

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820078

研究課題名(和文)非線形摩擦を有する機械システムの連続時間モデル同定

研究課題名(英文)Continuous-time model identification of mechanical systems with nonlinear friction

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・准教授

研究者番号：80342533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：数値制御工作機械などに用いられている送り駆動系的高速・高精度位置決めを実現するためには摩擦補償が必要であり、適切な摩擦補償器を構成するためには作用する非線形摩擦のパラメータを推定する必要がある。本研究では、対象システムの連続時間モデルと作用する非線形摩擦のパラメータを同時に推定することを目的とし、学習制御に基づく連続時間閉ループ同定法に非線形関数を導入した新しい同定アルゴリズムを提案することができた。提案する同定アルゴリズムによって対象システムの連続時間モデルおよび作用する非線形摩擦を同時に同定することができることを示した。

研究成果の概要(英文)：In order to achieve high precision position tracking performances in positioning systems, the friction phenomena must be taken into consideration during the development of control algorithm. For effective compensation, the value of the friction force must be known in every domain of operation of the mechanical systems. This study presents a new identification method to obtain a continuous-time model of the mechanical systems with nonlinear friction. The method utilizes projection of measured signals onto a finite dimensional signal subspace. Its effectiveness is demonstrated through numerical example of a linear plant with nonlinear friction.

研究分野：制御工学

キーワード：システム同定 非線形摩擦 連続時間システム

1. 研究開始当初の背景

数値制御工作機械などに用いられている送り駆動系の高速・高精度位置決め制御を実現するためには、送り駆動系のダイナミクスを表す数学モデルが必要となる。送り駆動系の数学モデルに関する研究としては、例えば垣野らの3自由度系のモデルから出発し、最終的には2自由度系で十分であるとの見解を示したもの(垣野ら:精密工学会誌(1994)), 堤らのモデルを簡略化すると実際の挙動を正確に表現できなくなる可能性が高いという立場から、4自由度系の詳細なモデルとそれに組み込む摩擦モデルを提案しているもの(堤ら:精密工学会誌(1995))などがある。しかし、送り駆動系の詳細なモデルや摩擦モデルが与えられたとしても、これらのモデルに含まれるさまざまなパラメータは明確ではない。送り駆動系のダイナミクスはステップ応答法などの簡単な実験を用いた同定法や最小二乗法などを用いておおよそのモデルを求め、摩擦モデルのパラメータは別の実験により測定することが多い。また、送り駆動系のモデルを得るために最小二乗法等を用いた場合には、送り駆動系の離散時間モデルが得られることになる。位置決め制御器を設計する際に連続時間の制御系設計法を用いるとすれば、離散時間モデルを連続時間モデルに変換する必要がある。この場合、同定における誤差と連続時間モデルへの変換における誤差が生じ、その変換も離散時間モデルはもとの連続時間システムの一部の構造しか保存していないため一意に決まらないという問題がある。また、同定に用いる入出力信号に含まれる雑音信号の影響を受けやすく精度良く同定を行うためには入出力信号の前処理や制御対象の事前情報が多く必要とされる。これらの理由より、制御対象の入出力信号から連続時間モデルを直接同定する方法が提案されている(P. Young: Automatica(1981), H. Unbehauen and G. P. Rao: Automatica(1990)など)。そこで、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閉ループ同定法(酒井, 杉江:計測自動制御学会論文集(2007))に摩擦モデルを組み込むことで、送り駆動系のモデルおよび摩擦モデルのパラメータを同時に同定できるのではないかとこの発想が本研究の基本的なアイデアである。送り駆動系の同定に用いる摩擦モデルとしてはクーロン摩擦, Karnopp のモデルなどさまざまなモデルが考えられ、それぞれの摩擦モデルのパラメータをいかに同定するかについても重要な課題となる。

2. 研究の目的

本研究では、学習制御に基づく連続時間閉ループ同定法を利用し、送り駆動系等の機械

システムの連続時間モデルおよび摩擦モデルのパラメータを同時に同定することを考える。そのために、線形モデルのパラメータベクトルに摩擦モデルのパラメータを含ませるように同定アルゴリズムを拡張し、フィードフォワード入力および摩擦補償入力を試行の繰り返しにより更新することで、送り駆動系の線形モデルおよび摩擦モデルのパラメータが推定できることを示す。また、摩擦補償入力にはクーロン摩擦モデル, Karnopp 摩擦モデルおよび Gauss 摩擦モデルを用いることを考える。

3. 研究の方法

本研究で扱う対象システムの一例として、図1に示すテーブルの摺動面等で非線形摩擦が生じる送りねじ駆動機構が挙げられる。回転動力源として用いられる AC サーボモータはトルク制御されており、トルク指令値 $u(t)$ を入力とし、テーブルの変位 $y(t)$ のみが計測可能であるとする。

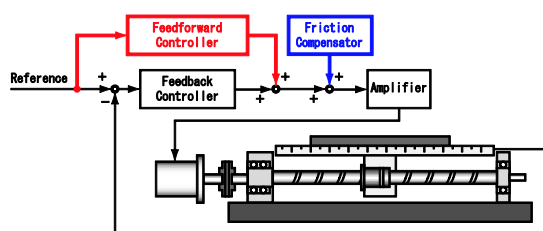


図1 送りねじ駆動機構

すなわち、本研究で扱う対象システムは原点極をもつ、つぎの微分方程式によって表現できると仮定する。

$$y(t) = \frac{B(p)}{A(p)} \{u(t) - d(v)\}$$

$$= \frac{\beta_0 + \beta_1 p + \dots + \beta_m p^m}{\alpha_1 p + \dots + \alpha_{n-1} p^{n-1} + p^n} \{u(t) - d(v)\}$$

ここで、 $d(v)$ はテーブル速度 $d(v) = \dot{y}(t)$ に依存する非線形摩擦を表しており、 α_i ($i=1, \dots, n-1$), β_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 $py(t) = \dot{y}(t)$ を意味する。ここで、

- (a) 対象システム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) 対象システムの分母多項式 $A(p)$ 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、厳密にプロパ ($n > m$) である。

を仮定し、観測出力 $y(t)$ および $u(t)$ に基づき対象システムの分母・分子の係数 α_i, β_i および摩擦モデルのパラメータを求める問題

$$F(s) = \frac{4^5}{(s+4)^5}$$

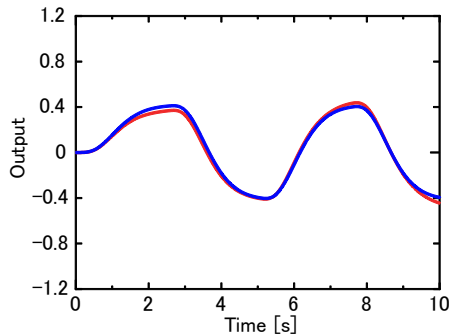
つぎに、非線形摩擦が作用する閉ループ系のステップ応答 (図 3) などを用いて、初期推定モデルを求める。ここではオーバーシュートがほぼ一致するモデルとして

$$\hat{P}(s) = \frac{4.194}{s^3 + 2.393s^2 + 2.551s}$$

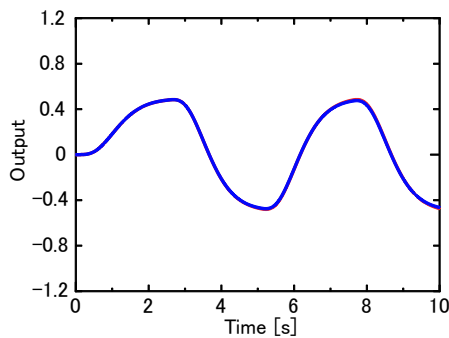
を得た。この初期推定モデルを用いた閉ループ系のステップ応答を図 3 中の緑線で示している。この初期推定モデルを用いてパラメータ空間表現を求めることで、初期推定値 γ^0 が得られる。以上の準備の下で、学習更新則

$$\gamma^{k+1} = \gamma^k + H^k \delta^k$$

を用い、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 $T = 10$ [s] であり、サンプリング時間は $T_s = 1$ [ms] としている。第 1 回目および第 20 回目の試行における出力 $y^k(t)$ と信号 $r_B^k(t) = B^k(p)r(t)$ をそれぞれ図 4 (a) および (b) に示している (図中、青線が信号 $r_B^k(t) = B^k(p)r(t)$ 、赤線が出力 $y^k(t)$)。試行の繰り返しにより信号 $r_B^k(t) = B^k(p)r(t)$ に出力 $y^k(t)$ が追従していることが確認できる。また、第 1 回目および第 20 回目の試行において作用している摩擦 $d(v^k)$ と推定されたパラメータを用いた摩擦補償入力 $u_d^k(t)$ をそれぞれ図 5 (a) および (b) に示す (図中、青線が $d(v^k)$ 、赤線が $u_d^k(t)$)。このとき、試行ごとに推定されるパラメータは図 6 となり、20 回程度の試行でほぼ正確にそれぞれのパラメータが対象システムのパ



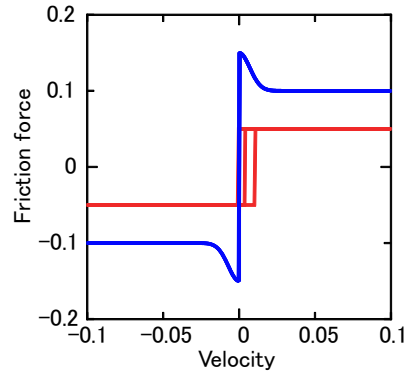
(a) 第 1 回目の試行



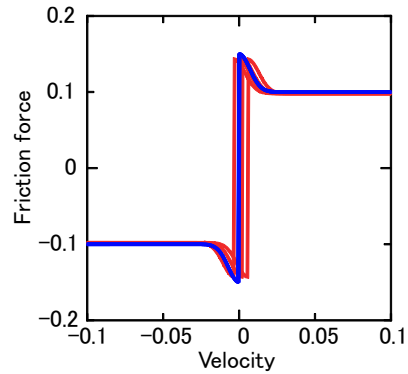
(b) 第 20 回目の試行

図 4 出力 $y^k(t)$ と信号 $r_B^k(t) = B^k(p)r(t)$

ラメータ ($\alpha_1 = 2$, $\alpha_2 = 3$, $\alpha_3 = 2$, $\beta_0 = 5$, $\theta_1 = F_c = 0.1$, $\theta_2 = F_s - F_c = 0.05$) に収束していることが確認できる。

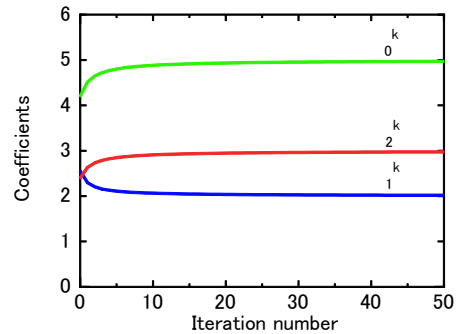


(a) 第 1 回目の試行

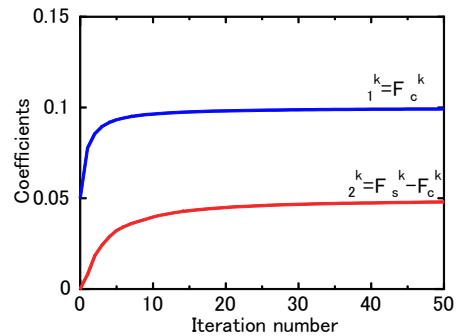


(b) 第 20 回目の試行

図 5 非線形摩擦 $d(v^k)$ と摩擦補償入力 $u_d^k(t)$



(a) 線形モデル



(b) 非線形摩擦モデル

図 6 試行ごとに推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)

[学会発表] (計5件)

- ① 松本葵, 酒井史敏, 電流飽和を有するサーボ系の動特性解析とその応用, 日本機械学会関西学生会平成 26 年度学生員卒業研究発表講演会, 2015 年 3 月 14 日, 京都
- ② 酒井史敏, 非線形摩擦を含む機械システムの連続時間モデル同定に関する考察, 日本機械学会第 14 回運動と振動の制御シンポジウム, 2015 年 6 月 24 日, 宇都宮
- ③ 田端信哉, 酒井史敏, Wave-based 制御を用いた多慣性共振系の位置決め制御, 日本機械学会関西学生会平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 2016 年 3 月 10 日, 寝屋川
- ④ 酒井史敏, 区分的線形近似を用いた非線形機械システムの連続時間システム同定, 日本機械学会関西支部第 91 期定時総会講演会, 2016 年 3 月 12 日, 寝屋川
- ⑤ 酒井史敏, 非線形基底関数を用いた機械システムの連続時間システム同定, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2016 (D&D2016), 2016 年 8 月 25 日, 宇部

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
・准教授
研究者番号 : 80342533