駆動用圧電素子の開ループ精密制御†

三 沢 源 人*・藤 本 弘 之*・田 中 充*

Open Loop Control for a Piezoelectric Actuator with Precise Positioning

Guento MISAWA*, Hiroyuki FUJIMOTO* and Mitsuru TANAKA*

The step response of a piezoelectric actuator is analysed experimentally in order to predict its creep movement. The programmed voltage calculated by the results of the analysis reduced the creep motion by one order of magnitude.

Key Words: piezoelectric actuator, creep, control

1. はじめに

圧電素子は、印加電圧に応じて変形を生じ、応答が速く、駆動力および保持力が大きいので、微動駆動素子としてよく用いられるが、電圧の変化を止めても動き続けるクリープ現象や、過去に印加した電圧によって印加電圧と変位の関係が変化するヒステリシスを生じるため、精密駆動用アクチュエータとしての制御は簡単ではない。たとえば、ヒステリシスを補正するために電圧と変位の関係を多項式で表わし、計算を行って制御した例²⁾もある。

以下に示すのは、積層圧電素子を用いてステージを約100 μmの範囲で駆動し、ピコメートルのオーダーの位置決め精度が要求されるX線光波複合干渉計³⁾に用いる例である。圧電素子による駆動では、電圧に対する変位の応答に無数の時間遅れ要素が介在するクリープ現象のため、オーバーシュートを起こしやすいが、このシステムでは測定誤差の原因となるため、これを極力減らす必要がある。そこで圧電素子の挙動を予測する制御方法により、オーバーシュートを未然に防ぎ、かつ短時間で静止させることを目標とした。

2. 圧電素子の特性の測定

まず、Fig. 1に示すヘテログライン式光学干渉測長機を用いた圧電素子制御測定システムで、積層型圧電素子に電圧を印加したときの変位つまり素子の伸縮を測定した。

電圧を印加せずに1日以上放置したあと電圧 V_0 のステップ波形を印加したときの変位 $x(t)$ は、最小2乗法で時間 t の種々の関数についてフィッティングを行った結果、ステップの立ち上がり直後を除いて、つぎに示す対数関数によく一致することがわかった。

$$x(t) \approx k_1 V_0 + k_2 V_0 \log \frac{t+t_0}{t_0} \quad (1)$$

(k_1, k_2, t_0 は圧電素子ごとに異なる定数)

Fig. 2はこのときの変位の一例を示す。

一般の印加電圧波形に対する圧電素子の応答を、時間 t を陽に含まない電圧の関数 ξ と、時間だけの関数であ

Fig. 1 The expansion measurement system

Fig. 2 The expansion of the piezoelectric actuator in response to a step up voltage

† 第40回応用物理学関係連合講演会で発表(1993・9)

* 計量研究所 つくば市梅園1-1-4

* National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba
(Received May 9, 1994)
(Revised August 17, 1994)

る応答関数 ϕ で表わせるものと仮定するとつぎのようになる。

$$x(t) = \xi(V(t)) + \int_{-\infty}^t V(\tau) \phi(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

さらに、ステップ応答が(1)式のとおりであると仮定すると、変位 $x(t)$ と印加電圧 $V(t)$ の関係はつぎの式で表わせる。

$$x(t) \approx k_1 V(t) + k_2 \int_{-\infty}^t \frac{V(\tau)}{t-\tau+t_0} d\tau \quad (3)$$

(3)式を逆算すれば、 $x(t)$ から $V(t)$ を求めることができる。

実際には、右辺にヒステリシスの項が加算されることになるが、これは今回の測定ではクリープよりずっと小さく無視できる。また、クリープによる変位の変化は、電圧を印加せずに長時間放置した後では無視できる程度に小さくなる。その場合、電圧を印加した直後には(3)式において、それ以前の印加電圧を0とみなしてもさしつかえないと考えられる。

3. 予測による制御

このような考えにより、圧電素子を放置されていた状態から目標とする変位まで駆動したのち静止させることを試みた。

Fig. 3(a)に示すように、印加電圧0で静止している状態で、時刻 t_{01} にステップ電圧 V_{01} を印加し、Fig. 3(b)に示すようにステップ状の変位の後のクリープの速度がやや遅くなった時刻 t_{02} から一定の位置 x_1 に静止させるよう電圧 $V(t)$ を変化させるものとする。

この、変位 $x(t)$ を t_{02} 以降一定に保つような $V(t)$ は、 t_{02} から $t=t_N$ までを $N-1$ 分割して、つぎの式で近似して数値計算ができる。

$$V(t_N) \approx V_{01} + \frac{k_2}{k_1} V_{01} \log \left\{ \frac{(t-t_{01}+t_0)(t_{02}-t_{01}+t_0)}{(t-t_{02}+t_0)t_0} \right\} + \frac{k_2}{k_1} \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{V(t_i)}{t-t_i+t_0} \right) \quad (4)$$

今回の実験では、長さ 20 mm、耐圧 300 V のグリーンシート法で製造された積層圧電素子を用い、まずこれに

Fig. 3 A schematic drawing of the timing chart of the calculated voltage (a) and the chart of the expansion (b)

Fig. 4 The recorded expansion of the piezoelectric actuator and the applied voltage to achieve the desired expansion

について、ステップ応答のフィッティングにより定数 k_1 , k_2 , t_0 を求めた。つぎに Fig. 1 に示す圧電素子制御測定システムで、ステップ電圧の印加の 20 秒後から(4)式による制御を行った。実測で変位が一定となるように最適化しながら定数を修正した。

ステップ電圧を印加した圧電素子は、電圧印加 1 分後にもクリープ現象のために 1 分間に 50 nm 以上伸びているのに対し (Fig. 2), (4)式を用いて電圧制御を行った場合は、電圧印加の 30 秒後(点 P_3)にはクリープがほぼ打ち消されて停止し、5 分間以上にわたって 10 nm 以内の変動に収まっていることがわかる (Fig. 4)。なお、ステップ電圧を印加した場合は、同程度に収まるまでに 10 分を上回る時間を要する。

4. ま と め

以上のように、あらかじめ行った過渡応答の測定結果を使ってクリープを予測する圧電素子の定位置制御法を考案し、安価な圧電素子に対して制御を行ってクリープを 10 分の 1 以下に減少することができた。なお、今回求めた定位置制御の数式では、そのもとになったステップ応答の実験式が電圧印加直後の急速な変位の変化に当てはまらないため、そのままではクリープの予測の精度向上が望めない。しかし、より時間分解能の高い測定を行えば、急速な変位の変化に対応する数式を正確に求めることができ、この問題は打開されると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 内野研二：圧電/電歪アクチュエータ, 134/154, 森北出版 (1986)
- 2) S. B. Jung and S. W. Kim: Improvement of Scanning Accuracy of PZT Piezoelectric Actuators by Feed-forward Model-reference Control, Precision Engineering, 16-1, 49/55 (1994)
- 3) K. Nakayama, H. Fujimoto, M. Tanaka and K. Kuroda: Silicon Lattice Measurement with an Improved X-Ray/Optical Interferometer, IEEE Trans. IM-42-2, 401/403 (1993)