

平成21年6月12日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760295

研究課題名 (和文) 学習制御を利用した連続時間閉ループ同定

研究課題名 (英文) Continuous-time closed-loop identification based on the iterative learning control

研究代表者

酒井 史敏 (SAKAI FUMITOSHI)

奈良工業高等専門学校・機械工学科・講師

研究者番号：80342533

研究成果の概要：本研究課題の目的は、ある種の反復学習制御に基づく連続時間システム同定法をフィードバック制御されている制御対象の同定問題に拡張し、その有効性・実用性を示すことである。研究期間中に反復学習制御に基づく連続時間システム同定法をフィードバック制御されている制御対象の同定問題に拡張し、新しい連続時間閉ループ同定法を提案することができた。この提案手法においては学習更新則に、観測雑音等の事前情報を一切必要とせず逐次的に雑音の影響を減少させる効果をもつ学習ゲインを採用し、モデル化誤差をもつ不安定かつ非最小位相系の制御対象に対して連続時間閉ループ同定を行った数値例に基づき提案手法の有効性を確認をすることができた。また、多変数系の連続時間伝達関数モデルを直接同定する方法についての提案も行い、実用上十分な同定結果が得られることを示すことができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	270,000	2,370,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：システム同定、連続時間システム、反復学習制御

1. 研究開始当初の背景

本研究では、研究代表者らが提案した反復学習制御に基づく連続時間システム同定法を閉ループ制御されている制御対象の同定問題に拡張することによる新しい閉ループ同定法を提案し、その有効性・実用性を示すことが目的である。閉ループ同定が本質的な役割を果たす場合として以下のような事

例が挙げられる。

- (a) 制御対象の特性が公称モデルから変動する場合には、大幅な目標値変更など擾乱を加えることなくリアルタイムで制御対象のモデルを閉ループで同定またはモニタしたい。
- (b) 制御対象が不安定系の場合には、安定化制御器により閉ループ系を構成して制御対象を同定したい。

- (c) システム同定と制御器の設計を融合した反復的設計を実際の制御対象で行いたい.
- (d) モデル予測制御などにおいて間接的適応制御を実施したい.

従来研究として、不安定な制御対象に対して安定化制御器により閉ループ系を構成して制御対象を同定する研究としては、F. G. Hansen and G. F. Franklin: Proc. American Control Conf. (1988)を発端に国内外で磁気浮上系などの不安定系に対する同定が行われている。また、システム同定と制御器の設計との融合に関する研究としては、M. Verhaegen: Automatica(1994), Z. Zang, R. R. Bitmead and M. Gevers: Automatica (1995), B. K. Lee: Int. J. Contr. (1995), 杉江, 岡田: システム/制御/情報 (1997) など国内外で多くの研究が報告されている。しかし、いずれの研究においても従来の離散時間同定手法を基にしたオフライン同定法であり、離散時間上の入出力データに基づき離散時間モデルを同定している。

一方で、連続時間システムは時定数など物理パラメータとの対応が明確で解析が行い易く、サンプリング時間に応じた離散時間モデルを得ることができるという利点があり、連続時間モデルを直接同定する方法(いずれも開ループ系を対象)が提案されている(P. Young: Automatica(1981), H. Unbehauen and G. P. Rao: Automatica(1990)など)。研究代表者らも、これまでに従来の連続時間システム同定法と全く異なる視点から、反復学習制御に基づく連続時間システム同定法を提案している。また、反復学習制御に関する研究事例として閉ループ制御されているシステムに反復学習制御を適用している研究がある。

そこで、研究代表者らが提案してきた反復学習制御に基づく連続時間システム同定法を閉ループ制御されている制御対象に適用することができれば、直接連続時間モデルを同定できる新しい閉ループ同定法になり得るのではないかという発想が本研究の基本的なアイデアである。連続時間システムをサンプリングされた入出力データから直接同定する閉ループ同定法を提案している研究事例はほとんど見あたらず価値のある研究課題であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが提案してきた反復学習制御を利用した連続時間システム同定法に基づき、フィードバック制御により安定化された制御系から制御対象の連続時

間モデルを直接同定する手法を提案することが主な目的である。また、一般的な多入力多出力系への拡張なども行い、より多くのクラスのシステムへ適用可能となる連続時間システム同定法に発展させ、実システムの同定問題への適用についても検討する。

3. 研究の方法

つぎの微分方程式によって表現される1入力1出力系を制御対象とする。

$$y(t) = \frac{B(p)}{A(p)} u(t) = \frac{b_0 + b_1 p + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1 p + \dots + a_{n-1} p^{n-1} + p^n}$$

ここで、 $u(t)$ および $y(t)$ はそれぞれ入力と出力であり、 a_i ($i=0,1,\dots,n-1$), b_i ($i=0,1,\dots,m$) は分母・分子の係数である。また、 p は微分オペレータであり、例えば $pu(t) = du(t)/dt$ を意味する。ここで、

- (a) 制御対象は適当なコントローラ $K(p)$ によって安定化されている。
- (b) 1回の試行は有限時間区間 $[0, T]$ で行われ、それぞれの試行はフィードバック制御系の平衡状態から開始されるものとする。
- (c) 制御対象の分母多項式 $A(p)$ と分子多項式 $B(p)$ は既約である。また、それぞれの次数 n, m は既知であり、プロバである。

を仮定し、フィードバック制御系の観測出力信号 $y(t)$ および入力信号 $u(t)$ に基づき制御対象の分母・分子の係数 a_i, b_i を求める問題を考える。

この問題に対して研究代表者らがこれまでに提案してきた反復学習制御に基づく連続時間システム同定法を拡張して適用する。そのために第 k 試行目に推定された分母・分子多項式

$$A^k(p) = a_0^k + a_1^k p + \dots + a_{n-1}^k p^{n-1} + p^n$$

$$B^k(p) = b_0^k + b_1^k p + \dots + b_m^k p^m$$

を定義し、図1のような2自由度制御系を構成することを考える。

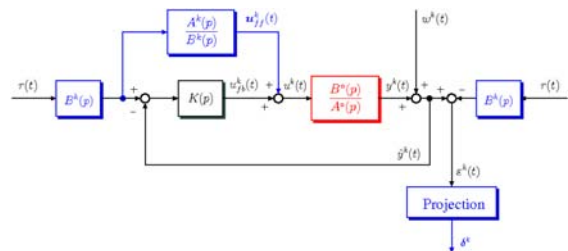


図1 2自由度制御系

図1の2自由度制御系に適当な信号 $r(t)$ を与えたとき、第 k 試行目における追従誤差は

$$\begin{aligned} \varepsilon^k(t) &= y^k - B^k(p)r(t) \\ &= \frac{\frac{B^o(p)}{A^o(p)}A^k(p) - B^k(p)}{1 + \frac{B^o(p)}{A^o(p)}K(p)} r(t) \end{aligned} \quad (1)$$

となり、 $A^k(p)$ と $B^k(p)$ が真の分母・分子多項式と一致すれば追従誤差は $\varepsilon^k(t) \rightarrow 0$ となる。この追従誤差を $n+m+1$ 次元空間に射影することで、追従誤差の $n+m+1$ 次元ベクトル表現

$$\delta^k = [\delta_1^k, \delta_2^k, \dots, \delta_{n+m+1}^k]^T$$

を得る。また、パラメータベクトルとして

$$\gamma = [a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m]^T$$

$$\gamma^k = [a_1^k, \dots, a_n^k, b_0^k, \dots, b_m^k]^T$$

を定義すれば、(1)式は

$$\delta^k = M(\gamma^k - \gamma) \quad (2)$$

で表すことができる。ここで、 M は閉ループ系から一意に定まる正則な定数行列である。また、出力信号に観測雑音加わる場合、観測雑音の及ぼす影響を $n+m+1$ 次元空間に射影したときのベクトルを v^k とすれば(2)式は

$$\delta^k = M(\gamma^k - \gamma) + v^k$$

で表すことができる。

これらの準備の下で、 $\delta^k \rightarrow 0$ を達成するように γ^k の更新を行えば制御対象の分母・分子の係数 a_i 、 b_i を求めることができる。具体的には、時変の学習ゲイン H^k を用いた学習更新則

$$\gamma^{k+1} = \gamma^k + H^k \delta^k \quad (3)$$

を用いることで、出力 $y(t)$ に観測雑音加わる場合においても良好に分母・分子の係数 a_i 、 b_i を求めることができる。

以上のことについて、理論的考察を行い、実験的に閉ループ系から一意に定まる正則な定数行列 M を求める方法を整理する。また、数値例により提案手法の有効性を確認する。

4. 研究成果

反復学習制御を利用しフィードバック制御により安定化された制御系から制御対象の連続時間モデルを直接同定する連続時間閉ループ同定法を提案することができた。

同定アルゴリズムに必要な閉ループ系か

ら一意に定まる正則な定数行列 M は、安定化されたフィードバック制御系において2種類の応答を実験により得ることで構成できることを示すことができた。また、時変の学習ゲイン H^k の設計にはカルマンフィルタに基づく設計法を適用することで出力に非常に大きな観測雑音加わる場合においても良好な同定結果が得られることを示すことができた。また、多変数系に対する拡張については、推定するパラメータ数と対象システムの次数に関する事前情報が少なく、実現問題にも適していると考えられる共通の分母多項式をもつ伝達関数行列表現を採用し、多変数系の対象システムに対しても(2)式と同様なパラメータ空間表現を導出することができた。多変数系に対しても実用上十分な同定結果が得られることを数値例により確認することができた。以下に、モデル化誤差を含む不安定な制御対象(磁気浮上系)の連続時間閉ループ同定を行った結果を示す。

図2に示すような直流電磁石の吸引力を用いて、鋼球を指定した位置に浮上させる磁気浮上系を考える。

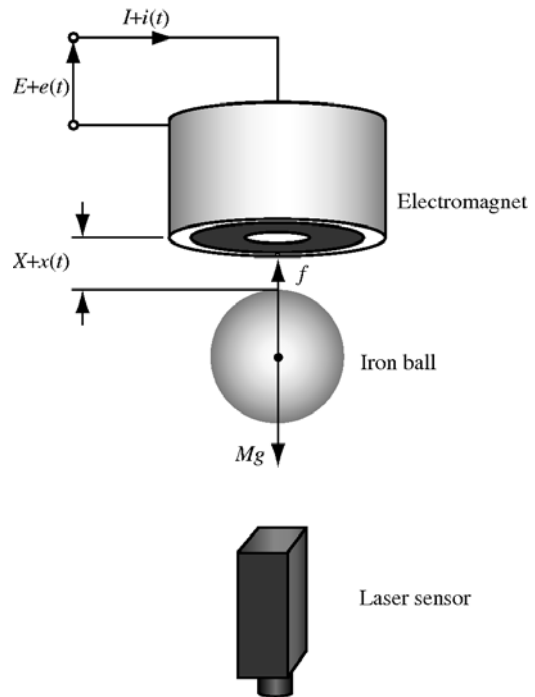


図2 磁気浮上系

入力電圧からギャップ長へのノミナルモデルは

$$P(s) = \frac{-7.65}{(s+25.4)(s+13.5)(s-26.6)} \quad (4)$$

であり、このノミナルモデルを安定化するコントローラとして

$$K(s) = \frac{1.67 \times 10^9 (s+33.3)(s+b)(s+\bar{b})}{s(s+835)(s+a)(s+\bar{a})}$$

を用いる。ただし、 $a = 273 + 261j$ ， $b = 18.5 + 4.6j$ である。また、ノミナルモデルにはモデル化誤差が含まれ、実システムの伝達関数は

$$\tilde{P}(s) = \frac{-6}{(s+20)(s+10)(s-21)} \quad (5)$$

であるとする。すなわち、ノミナルモデルに基づいてノミナルモデルおよび実システムを安定化するコントローラを設計し、設計したコントローラを用いたフィードバック制御系から実システムの真のパラメータを同定する問題である。

ノミナルモデルを用いた閉ループ系から行列 M を求め、(3)式の学習更新則を用いて50回の試行を行った結果を以下に示す。ここで、各試行における時間区間は $T = 1$ [s] であり、サンプリング時間は $T_s = 10$ [ms] としている。第10回目の試行における出力 $y(t)$ と信号 $B^k(p)r(t)$ 図3に示している(図中、赤線が信号 $B^k(p)r(t)$ 、青線が観測出力 $y(t)$)。ここで、出力 $y(t)$ には雑音対信号比(NSR)がおおよそ10%となるように正規性白色雑音を加えている。(3)式の学習更新則を用いることで信号 $B^k(p)r(t)$ に出力 $y(t)$ が追従していることが確認できる。

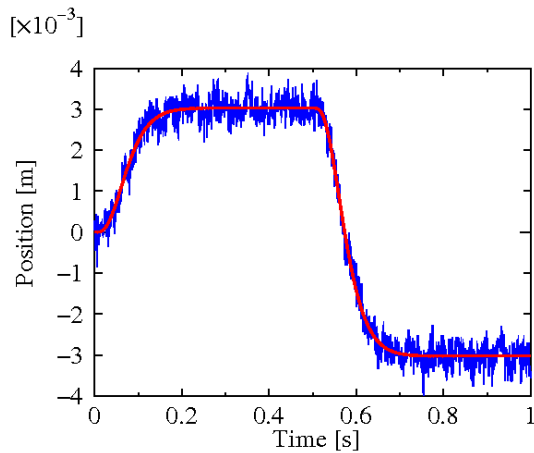


図3 第10試行目の出力信号

また、試行ごとに同定されたシステムのパラメータ(5)式との対応がわかりやすくなるように推定されたパラメータを用い分母・分子を極とゲインで表したものを図4に示しているが、10回程度の試行ではほぼ正確にそれぞれのパラメータが実システムのパラメータ($p_1 = -20$, $p_2 = -10$, $p_3 = 21$, $K = -6$)に収束していることが確認できる。

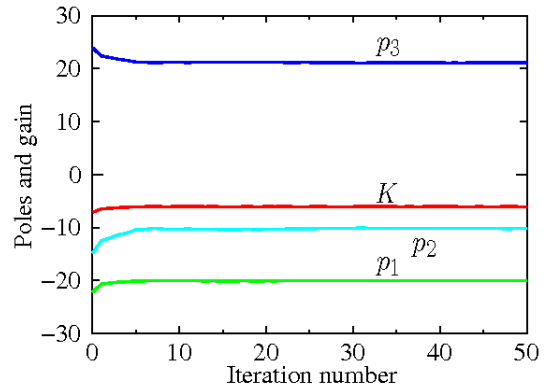


図4 試行ごとに同定されたパラメータ

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 酒井史敏, 杉江俊治, 射影型反復学習による多変数連続時間システム同定, 計測自動制御学会論文集, 45-1, 33-40, (2009), 査読有
- ② 酒井史敏, 杉江俊治, 射影型反復学習による連続時間閉ループ同定法, 計測自動制御学会論文集, 43-10, 877-882, (2007), 査読有

[学会発表] (計3件)

- ① 酒井史敏, 射影型反復学習による多変数系の連続時間システム同定, 第51回自動制御連合講演会, 2008年11月22日, 米沢
- ② Fumitoshi Sakai, A continuous-time closed-loop identification based on iterative learning control concepts, the 46th IEEE Conference on Decision and Control, 2007年12月14日, New Orleans
- ③ 酒井史敏, 射影型反復学習に基づく連続時間システム同定-初期推定値に関する一考察-, 計測自動制御学会第36回制御理論シンポジウム, 2007年9月5日, 札幌

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 史敏 (SAKAI FUMITOSHI)

奈良工業高等専門学校・機械工学科・講師

研究者番号: 80342533