810 時間応答を考慮したパラメータ最適化によるロバストコントローラ設計法 — 倒立振子の制御への適用 —

A Controller Design Algorithm by Parameter Optimization with Time Response Constraints - Application to Inverted Pendulum Control -

○正 下川哲司 (福岡大) 正 林 長軍 (福岡大)
正 尾崎弘明 (福岡大)

Tetsuji SHIMOGAWA, Fukuoka University, 8-19-1, Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka
Chang-jun LIN, Fukuoka University
Hiroaki Ozaki, Fukuoka University

Key words : Robust Controller, Parameter Optimization, Time Response, Complex Method, Inverted Pendulum

1. 緒言

コントローラを伝達関数の型で設定し、そのパラメータを最適化することにより、時間応答の改善を考慮したロバストなコントローラ設計法を提案する。ここでは、コントローラの設計にコンプレックス法が有効であること⁽¹⁾を考慮して、i) 設計者の試行錯誤を必要としない ii) 任意の次数のコントローラと評価関数に適用できる iii) アルゴリズムが簡明で調整するパラメータの数が少ないという点に着目した方法を検討している。

制御系を設計するとき、たとえば、 H_∞ 制御^{(2),(3)}にて行う場合、感度関数や相補感度関数といった設計に関する仕様を満たすためには、一般化プラントの作成と重み関数の選定が重要となってくる。さらに時間応答の制限がある設計仕様を満たすためには、これらの構成や選定に試行錯誤が必要となり設計者への負担が増すことになる。また、PID コントローラのように、設計者があらかじめコントローラの型を決めておきたい場合もあり、パラメータ最適化による設計は有用であると考えられる。

これまでに、提案する方法を平行移動する台車に取り付けられた倒立振子のモデル⁽³⁾に適用して、混合感度法による設計仕様を満たしかつ時間応答の改善が行える例を検討している⁽⁴⁾。しかし、設計における時間応答の改善などはシミュレーション上でやっているため、実機に適用する場合のモデル化誤差などの影響が発生すると考えられる。ここでは、設計されたコントローラを用いて実機での検証を行うために、振上げ型の倒立振子⁽¹⁾に適用してその有効性を確認する。

2. コントローラ設計法

ここで提案する方法は、プラント P とコントローラ K で構成される制御系において、指定した型のコントローラ K のパラメータをコンプレックス法を用いて最適化するものである。コントローラを m 次の伝達関数の型で指定し、パラメータをその分母および分子の多項式の係数 a_i , b_i ($i=0,1,\dots,m$) として、これらを最適化することになる。この際に考慮すべき評価関数を次式のように設定する。

$$J = w_1 J_1 + w_2 J_2 + \dots + w_N J_N \quad (1)$$

J_i ($i=1,2,\dots,N$) は、それぞれ制御系設計に関する設計仕様を制限条件として与えた場合の評価であり、優先順位を指定することができる。 w_i ($i=1,2,\dots,N$) は重み係数であり、これらを調整することにより順次 J_i を減少させるようにしている。

3. 振上げ型倒立振子への適用

提案する方法を Fig.1 に示す 1 入力 2 出力系の振上げ型倒立振子に適用する。モータの回転角度を θ_1 、振子の傾き角度を θ_2 とする。制御方法は、モータをあらかじめ求めた振上げ軌道に沿って回転させることにより振子を垂下状態から振上げ、ある指定した角度に達したとき安定化制御に切替えるという方法をとっている。また、制御系を Fig.2 のように構成するとコントローラ部は、2 入力 1 出力の形となる。 y_{p1} は θ_1 を、 y_{p2} は θ_2 を、 y_{c1} および y_{c2} はコントローラからの出力をそれぞれ表わしている。図の入出力関係より、コントローラを伝達関数で表現すると $G_{c1}(s)$ ($= y_{c1}/y_{p1}$) および $G_{c2}(s)$ ($= y_{c2}/y_{p2}$) と指定することができる。最適化するパラメータは、分母は共通の a_i となり、分子は b_{1i} および b_{2i} ($i=1,2,\dots,m$) となる。最適化されたコントローラを用いて実機の安定化制御を行い設計手法の有効性を確認する。

Fig.1 Model of inverted pendulum

Fig.2 Control system of inverted pendulum

4. コントローラの設計結果

ここでは、コントローラの次数を 2 次に、評価関数をつぎのように設定した。

$$J = w_1 J_1 + w_2 J_2 + w_3 J_3 + w_4 J_4 + w_5 J_5 \quad (2)$$

J_1 はシステム全体の内部安定性を保証し、 J_2 は相補感度関数を、 J_3 は感度関数を、 J_4 はモータの時間応答を、 J_5 は振子の時間応答をそれぞれ制限している。また、混合感度法を取り入れて感度関数と相補感度関数の整形を行うためにつぎの重み関数を用いる。

$$\|VS\|_\infty < 1, V(s) = \frac{1}{V} = \frac{100s+1}{1000} \quad (3)$$

$$\|WT\|_{\infty} < 1, W(s) = \frac{1}{W} = \frac{4000}{s^2 + 10s + 2000} \quad (4)$$

モータおよび振子の時間応答の制限については、図中に細線で記入する。また、時間応答を見るためのシミュレーションは、振子の角度 θ_2 の初期値を $0.35(\text{rad})$ に設定している。

以上の設計仕様を倒立振子に適用した結果を示す。まず、時間応答を考慮せずに最適化した場合を示す。感度関数を Fig.3(a)に、相補感度関数を Fig.3(b)に、モータの応答を Fig.3(c)に、振子の応答を Fig.3(d)にそれぞれ示す。また、このときのコントローラで実機を制御した場合の結果を Fig.4 に示す。つぎに、時間応答の改善を考慮して最適化した場合の結果を示す。Fig.3 と同様に感度関数、相補感度関数、モータの応答および振子の応答を Fig.5 に示す。Fig.5(d)より振子の応答が改善されたことにより、実機での振子の応答も抑えられていることを確認できた。

(a) Sensitivity function

(b) Complementary sensitivity function

(c) Time response of motor

(d) Time response of inverted pendulum

Fig.3 Parameter optimization without time response constraints

Fig.4 Experiment of real system without time response constraints

5. 結言

提案する方法を振上げ型の倒立振子に適用し、コントローラパラメータの最適化によるロバストな制御系設計法の有効性を確認した。今後、PID コントローラでの設計への展開や多入出力系の制御対象にも適用してその有効性を確認したい。

文献

- (1) 尾崎弘明・下川哲司・林長軍, 機論, 66-649, C(2000), 3034-3040.
- (2) 野波健蔵, MATLAB による制御系設計, 東京電機大学出版局, (1998), 223-239.
- (3) 細江繁幸・荒木光彦, 制御系設計, 朝倉書店, (1994), 138-144.
- (4) 下川哲司・林長軍・尾崎弘明, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1, (2000), 123-124.

(a) Sensitivity function

(b) Complementary sensitivity function

(c) Time response of motor

(d) Time response of inverted pendulum

Fig.5 Parameter optimization with time response constraints

Fig.6 Experiment of real system with time response constraints