

圧電アクチュエータ集合体のリアルタイム FEM 制御システムの開発

Development of Real-Time FEM Control System of Connected Piezoelectric Actuators

正 磯部大吾郎 (筑波大)      ○中村 博 (筑波大院)  
清水 隆太 (筑波大院)

In this paper, Finite Element Method (FEM) is proposed to apply for a real-time control system of connected piezoelectric actuators, assuming an actuator as finite elements, which are mainly used in the field of computational mechanics. FEM is capable of expressing the state of the whole system by stiffness equations, and can cope flexibly with lack or disability of constituting members of the system by controlling the stiffness matrices.

An inverse problem theory to calculate the control voltage and empirical formulae of piezoelectric material are applied to GUI application of the control system. The operation of the actuators becomes easier by using the GUI application, which automatically calculates each control voltage and sends signal to a controller. As a result, each function acted accurately and the real-time control of connected actuators by FEM control system has succeeded.

Keyword: Piezoelectric Actuators, Finite Element Method (FEM), Inverse Problem

1. 序論

高速反応性をもち、小型化が可能である圧電アクチュエータを多数連結し、全体としてまとまった動きを実現する制御システム[1]の開発を目指した。その制御法として用いた有限要素法(FEM)は、剛性マトリックスに各要素の情報を盛り込むことによって全体の挙動を把握し、不慮の故障などに対処する冗長性をもたらし利点を持つ。独自のFEM逆解析手法[2]と圧電体の特性経験式を GUI アプリケーションに組み込み、専用電源を通して容易にかつリアルタイムに制御を行うシステムを開発した。

2. 圧電体の特性経験式

圧電体はクリープ、残留変位等の非線形特性を持っている。そこで、以下のようにそれぞれの特性経験式を導出した。

2.1. クリープを考慮した経験式の導出

図 1 に示されるように、圧電体にはクリープが伴う。その先端変位は追従性の比較的速い部分( $u_i$ ;  $i$ : 目標変位番号)と遅い部分( $\delta u$ )すなわちクリープとの和で表される。そこで、 $\delta u$  の時間依存性を漸近指数関数で近似し、時刻  $t$  におけるクリープ変形に関する経験式を導出した。

$$u_{cr} = f_{inc}(\phi_P)(u_i + \delta u) = f_{inc}(\phi_P)\{u_i + (u_c + u_i)(1 - a^{t^c})\} \quad (1)$$

ここで、 $a, c$  はそれぞれ、収束速度定数および収束勾配定数である。 $u_i$  と  $\delta u$  にかかる電圧依存関数は、 $u_i$  にも  $\delta u$  にも

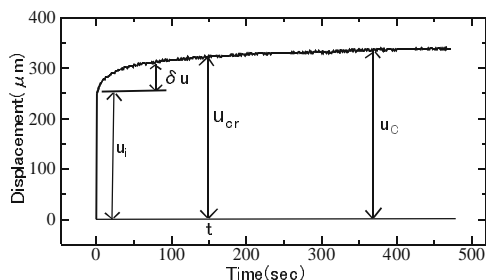


Fig.1: Time history of actuator tip displacement (60V applied)

同じ定電圧が印加されていることから、次のように同じ関数を使って表した。

$$f_{inc}(\phi_P) = 1 + s_{inc}\phi_P^m \quad (2)$$

ここで、 $s_{inc}, m$  はそれぞれ、電圧依存係数および指数である。また、クリープ変形量を含んだ変位  $u_c$  を次式

$$u_c = c_{cr}u_i \quad (3)$$

で表した。ここで  $c_{cr}$  は低電圧時の  $u_c$  と  $u_i$  の比の平均で求められる。

2.2. 残留変位を考慮した経験式の導出

図 2 に示されるように、圧電アクチュエータには残留変位が生じる。そこで、クリープの場合と同様にして、時刻  $t$  における残留変位  $u_{rs}$  に関する経験式を導出した。

$$u_{rs} = f_{inc}(\phi_P)u_i + f_{dec}(\phi_P)u_R b^{(t-t_i)^d} \quad (4)$$

ここで、 $b, d$  はそれぞれ、残留変位時の収束速度定数および収束勾配定数である。 $u_i$  にかかる電圧依存関数は、クリープに関する経験式と同じ関数を用い、右辺第 2 項にかかる電圧依存関数は、新たな関数として(5)式を用いた。

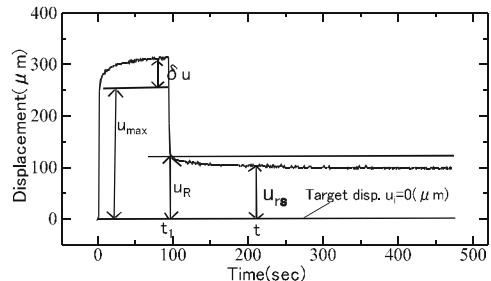


Fig.2: Time history of actuator tip displacement (60V applied)

$$f_{dec}(\phi_P) = \frac{s_{dec1}}{(\phi_{Pmax} - \phi_P)^q} + s_{dec2}\phi_P^n \quad (5)$$

ここで、 $s_{dec1}, s_{dec2}$  は電圧依存係数、 $q, n$  は指数、 $\phi_{Pmax}$  は一連の制御操作中での最大電圧を表す。また、電圧を取り

除いた直後の残留変位  $u_R$  を次式

$$u_R = c_{rs} (u_{\max} - u_i) \quad (6)$$

で表した。ここで、 $u_{\max}$  は一連の制御操作中での最大変位、 $c_{rs}$  は次の目標変位  $u_i$  を  $0 \mu\text{m}$  としたとき、低電圧時での  $u_R$  と  $u_{\max}$  の比の平均で求められる。

### 3. リアルタイム変位制御システムの開発

単純化理論による逆解析手法[2]と圧電体の特性経験式を組み込み、アクチュエータ集合体の FEM 制御システムを開発した。図 3 にその概要図、図 4 に開発した GUI アプリケーションの動作アルゴリズムを示す。図 5 に特性経験式を適用しない場合、図 6 にアクチュエータ間の弾性体を考慮しない場合、図 7 に両者とも考慮した場合のシステム稼働実験の結果を示す。

図 3 に示すように PC 上の GUI アプリケーション上で目標変位入力を行い、計算された制御信号がシリアルケーブルによって、コントローラへ送られる。制御信号を受けたコントローラは電源からの電力を用いて4本のアクチュエータへ電力を供給する。制御モデルとしては、4本のアクチュエータを並列に並べ下部を固定、先端を弾性体で連結したものを採用した。

GUI アプリケーション内部では、FEM 計算の高速化のため、アプリケーション起動時(図 4:①)に要素分割、剛性マトリックスの構築を行う。GUI 上のスクロールバーによる目標変位入力によって、必要電位差の計算が行われる。このとき、図 4:②のように変位入力値を逆解析ルーチンへ送り、FEM と圧電体の特性経験式により計算が行われ、指定周期ごとの必要電位差をリアルタイムに算出している。

図 5,7 を比較すると、クリープ、残留変位ともに適切に補正が行われており、特性経験式の有効性が確認できる。図 6,7 を比較すると、例えば CH2, CH4 の値では図 7 の方が目標変位に近い値となっていることが確認できる。このことから、FEM により

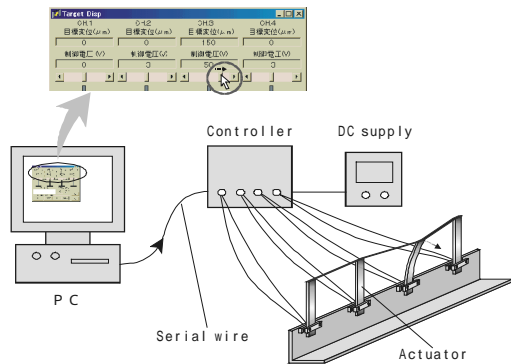


Fig. 3 : Control system

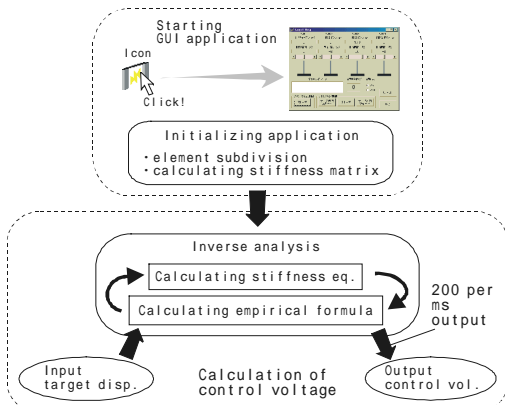


Fig. 4 : Algorithm in GUI application

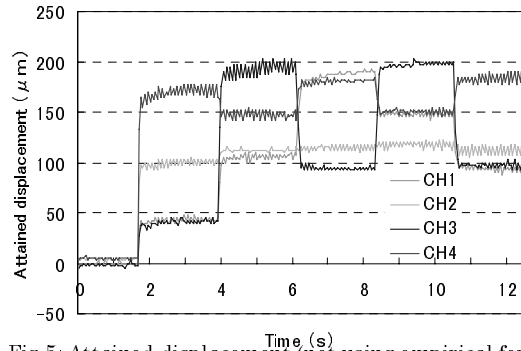


Fig. 5: Attained displacement (not using empirical formulae, considering elastic material)

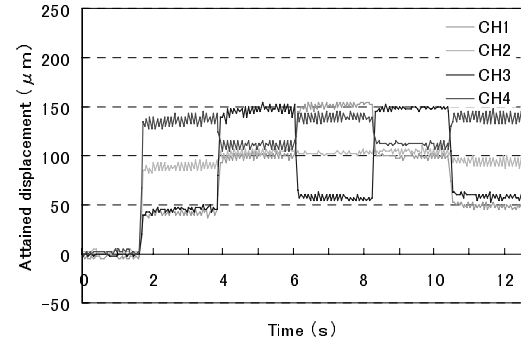


Fig. 6: Attained displacement (using empirical formulae, not considering elastic material)

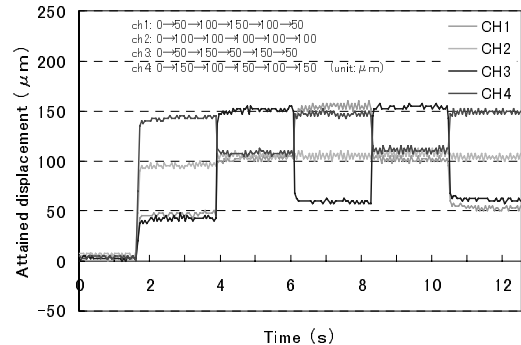


Fig. 7: Attained displacement (using empirical formulae, considering elastic material)

系全体が連続体として取り扱われ、各アクチュエータ間を結ぶ弾性体の影響が考慮できていることがわかる。

### 4. 結論

本研究では、圧電アクチュエータ集合体の FEM リアルタイム制御システムの開発を行った。本システムへの特性経験式の導入により、圧電体のクリープ、残留変位が正確に補正された。また、FEM を制御システムに導入することにより集合体を連続体としてとらえることが確認された。システムの各機能は適切に機能し、圧電アクチュエータ集合体のリアルタイム制御に成功した。

### 参考文献

- [1] 藤井 輝夫, 磯部 大吾郎, 黒田 洋司: 超並列有限要素ロボットの研究-概念と基礎的検討-, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演論文集, Vol.B, (1997), 873-874.
- [2] 磯部 大吾郎, 中川 恒: FEM による圧電アクチュエータ集合体のリアルタイム並列制御, 日本機械学会論文集論文集(A編), 第65巻, 第629号, (1999), 120-126