リニアスライダの位置決め制御系に対する フィードバック誤差学習の一実装法*

中村 幸紀^{*1}, 森本 和樹^{*2}, 涌井 伸二^{*1}

Implementation of Feedback Error Learning for Position Control System of Linear Slider

Yukinori NAKAMURA^{*1}, Kazuki MORIMOTO and Shinji WAKUI

^{*1} Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16, Naka, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan

This paper considers implementation of feedback error learning (FEL) for linear slider position control. The effect of modelling error of the slider is compensated by FEL. In algorithm of FEL, parameters of feedforward controller are updated so that output signals of a feedback controller can become small. It leads to improvement of tracking performance. On the other hand, when conventional FEL algorithm is implemented for control of a linear slider, parameters of the feedforward controller tend to converge slowly. In industrial scenes, it is desirable to shorten learning time in order to reduce cost of setting up manufacturing devices. Furthermore, when the learning time is long, guide rails of the slider become worn. It is shown that convergence speed is improved by tuning free parameters of the feedforward controller. Due to further improvement of the convergence, by using prefilter and free parameters of feedforward controller, some parameters of an inverse system are obtained a priori and utilized for learning. Command with mixed frequency is selected in order to identify accurate inverse system of plant. Simulation results are presented to show the effectiveness of proposed method.

Key Words : Positioning, Precision Instrument, Mechatronics, Linear Slider, Feedback Error Learning

1. 緒 言

生産加工現場では、加工物の移動にステージが広く利用されている。加工対象の微細化に伴い、ステージの位置決め精度向上・高速化が求められる中で、活発に研究が行われている⁽¹⁾⁽²⁾。著者らの一人もこれまでステージ制御に取組んでおり^{(3)~(6)}、北森法に基づく PID パラメータの調整則⁽⁴⁾⁽⁵⁾や定盤加速度フィードバック⁽⁶⁾を適用し、実務上の課題を検討してきた。特に、文献 (3) ではリニアスライダの位置決めに対して、モデルマッチング型 2 自由度制御系を適用している。モデルマッチング型 2 自由度制御とは、所望の目標値応答に応じた伝達関数を用意し、それに基づいてフィードフォワード制御器 (以下、FF 制御器と略記) を設計する。設計される FF 制御器には、制御対象の逆システムを含んでおり、目標値追従が達成される。文献 (3) では、追従特性を改善するために、FF 制御器のパラメータ調整法を提案している。この調整法では、スライダに含まれるゲインと時定数の未知パラメータに対して、片方のパラメータを固定し、もう一方のパラメータを変えながら FF 制御器を設計する。そして、設計した制御器を用いて、設計者が位置決めを実測し、その応答を確認しながら再度パラメータ調整を行う。しかし、本調整法では、所望の応答が得られるまで設計者がチューニングを繰り返すため、コストの面で望ましくない。

また、制御対象にパラメータ誤差が含まれる場合には、その対策としてフィードバック制御器 (以下、FB 制御器と略記) のゲインなどを調整する⁽¹¹⁾。しかしながら、生産加工装置を大量に製造する場合、これにばらつきが発生するため、パラメータ誤差が製品ごとに異なる。このため、設計者が FB 制御器のゲインなどの調整を、製品ご

* 原稿受付 2010 年 12 月 10 日

^{*1} 正員, 東京農工大学大学院工学研究院 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

^{*2} 東京農工大学工学部

E-mail: yukino-n@cc.tuat.ac.jp

Fig. 1 Feedback error learning scheme

とに試行錯誤で行う必要がある。このような実務的課題を考慮して、ここでは、試行錯誤による負担を減らし、パラメータを自動調整できる学習に焦点をあてる。

未知パラメータを伴うプラントに対する一制御法として、フィードバック誤差学習 (Feedback Error Learning, FEL)^{(7)~(9)}が知られており、本学習法ではFB制御器の操作量を用いて、FF制御器のパラメータを自動調整できる。もともとFELは、Kawatoら⁽⁷⁾により運動の学習モデルとして提案され、その後Miyamuraら⁽⁸⁾は制御工学の観点から解析を行った。文献(8)では、対象のシステムが強正実性を満たすようにFB制御器を設計する必要があったが、Muramatsuら⁽⁹⁾により強正実制約を緩和したFELが提案されている。

このように、FELの学習則について議論がなされているが、実システムへの適用にはいくつかの課題が残る。具体的に、FELでは、FF制御器が制御対象の逆システムとなるようにパラメータを更新するが、学習で得られる逆システムの精度は目標値に依存する。後述するように、従来のFEL⁽⁹⁾では目標値に単一周波数を用いているが、学習後の逆システムの精度は劣化する。FELによる学習は逆システムの同定に対応するため、複数の正弦波を合成した混合波⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を入力することで、逆システムの精度改善が期待できる。しかしながら、実際の生産装置の設計では、同定時間の確保が難しい。また、装置を稼働し続けてその特性が変化した場合、再同定によりパラメータを更新させることになるが、再同定の際に装置を止めることになる。このため、同定時間(学習時間)は短い方が望ましい。特にスライダでは、学習時間が長いと駆動時にレールが摩耗する。これらの理由から従来のFELを直接実装するのは困難である。

そこで、本論文では、リニアスライダの位置決め制御系に対して、学習時間の短いFELの実装方法を検討する。本手法では、学習の長期化を避けるために、ここではFF制御器内のフリーパラメータに着目する。学習時間を考慮したフリーパラメータの設定について、従来のFEL⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹²⁾では十分に議論されていない。本手法では、スライダのノミナルモデルとプレフィルタに基づいてフリーパラメータを適切に設定し、学習時間を短縮させる。

本論文の構成はつぎの通りである。2章でFELの概要を説明する。3章では、準備として目標値の設定を述べ、学習時間の長期化が課題となることを示す。そして、学習時間を考慮したFELについて説明する。4章で、数値シミュレーションの結果を示し、5章で結論とする。以下、 A^T で行列 A の転置、 $\det A$ で A の行列式、 $\lambda(A)$ で A の固有値を表す。

2. フィードバック誤差学習

本章では、文献(9)のFELについて述べる。制御対象として、厳密にプロパーな単一入力単一出力 (Single-Input Single-Output, SISO) 系を考え、その伝達関数 $P(s)$ は次式で与えられる。

$$P(s) = \frac{b_m s^{n-m} + b_{m+1} s^{n-m-1} + \cdots + b_n}{s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_n} \quad (1)$$

ここで、係数 a_i , $i = 1, 2, \dots, n$, b_j , $j = m, m+1, \dots, n$ は未知である。 $P(s)$ の有限零点は安定であり、次数 n および相対次数 $m > 0$ は既知とする。FELでは、式(1)の制御対象に対して、2自由度のサーボ系を構築し、学習によりFF制御器のパラメータを調整する。FELの構造を図1に示す。ここで、 C :FB制御器、 Q :FF制御器、 W :プレフィルタ、 r :目標値、 r_w :プレフィルタからの出力、 e :偏差、 u_{fb} :FB制御器からの操作量、 u_{ff} :FF制御器からの操作量、 u :プラントへの操作量、 y :制御量である。なお、プレフィルタ W は $P^{-1}W$ の相対次数が零となるように設計する。FF制御器 Q は調整パラメータ θ を含み、次式で記述される。

$$\frac{d\xi_1(t)}{dt} = F\xi_1(t) + gr(t) \quad (2)$$

$$\frac{d\xi_2(t)}{dt} = F\xi_2(t) + gu(t) \quad (3)$$

$$u_{ff}(t) = c(t)^T \xi_1(t) + d(t)^T \xi_2(t) + k(t)r(t) \quad (4)$$

$$= \theta(t)^T \xi_w(t) \quad (5)$$

$$\theta(t) = [c(t)^T \ d(t)^T \ k(t)]^T \quad (6)$$

$$c = [c_1, c_2, \dots, c_n]^T \quad (7)$$

$$d = [d_1, d_2, \dots, d_n]^T \quad (8)$$

$$\xi_w(t) = [\xi_1(t)^T \ \xi_2(t)^T \ r(t)]^T \quad (9)$$

ここで, $\xi_1, \xi_2 \in \mathbb{R}^n$ は状態量であり, また F は安定行列, (F, g) は可制御とする. FEL では, FF 制御器が逆システム $P^{-1}W$ となるようにパラメータ θ を逐次更新する. このとき, FF 制御器からの操作量が

$$u_{ff}(t) = P^{-1}(s)W(s)r(t) \quad (10)$$

となれば^{脚注 1)}, $y(t) = W(s)r(t) = r_w(t)$ が成立し, 偏差 e が零へ収束する. 文献 (9) の場合, θ の更新時に操作量 u_{fb} と偏差 e を用いており, その更新則は次式で表される.

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \alpha \tilde{\xi}_w(t) \{c(t)^T \xi_e(t) + k(t)e(t) + W(s)u_{fb}(t)\}, \quad \alpha > 0 \quad (11)$$

$$\tilde{\xi}_w(t) = \begin{bmatrix} \xi_r(t) - \xi_e(t) \\ \xi_u(t) \\ W(s)r(t) - e(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

ただし, 信号 ξ_r, ξ_e, ξ_u は次式より生成される.

$$\frac{d\xi_r(t)}{dt} = F\xi_r(t) + gW(s)r(t) \quad (13)$$

$$\frac{d\xi_e(t)}{dt} = F\xi_e(t) + ge(t) \quad (14)$$

$$\frac{d\xi_u(t)}{dt} = F\xi_u(t) + gW(s)u(t) \quad (15)$$

3. リニアスライダへの実装課題とその対策

ここでは, まず対象のリニアスライダについて, その機構および数理モデルを示す. つぎに, 本スライダの位置決め制御系に従来手法⁽⁹⁾の FEL を適用し, そのときの結果を示す. 文献 (9) の FEL では, 目標値に単一周波数の正弦波を与えて, その際の追従特性 (時間応答) の評価のみに留めている. ここでは, 単一周波数に設定すると, 学習後の FF 制御器の周波数特性は, 逆システムのものとは一致しないことを述べる. また, 本章では目標値を混合波に変更することで, 逆システムの精度は改善するものの, 学習時間の長期化が課題として残ることを示す. 最後に, 学習時間の短縮を考慮した FEL について述べる.

3.1 リニアスライダ

本研究では, 文献 (3) の転がり型リニアスライダ (質量 4kg, 縦 780mm, 横 270mm, 高さ 90mm) を対象とする (図 2). アクチュエータは, コアレス型リニア同期モータであり, モータ内のコイルに電流を流して電磁力を発生させて, スライダを駆動する. また, スライダの位置情報はスライダの可動部側面にある光学式エンコーダにより検

脚注 1) 式 (10) の右辺は, 畳み込み積分 ($\mathcal{L}^{-1}[P^{-1}(s)W(s)] * r(t)$) を意味する. 同式には時間関数と伝達関数が併記されているが, これは FEL の従来研究⁽⁸⁾⁽⁹⁾の書式に沿って記述したためである. 以降も同様の書式で記す.

Fig. 2 Overview of linear slider and driver

Fig. 3 Structure of position control system with slider and driver

出される。図3にスライダの位置決め制御系を示す。同図より本制御系では、エンコーダからのパルス信号(A, B, Z相)を基に、Digital Signal Processor(DSP)で操作量を計算し、D/Aコンバータでアナログ信号に変換する。ドライバでは、DSPからの電圧指令が電流に変換される。このため、制御対象はスライダとドライバであるが、電気系の時定数は機械系のそれに比べ小さいとしてモデル化する。このとき、ドライバを含めたスライダ全体の伝達関数は次式で表される。

$$P(s) = \frac{K_t}{Ms^2 + Ds + K_s} \quad (16)$$

ここで、 M :スライダの質量[kg]、 D :スライダの粘性摩擦係数[N・s/m]、 K_s :スライダのばね係数[N/m]、 K_t :リニアモータとドライバからなる推力定数[N/V]である。転がり型のスライダではばね成分の影響は小さいことを考慮すると、式(16)は次式で記述し直せる。

$$P(s) = \frac{K_t}{Ms^2 + Ds} \quad (17)$$

$$= \frac{b}{as^2 + s} \quad (18)$$

ここで、 $a := M/D$ 、 $b := K_t/D$ である。このときのスライダの等価ブロック図を図4に示す。本論文では、同図でモデル化したリニアスライダに対してFELを適用する。

3.2 従来のFELの適用と学習の長期化

ここではFELをスライダに適用したときのシミュレーションを行い、実装時の課題を検討する。式(18)のスライダのパラメータは、文献(3)の実測結果より $a = 0.037$ 、 $b = 12.5$ とした。このときのスライダの伝達関数を P_n とすると

$$P_n(s) = \frac{12.5}{0.037s^2 + s} \quad (19)$$

となる。また、式(2)、(3)のFF制御器のフリーパラメータを文献(9)の数値例に記述されている

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -5 & -5 \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

と設定し、同文献にならって目標値を単一周波数(0.1rad/s)の正弦波とした。その他、プレフィルタはその帯域幅が式(19)のスライダの折点周波数よりも高くなるように

Fig. 4 Block diagram of slider and driver

Fig. 5 Frequency characteristic (conventional)

Fig. 6 Position after learning (conventional)

$$W(s) = \frac{100000}{s^2 + 300s + 100000} \quad (21)$$

と設計し、FB 制御器は $C = 350$ とし、また $\alpha = 1$ とおいた。図 5 に学習後の FF 制御器と逆システム $P_n^{-1}W$ の周波数特性を示す。図中の●印の個所、すなわち目標値と同じ周波数 0.1 rad/s でのみしか特性が一致していない。文献 (9) の数値例では、単一周波数の時間応答の一致でしか述べておらず、学習時と異なる帯域の目標値を与えると、追従性能が劣化するはずである。確認として、学習後の FF 制御器を用いた 2 自由度制御系に対して、目標値の周波数を 50 rad/s に変更してシミュレーションを行った。このときのスライダの位置 y 、プレフィルタからの出力 r_w の時間応答を図 6 に示す。同図右側は左側を拡大したものであり、偏差が生じることがわかる。よって、リニアスライダに対して、単一周波数の目標値で FEL を適用すると、逆システムの同定精度が劣化する。これが FEL による実装の第一課題である。

この対策として、広域な目標値を与えれば、高精度な逆システムが得られると予想できる。しかし、実際、図 2 のリニアスライダにランダム信号や M 系列を印加すると、高周波ダイナミクスを励起するため、実装は困難である。したがって、逆システムの精度を改善し、かつスライダに低負荷な目標値を設定する必要がある。例えば、文献 (13), (14) の混合波や、特定の周波数成分をもつ信号⁽¹⁵⁾が考えられる。ここでは混合波を与えることにする。混合波の高周波成分は、式 (21) のプレフィルタの帯域幅より 135 rad/s と設定する。なお、FEL により、FF 制御器がプレフィルタ W を含んだ逆システムとなるようにパラメータ θ は調整される。このため、高周波成分の設定に際して、プレフィルタ W の特性を考慮する。また低周波成分は、サーボアナライザで通常実測するときの低周波域 (約 10^{-2} Hz 程度) を参考にして 0.1 rad/s とした。そのときの周波数特性と、調整パラメータ θ の更新状況をそれぞれ図 7, 8 に示す。前述の結果 (図 5) と比べて、逆システムの精度は若干改善されているが、 θ は収束せず、学習時間が長い。このような長時間の学習は、スライダの生産装置としての稼働率を著しく阻害するため許容できない。よって、実装の第二の課題は、調整パラメータ θ の収束速度の改善である。次節では、この対策について述べる。

3.3 実装時の課題と対策—学習時間の短縮—

本節では、まず調整パラメータ c の収束速度の改善について検討する。式 (2)-(3) より FF 制御器はフリーパラメータ F, g を含んでおり、以下で述べるように、 F, g に応じて調整パラメータ c の収束値は変化する。ここでは、

Fig. 7 Frequency characteristic (conventional, wave mixing)

Fig. 8 Tunable parameters (conventional, wave mixing)

パラメータ誤差を含む式 (18) のスライダ $P(s)$ に対して, c の収束値が小さくなるようにフリーパラメータを設定する. 以下, フリーパラメータの設定方法を述べる. 2 章よりプレフィルタ W は, 逆システムの相対次数が零となるように設計されるため, 2 次の相対次数であれば式 (21) 以外のものでも, 同様の議論が可能である. 実務上は帯域幅内まで目標値信号を減衰させないプレフィルタを設計するのが一般的であるため, ここでは式 (21) のような 2 次遅れ系のプレフィルタを対象とする.

FEL により FF 制御器が逆システム $P^{-1}W$ になるときの調整パラメータを

$$\tilde{\theta} = [\tilde{c}^T \quad \tilde{d}^T \quad \tilde{k}]^T \quad (22)$$

$$\tilde{c} = [\tilde{c}_1 \quad \tilde{c}_2]^T \quad (23)$$

$$\tilde{d} = [\tilde{d}_1 \quad \tilde{d}_2]^T \quad (24)$$

とする. このとき, 学習後の FF 制御器 (逆システム $P^{-1}W$) への入力 (目標値 r) から出力 (操作量 u_{ff}) までの伝達関数は次式で記述される⁽⁹⁾.

$$P_n^{-1}(s)W(s) = \frac{\tilde{k} + \tilde{c}^T(sI - F)^{-1}g}{1 - \tilde{d}^T(sI - F)^{-1}g} \quad (25)$$

F, g を

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

とすると, 式 (25) は

$$P_n^{-1}(s)W(s) = \frac{\tilde{k}s^2 + \{g_1\tilde{c}_1 + g_2\tilde{c}_2 - \tilde{k}(f_{11} + f_{22})\}s + \{g_1(-\tilde{c}_1f_{22} + \tilde{c}_2f_{21}) + g_2(\tilde{c}_1f_{12} - \tilde{c}_2f_{11}) + \tilde{k}(f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21})\}}{s^2 - (g_1\tilde{d}_1 + g_2\tilde{d}_2 + f_{11} + f_{22})s - \{g_1(-\tilde{d}_1f_{22} + \tilde{d}_2f_{21}) + g_2(\tilde{d}_1f_{12} - \tilde{d}_2f_{11}) - (f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21})\}} \quad (27)$$

となる. リニアスライダに対するプレフィルタを

$$W(s) = \frac{w_3}{s^2 + w_1s + w_2} \quad (28)$$

とする. 式 (18), (28) より

$$P^{-1}(s)W(s) = \frac{w_3}{b} \frac{as^2 + s}{s^2 + w_1s + w_2} \quad (29)$$

となる. 式 (27), (29) の分子多項式の係数を比較すると, 調整パラメータの収束値 $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$ は, フリーパラメータ F, g に依存する. このため, $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$ が小さくなるようにフリーパラメータ F, g を設定し, 学習時間の短縮を図る. そ

の設定手順は以下の通りである。まず、設定を容易にするため、一部のフリーパラメータを固定し、設定するパラメータ数を削減する。ここでは、 $f_{11} = 0, f_{12} = 1, g_1 = 0$ とする。このとき、式 (29) は次のように記述し直せる。

$$\frac{\tilde{k}s^2 + (-\tilde{k}f_{22} + g_2\tilde{c}_2)s + (-\tilde{k}f_{21} + g_2\tilde{c}_1)}{s^2 + (-f_{22} - g_2\tilde{d}_2)s + (-f_{21} - g_2\tilde{d}_1)} \quad (30)$$

式 (29), (30) の分子多項式を比較すると

$$\tilde{c}_1 = \frac{w_3 f_{21} a}{g_2 b} \quad (31)$$

$$\tilde{c}_2 = \frac{w_3 (f_{22} a + 1)}{g_2 b} \quad (32)$$

となる。式 (31), (32) より g_2 を増加させれば、収束値 $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$ は減少し、学習時間の短縮が期待できる。また、このことは、式 (18) のスライダの物理定数 $a, b > 0$ にモデル化誤差が含まれる場合にも言える。したがって、フリーパラメータ g_2 には比較的大きな値を設定する。そして、残りのフリーパラメータ f_{21}, f_{22} は、行列 F が安定、また (F, g) が可制御であることを考慮して、収束値 $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$ を小さくするように設定する。式 (18) の物理定数 $a, b > 0$ が未知な場合には、式 (19) の実測値を参考にして設定することになる。なお、 $\tilde{c}_1 = \tilde{c}_2 = 0$ となるように F, g を設定すると、行列 F は安定ではないので (付録参照)、設定の際には留意する必要がある。

次に、式 (29), (30) の分母多項式の比較より

$$\tilde{d}_1 = -\frac{1}{g_2}(w_2 + f_{21}) \quad (33)$$

$$\tilde{d}_2 = -\frac{1}{g_2}(w_1 + f_{22}) \quad (34)$$

が成り立つ。式 (33), (34) にはスライダの物理定数 a, b が含まれていない。このため、収束値 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2$ はモデル化誤差に依存せず、また既知のフリーパラメータ F, g とプレフィルタ W から事前に求められる。そこで、式 (33), (34) より $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2$ を学習前に求め、FF 制御器の出力方程式 (4) の d には、常に収束値を設定、すなわち $d(t) = \tilde{d}$ として学習時間を短縮する。

4. 数値シミュレーション

FEL を提案法で実装したときの数値例を示す。制御対象は式 (19) のリニアスライダである。3.3 節で述べた方法を用いて、調整パラメータ c_1, c_2 の収束値が小さくなるようにフリーパラメータ F, g を設定する。設定するフリーパラメータ数を削減するため $f_{11} = 0, f_{12} = 1, g_1 = 0$ と固定し、 g_2, f_{21}, f_{22} を調整する。ここでは比較のため、文献 (9) のフリーパラメータ (20) を用いたときの収束値よりも小さくなるように、式 (31), (32) より $g_2 = 10, f_{21} = -1, f_{22} = -8000/296$ とした。つまり、

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 - \frac{8000}{296} & 0 \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \end{bmatrix} \quad (35)$$

である。なお、最初のシミュレーションでは、制御対象が式 (19) のノミナルモデルであるため、式 (18) の物理定数は、 $a = 0.037, b = 12.5$ であり、これを考慮して g_2, f_{21}, f_{22} の値を設定している。以下、文献 (9) の場合よりも収束値が小さくなることを確認する。式 (31), (32) より

$$\tilde{c}_1 = \frac{100000 \cdot (-1) \cdot 0.037}{10 \cdot 12.5} = -29.6 \quad (36)$$

$$\tilde{c}_2 = \frac{100000 \cdot (-\frac{8000}{296}) \cdot 0.037 + 1}{10 \cdot 12.5} = \frac{296 \cdot (-\frac{8000}{296}) + 8000}{10} = 0 \quad (37)$$

となる。なお、このときの行列 F は安定であり、また (F, g) は可制御である。一方、文献 (9) のフリーパラメータ (20) の場合では、同様の計算より $\tilde{c}_1 = -1480, \tilde{c}_2 = 6520$ となるため、提案法の場合が確かに小さい。また、式 (33), (34) より $\tilde{d}_1 = -9999.9, \tilde{d}_2 = -27.2973$ である。目標値は周波数が 0.1, 135rad/s の混合波であり、その他の条件は 3.2 節の数値例と同じである。図 9 に調整パラメータ θ の更新状況を示す。なお、 d_1, d_2 には常に収束値 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2$

Fig. 9 Tunable parameters (proposed)

Fig. 10 Frequency characteristic (proposed)

Fig. 11 Position after learning (proposed)

Fig. 12 Tunable parameters (proposed, plant P with modelling error) Fig. 13 Frequency characteristic (proposed, plant P with modelling error)

を与えているため図中への掲載はない。同図より従来法と比べて収束速度が改善されていることがわかる。このときの学習後のフィードフォワード制御器 Q と逆システム $P_n^{-1}W$ の周波数特性を図 10 に示す。同図より高精度な逆システムが得られた。学習後の FF 制御器を用いた 2 自由度制御系に対して、新たに周波数 50rad/s の目標値を与え、そのときの結果を図 11 に示す。図 6 と比べて追従性能が改善されている。

さらに、式 (18) の係数 a, b のノミナル値に対して、10% のパラメータ誤差を含む場合で検証した。その他の条件は、前述の数値例と同じである。図 12 に調整パラメータ θ の更新状況を示す。同図より約 200s で収束することが分かる。また、学習後の FF 制御器の周波数特性を図 13 に示す。同図よりモデル化誤差を含む場合も同様の傾向が得られた。以上より提案する実装方法の有効性を確認できる。

5. 結 論

本論文では、リニアスライダの位置決め制御系に対する FEL の実装方法を提案し、シミュレーションによる検証を行った。結論は以下の通りである。

- (1) 本論文のスライダに対して、単一周波数の目標値を与えた場合、高精度な逆システムを学習するのは困難である。目標値として混合波を設定すると、逆システムの精度は改善されるものの学習の長期化が課題となる。
 - (2) 調整パラメータ c の収束値 $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$ が小さくなるように FF 制御器のフリーパラメータを設定する。また、既知のプレフィルタとフリーパラメータより、調整パラメータ d の収束値 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2$ を事前に把握できる。このため、学習中は d_1, d_2 に対して、収束値 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2$ を与える。これらの対策により学習時間を短縮できた。
- 今後の課題は、提案法における調整パラメータの収束性の証明および実機検証である。

謝 辞

本研究の一部は、財団法人一樹工業技術奨励会より援助を受けた。記して謝意を表する。

付 録

収束値 $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2$ と行列 F の関係

$\tilde{c}_1 = \tilde{c}_2 = 0$ のとき、式 (27), (29) より

$$f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21} = 0 \quad (\text{A.1})$$

を得る。式 (A.1) より

$$\det F = 0 \quad (\text{A.2})$$

となり、 $\lambda(F)$ の少なくとも一つは零である⁽¹⁰⁾。よって、 F は安定行列ではない。

文 献

- (1) A. Sebastian and S. M. Salapaka, "Design Methodologies for Robust Nanopositioning", *IEEE Trans. on Control System Technology*, Vol. 13, No. 6 (2005) pp. 868–876.
- (2) R. J. E. Merry, N. C. T. de Kleijn, M. J. G. van de Molengraft, and M. Steinbuch, "Using a Walking Piezo Actuator to Drive and Control a High-Precision Stage", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 14, No. 1, (2009) pp. 21–31.
- (3) S. Yamamoto and S. Wakui, "Application of Robust Control Law for Linear Slider", *International Journal of Automation Technology*, Vol. 2, No. 1 (2008) pp. 34–41.
- (4) 涌井伸二, 星野雅史, 赤津観, "一巡伝達関数を用いたステージ位置制御系への北森法の適用", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 70, No. 696 (2004), pp. 2235–2242.
- (5) 涌井伸二, "ステージ位置制御系への北森法の適用", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 636, (1999), pp. 3252–3259.
- (6) 涌井伸二, 浅田克己, 佐藤幹夫, "定盤加速度信号を用いた X-Y ステージ位置決め制御系の解析", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 60, No. 580 (1994) pp. 4183–4189.
- (7) M. Kawato, K. Furukawa, and R. Suzuki, "A Hierarchical Neural-Network Model for Control and Learning of Voluntary Movements", *Biol. Cybern.*, Vol. 57 (1987), pp. 169–185.
- (8) A. Miyamura and H. Kimura, "Stability of Feedback Error Learning Scheme", *System & Control Letters*, Vol. 45, No. 12 (2002), pp. 303–316.
- (9) E. Muramatsu and K. Watanabe, "Feedback Error Learning Control without Recourse to Positive Realness", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 49, No. 10 (2004), pp. 1762–1767.
- (10) 児玉慎三, 須田信英, システム制御のためのマトリクス理論 (1981), p. 166, コロナ社.
- (11) 杉江俊治, 藤田政之, フィードバック制御入門 (1999), p. 171, コロナ社.
- (12) S. Wongsura and W. Kongprawechnon, "Discrete-Time Feedback Error Learning", *Suranaree Journal of Science*, Vol. 12, No. 4 (2005), pp. 266–275.

- (13) M. Kawafuku, J. Takamori, M. Iwasaki, and H. Hirai, "Comparison of the Control Performance for the Following Control System in HDDs", in *Proc. 11th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, (2010), pp.548-553.
 - (14) M. Kawafuku, J. Takamori, M. Iwasaki, and H. Hirai, "Precise Following Control Using Optimized Friction Compensator for HDDs", in *Proc. ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, (2009), pp. 7-12.
 - (15) 廣瀬徳晃, 寺地恭久, 川福基裕, 岩崎誠, 平井洋武, "オンライン定数同定と初期値補償を併用した位置決め整定特性のリアルタイム補償", 電気学会論文誌, Vol.128-D, No. 6 (2008), pp.718-725.
-