える。

(a) PID制御器のクラス：多変数PID制御器で、各係数行列は密行列の場合と対角行列の場合がある。

$$K(s) = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D \frac{s}{1 + \varepsilon s} \quad (4)$$

(b) 動的制御器の部分的最適化のクラス：

n_k 次の制御器で次式により表わされ、

$$K(s) = C_K (sI - A_K) B_K + D_K \quad (5)$$

C_K, D_K のみをパラメータとする。

設計問題： 制御対象の周波数応答と閉ループ系を安定化する制御器が与えられている

とする。閉ループ系を安定化し、(3)式を満たしながら γ を最小化する $K(s)$ を求めよ。

アルゴリズム：

周波数応答データ

$$G_{ij}(j\omega), \omega = \omega_i, i = 1, 2, \dots, n_\omega \quad (6)$$

を与え、閉ループ系を安定化する制御器を与える。これを初期ゲインとして、内部安定性を満たしながら γ を逐次減少させるような制御器の列 $K_j, j = 1, 2, 3 \dots$ が提案法により与えられる。局所探索法であるので、大域解の保証はないが、数値実験で良好な解が得られている。 γ の列の単調非増加の性質から、途中でアルゴリズムを止めた場合の解はそのレベル γ を満たす安定化制御器である。

アルゴリズムの考え方を説明する。(3)式は

$$\sigma_{\max}(T_{zw}(j\omega)) < \gamma, \omega \in [0, \infty) \quad (7)$$

に等価である。これより各 ω に対し $K(s)$ の係数行列に関する双線形行列不等式が得られ、さらに十分条件のLMI(線形行列不等式)で表す。これらのLMIを満たす内点 K_{in} を求め、 γ の減少方向を得る。直線探索により、より小さい γ を与える K を求める。以上を反復する。

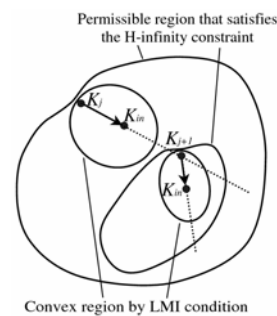


図1：数値最適化の考え方
(レベル集合と勾配方向 $\Delta K = K_{in} - K_j$)

(2) 過渡応答データによる制御器設計

非反証制御に基づくデータ駆動制御系の設計法を与えた。ステップ応答程度のプラントの入出力データをバンドパスフィルタ処理して多数の信号を生成する方法を与えた。

安定余裕を満たしながら外乱抑制を最適化するPID制御器や次数固定制御器の分子係数の設計が行える。ループ整形が達成される。

雑誌論文⑦では、1入力1出力系に対してPID制御器を設計するパラメータ平面法を与えた。バンドパスフィルタによる仮想的な信号を生成する方法を与えた。これは非反証制御のための信号生成の有効な方法であることをシミュレーションで示した。パラメータ平面法では扱えるパラメータ数が3以内に限られるので、雑誌論文⑤では1入力1出力系に対して数値最適化法を提案した。これらは線形計画法や線形行列不等式を解く問題に帰着される。学会発表①～③では、1入力1出力系に対して、PID制御器や現代制御理論で設計された動的制御器の分子係数の数値最適化法を与え、ベルト駆動実験装置やシミュレーションで有効性を確認した。学会発表⑦では多変数PID制御器に対する数値最適化法を与えた。

以下に、1入力1出力系の場合の概略を説明する。制御系は次式で表される。

$$\begin{aligned} y(t) &= P(s)e(t) \\ e(t) &= w(t) - K(s)y(t) \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 $y, e, w \in R$ は、制御対象の出力と入力および外乱である。制御器は

$$K(s) = \frac{f_n s^{n-1} + L + f_2 s + f_1}{(s^n + a_n s^{n-1} + L + a_2 s + a_1) s} \quad (9)$$

であり、分子の係数 $f_i, i=1, 2, L, n$ が設計パラメータである。これはPID制御器も含み、積分ゲインは f_1 である。

感度関数 $S(s) = (I + K(s)P(s))^{-1}$ にたいして、 $\|S(s)\|_\infty < \gamma, \gamma \in [1.2, 2]$ が達成されるとき、良好な安定余裕が得られる。この必要条件はデータ $w(t), e(t), t \in [0, T]$ を用いて、 l_2 ノルム条件:

$$\|e\|_2 < \gamma \|w\|_2, \gamma \in [1.2, 2] \quad (10)$$

で表せる。この条件化で積分ゲイン f_1 を大きくする $f_i, i=1, 2, L, n$ を求めることで、良好な

ループ整形が達成され、外乱抑制性が最適化される。

アルゴリズム :

Step1) 定常状態でステップ外乱を加えて、応答データ $e(t), y(t)$ を測定する。

Step2) サンプル周波数 $\omega_i, i=1, 2, \dots, n_F$ を与え、 ω_i に中心周波数を有するバンドパスフィルタ $F(s, \omega_i)$ に測定データを通すことで、仮想的な入出力応答データ $F(s, \omega_i)e(t), F(s, \omega_i)y(t), i=1, 2, \dots, n_F$ を生成する。

Step3) Step 2で求めたデータを用いて、(10)式から $f_i, i=1, 2, L, n$ が満たすべき凹条件式を導出する。閉ループ系を安定化し(10)式を満たす $f_i, i=1, 2, L, n$ を与える。これを基点として凹制約を線形制約式で近似する。

Step4) Step3の制約式の下で、積分ゲイン f_1 を最大化する $f_i, i=1, 2, L, n$ を線形計画法で求める。

実験例 :

ベルト駆動実験装置(図2)の角度制御実験を紹介する。



図2: ベルト駆動実験装置

実験1: プラントの入出力応答 $e(t), y(t)$ が図3で与えられる。

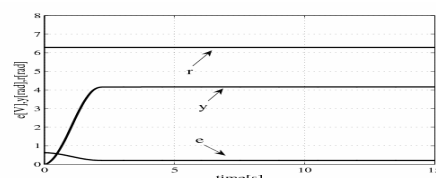


図3 プラントの入出力応答データ

このデータを用いて提案法でPID制御器を設計した。たとえば、 $\gamma = 1.5$ のときのPIDゲインは

$$[K_p \quad K_i \quad K_d] = [1.53 \quad 1.45 \quad 0.536]$$

であった。ステップ目標値応答を図4に示す。なお、感度制約はほぼ満たされる(図5)。

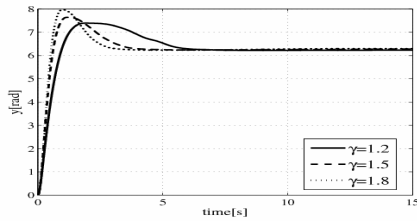


図4：PID制御器による目標値応答

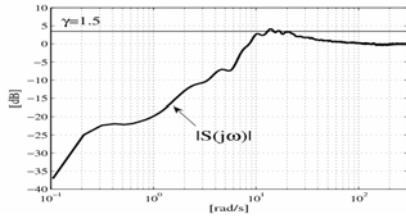


図5：得られた感度関数のゲイン特性

実験2：実験装置のプーリにモデル化困難な非線形特性のガタを挿入すると異常振動が図6に示すように得られた。

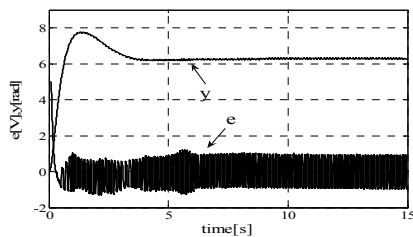


図6：ガタのある制御系の異常振動

このデータを用いてPID制御器を提案法で再設計すると図7に示すように振動が直ちに抑制された。

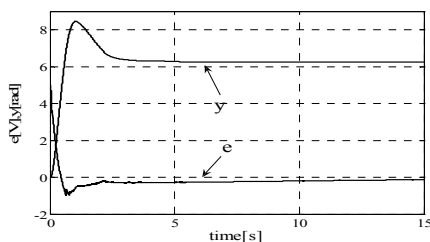


図7：制御器の再調整による振動低減

(3) その他の関連成果

雑誌論文②では状態方程式で表されたシステムに対して次数固定の制御器の数値最

適化法を提案した。これは周波数応答による方法と類似の数値最適化の考え方により得られた。雑誌論文⑥では、閉ループ系を安定化する1入力1出力PID制御器のゲインの性質を明らかにした。これは非反証制御のパラメータ空間法の考察に役立つ。射出成形機に対する故障検出と分離のアルゴリズムを開発した(雑誌論文④と学会発表⑥)。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① 佐伯正美、Unggul Wasiwitono、周波数依存LMIを用いた次数固定 H^∞ 制御器の数値最適化、計測自動制御学会論文集、46巻、170-177、2010、査読有
- ② 佐伯正美、川西慶祐、浅賀健太郎、勾配法による H^∞ 静的出力フィードバックゲインの数値最適化、システム制御情報学会論文誌、22巻、416-422、2009、査読有
- ③ 小川将司、佐伯正美、Dスケーリング近似を用いない低次元 H^∞ 制御器の μ 設計、計測自動制御学会論文集、45巻、334-336、2009、査読有
- ④ Kiyoshi Ochi, Masami Saeki, Design method of fault detector for injection unit, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 2, 72-77, 2009, 査読有
- ⑤ 佐伯正美、ループ整形のための1入力1出力PID制御器のモデルを用いない最適化、計測自動制御学会論文集、44巻、639-645、2008、査読有
- ⑥ Masami Saeki, Properties of stabilizing PID gain set in parameter space, IEEE Transactions on Automatic

Control, Vol. 52, 1710-1715, 2007, 査読有

- ⑦ 佐伯正美、濱田修、和田信敬、バンドパスフィルタを用いた反証に基づくPIDゲインの調整、システム制御情報学会論文誌、20巻、347-354、2007、査読有

[学会発表] (計8件)

- ① Masami Saeki, Tuning of dynamical controllers by a data-driven loop-shaping method for a single input plant, Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, 2009年12月16日、Shanghai International Convention Center, Shanghai, China
- ② 佐伯正美、データ駆動ループ整形法を用いたゲインスケジュールドPID制御器の一設計、第52回自動制御連合講演会、2009年11月21日、大阪大学、豊中
- ③ Yosuke Sugitani, Experimental study of virtual disturbance loop-shaping method for angular velocity control of a belt-drive system, ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009年8月19日、Fukuoka International Congress Center, Fukuoka
- ④ Masami Saeki, Partial numerical optimization of low order H-infinity controller on the frequency domain, 17th IEEE International Conference on Control Applications, 2008年9月4日, San Antonio, Texas, USA
- ⑤ Masami Saeki, Data-driven controller design for loop-shaping using plant

transient responses, SICE Annual Conference 2008, 2008年8月21日、電気通信大学、調布

- ⑥ Kiyoshi Ochi, Design method of fault detector for injection unit, th17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, 2008年7月8日、COEX, Seoul, Korea
- ⑦ Masami Saeki、MIMO PID controller design for model-free loop-shaping problem、第8回計測自動制御学会制御部門大会、2008年3月5日、京都大学、京都
- ⑧ Masami Saeki, Design of Multivariable H-infinity PID controller using frequency response, 16th IEEE Int. Conf. on Control Applications, 2007年10月3日、Suntec Singapore International Convention & Exhibition Centre、Singapore

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：多変数PID制御器設計法
発明者：佐伯正美
権利者：佐伯正美
種類：特許
番号：特願2008-038455
出願年月日：平成20年2月20日
国内外の別：国際

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし