

圧電アクチュエータ集合体のFEM最適制御システム

FEM Optimum Control System of Connected Piezoelectric Actuators

磯部大吾郎¹⁾, 清水 隆太²⁾, 中村 博³⁾, 山海 嘉之⁴⁾

Daigoro ISOBE, Ryuta SHIMIZU, Hiroshi NAKAMURA and Yoshiyuki SANKAI

1)工博 筑波大学講師 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

2)筑波大学大学院 工学研究科

3)筑波大学大学院 理工学研究科

4)工博 筑波大学講師 機能工学系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, sankai@kz.tsukuba.ac.jp)

In this paper, the Finite Element Method (FEM) is proposed for application to an optimum real time control system of connected piezoelectric actuators, assuming an actuator as finite elements, which are mainly used in the field of computational mechanics. The FEM is capable of expressing the state of an entire system by stiffness equations, and can cope flexibly with lack or disability of constituent elements of the system by controlling the stiffness matrices. An inverse analysis program using the FEM, combined with the empirical formulae considering time-dependent characteristics of the piezoelectric material, is implemented into an optimum control system. The system is verified by the experiments on quasi-static displacement control of connected piezoelectric actuators. The results show the possibility of highly accurate, real-time control of the actuators using the FEM.

Key Words: Piezoelectric Actuators, Finite Element Method (FEM), Inverse Problem, Control System, Noncompatible Finite Element, Creep Deformation, Residual Strain

1. はじめに

従来のロボットは、そのほとんどが剛体と剛体とをジョイントで接続し、モータを駆動源として動かすため、反応が鈍く、動作がごちないといった欠点をもつ。そこで本研究では、高速反応性を示す圧電アクチュエータを多数連結することにより、従来のロボットでは難しかった滑らかな動きをする圧電アクチュエータ集合体ロボットの開発[1]を目指し、その基盤となる圧電アクチュエータ集合体モジュールのリアルタイム制御法の開発をおこなう。制御法としては、主に構造や流体などの数値解析をおこなう手法として用いられるFEM(有限要素法)を使用する。FEMを使用することにより、個々のアクチュエータを有限要素で離散化し、剛性マトリックスに個々の情報を盛り込むことによって全体の挙動を把握することが可能であり、不慮の故障などに対処する冗長性をもたせることができる。しかしFEMは、一般的には要素数の細分化により解の精度を高める必要があるため、リアルタイム処理には不相当である。そこで、曲げ型の面内変位モードを含むことで、少ない要素数でも精度の良い解が得られる非適合要素を導入し[2][3]、解析時間を短縮しリアルタイム性を実現した。

前報告[2]では、圧電アクチュエータに印加される電圧が大きくなるにつれてヒステリシス(履歴)の影響が生じ、目標変位の追従性に若干誤差が生じた。そこで本

報告では、実験的考察から時間依存性のあるクリープ、残留変位の経験式を導出し、それをFEMによる逆解析アルゴリズムと融合させることにより、リアルタイム性を損なうことなく材料特性を精度良く考慮した。

2. 圧電アクチュエータのFEM逆解析

圧電性を考慮した静的状態の剛性方程式[4]は、荷重が与えられない場合、次式で表される。

$$[K_{uu}] \{d\} = -[K_{u\phi}] \{\phi\} \quad (1)$$

ここで、 $[K_{uu}]$:剛性マトリックス、 $[K_{u\phi}]$:圧電剛性マトリックス、 $\{d\}$:変位ベクトル、 $\{\phi\}$:電位ベクトルを表す。上式、およびバイモルフ型圧電アクチュエータ内の電位分布の線形性を利用した逆解析理論[2][3]に基づき、目標変位を得るために必要な制御電圧を計算することができる。

3. クリープ・残留変位を考慮した経験式の導出

FEMによる逆解析では、式(1)に示す一般的な圧電体の構成方程式を用いているため、クリープや残留変位などの時間に依存する効果は考慮されていない。そのため、これらの非線形量分だけ目標とする変位からずれることになる。このずれを取り除く手段として、時間依存項を

考慮した構成方程式を使用し厳密に解く手法が考えられるが、計算時間が長くなり、リアルタイム性を確保する上では必ずしも良策ではない。そこで本研究では、まず10(V)~60(V)までの電圧を10(V)おきにアクチュエータに印加したときのクリープ挙動と、ある程度の時間が経過してから電圧を取り除いたときの残留変位挙動とから特性経験式を導出した。

(1) クリープを考慮した経験式の導出

図1に示すように、圧電アクチュエータに定電圧を印加した場合にはクリープが生じる。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(δu)すなわちクリープとの和で表される[5]。そこで、 δu の時間依存性を漸近指数関数で近似し、任意の時刻におけるクリープ変形 u_{cr} に関する経験式を導出した。

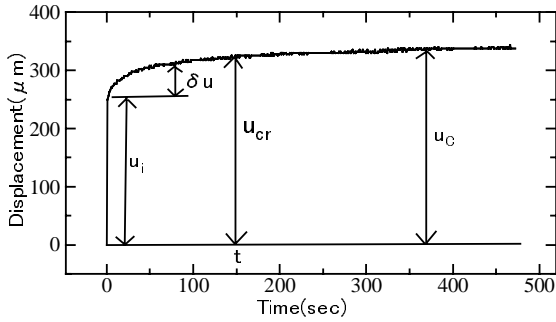


Fig.1 Time history of actuator tip displacement (60V applied)

$$u_{cr} = f_{inc}(\phi_P)u_i + \delta u = f_{inc}(\phi_P)\{u_i + (u_c - u_i)(1 - a^{t'})\} \quad (2)$$

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 にかかる電圧依存関数は、結晶構造の弾性変形に相当する量を表した関数で、印加電圧が高くなるにつれて大きくなる傾向がみられる。 δu にかかる電圧依存関数についても同様の傾向があり、しかも u_i と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。

$$f_{inc}(\phi_P) = 1 + s_{inc}\phi_P^m \quad (3)$$

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 を次式のように表す。

$$u_c = c_{cr}u_i \quad (4)$$

ここで c_{cr} は、低電圧時(5[V]~30[V])の u_i との比の平均から求められる。

(2) 残留変位を考慮した経験式の導出

図2に示すように、圧電アクチュエータに印加されて

いた電圧を取り除いても、変位は $0 \mu m$ には戻らずに残留変位が生じる。そこでクリープの場合と同様に、任意の時刻 t における残留変位 u_{rs} に関する経験式を導出した。

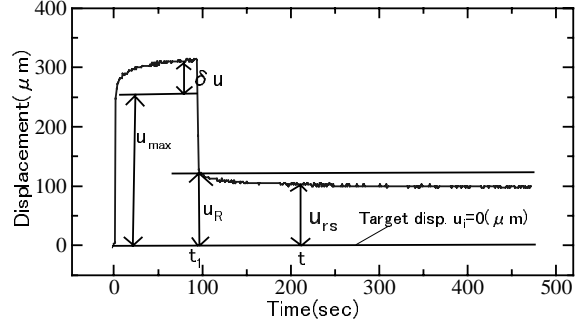


Fig.2 Time history of actuator tip displacement (60V applied)

$$u_{rs} = f_{inc}(\phi_P)u_i + f_{dec}(\phi_P)u_R b^{(t-t_i)^d} \quad (5)$$

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、結晶構造の弾性変形に相当する量を表した関数なので、クリープの場合と同じ関数を使って表した。しかし、 u_R にかかる電圧依存関数は、電圧を取り除く過程で変態しきれなかった結晶が元に戻ろうとする復元量に関する関数である。そこで、電圧の落差に依存する反比例関数と正比例関数の和で表現し、次式のような関数を定義した。

$$f_{dec}(\phi_P) = \frac{s_{dec1}}{(\phi_{Pmax} - \phi_P)^q} + s_{dec2}\phi_P^n \quad (6)$$

ここで、 s_{dec1}, s_{dec2} は電圧依存係数、 q, n は指数、 ϕ_{Pmax} は一連の制御操作中での最大電圧を表す。さらに、電圧を取り除いた直後の残留変位 u_R は、次式で表した。

$$u_R = c_{rs}(u_{max} - u_i) \quad (7)$$

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 $0(\mu m)$ としたとき、低電圧時(5[V]~30[V])での u_R と u_{max} の比の平均として求められる定数である。

4. クリープ・残留変位を考慮した制御アルゴリズム

本研究で開発したクリープおよび残留変位を考慮した制御アルゴリズムについて、図3のフローチャートに従って記述する。まず初期の目標変位 d_i を設定する(a)が、この d_i には電圧依存性が考慮されていない。そこでFEMによる逆解析をおこない、仮の電圧 ϕ_p を算出する(b)。次に電圧依存性を考慮した上で新しく目標変位 u_i を設け

(c)、再び逆解析を実施し、制御電圧 ϕ_p を算出する(d)。制御電圧 ϕ_p を得た後、時間ループに入る(e)。現在の目標変位よりも次の目標変位が大きい場合にはクリープに関する経験式を使用し、逆の場合には残留変位を考慮した経験式を使用する(f)。それぞれの経験式に従って各時間毎の変位を算出し(g)、FEMによる逆解析をおこない、各時間毎の変位に相当する電圧 ϕ'_t を算出する(h)。最後に、過剰電圧($\phi'_t - \phi_p$)を ϕ_p から取り除くことにより、真の制御電圧 ϕ_t を得ることができる(i)。これら一連の操作により、初期の目標変位に対して正確に追従する制御が可能となる。

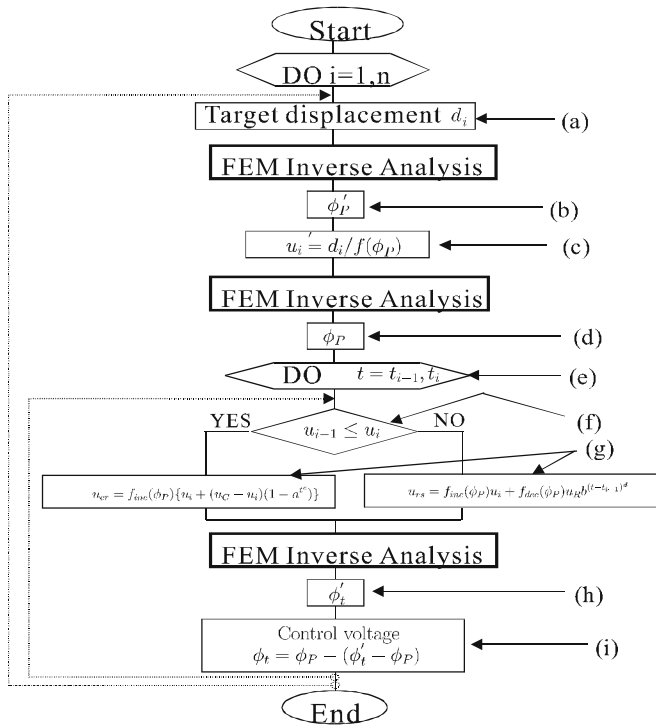


Fig.3 Control algorithm

5. 圧電アクチュエータ集合体のFEM制御実験

本研究で使用したバイモルフ型圧電アクチュエータの形状・寸法、材料定数をそれぞれ 図4,表1に示す。

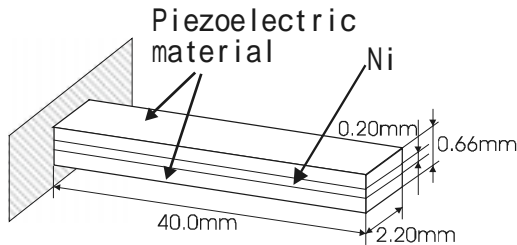


Fig.4 Bimorph piezoelectric actuator

制御実験には、このアクチュエータを並列に4本並べ、下部を固定し、上部を弾性体で連結したモデルを使用した(図5参照)。本実験は、次の2点について確認する

Table1: Material properties

Young's moduli(PZT) [10^{10} N/m ²]	$Y_1=5.0, Y_2=5.5$
Poisson's ratio(PZT)	$\nu_1=0.36, \nu_2=0.36$
Shear modulus(PZT) [10^{10} N/m ²]	$G_2=2.02$
Piezoelectric strain constants [10^{-12} m/V]	$d_{15}=592, d_{31}=-303, d_{33}=603$
Young's moduli(Ni) [10^{10} N/m ²]	$Y_3=21.92$
Poisson's ratio(Ni)	$\nu_3=0.306$

ために実施した。一つは、経験式を導入することにより、ヒステリシスの影響を抑え、アクチュエータが精度よく制御されていることを確認する点、そしてもう一つは、FEMによる制御アルゴリズムが集合体に対して有効に作用し、連続した系の一部として個々のアクチュエータを制御していることを確認する点である。以下に、本研究で開発したリアルタイム制御システムについて記述する。その概略図を図5に示す。

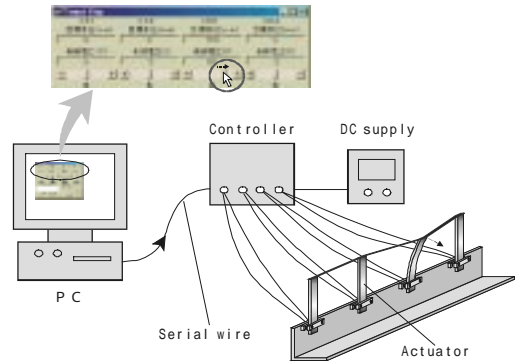


Fig.5 FEM real time control system

まず、GUI(Graphic User Interface)アプリケーション上で目標変位を入力すると、瞬時に逆解析がおこなわれて必要電圧が計算され、シリアルケーブルを通じてコントローラへ送られる。その制御信号を受けたコントローラが、1台の電源から供給される電力により4本のアクチュエータへ各々の電圧を与える仕組みになっている。本システムにより、指定周期ごとの値をリアルタイムに出力することが可能となった。

本制御システムの有効性を調べるために、4本のアクチュエータを両方向へランダムに変化させた場合について、準静的制御実験をおこなった。なお、経験式で使用する各パラメータを、 $a=0.91, b=0.91, c=0.52, d=0.25, s_{inc}=4.0 \times 10^{-9}, s_{dec1}=4.2, s_{dec2}=7.0 \times 10^{-4}, m=4, q=0.5, n=2, c_{cr}=1.20, c_{rs}=0.65$ 、電気-機械結合係数 κ_{ne} を、 $\kappa_{ne}=2.94 \times 10^{-4}$ と設定した。なお、FEMで使用する各アクチュエータの要素分割数は、金属板を含む各層を2要素ずつ、計6つとした。

図6に、各アクチュエータの変形挙動のシミュレーション結果を示す。図7(a)には経験式を考慮しない場合の

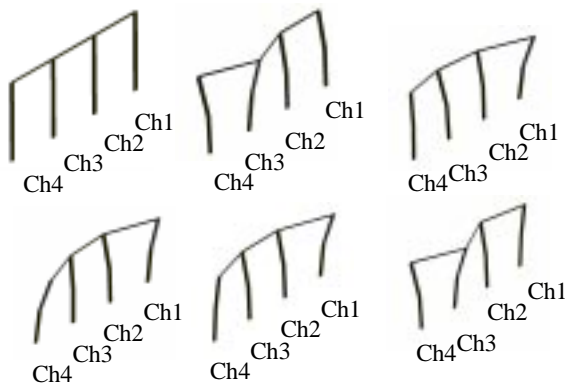


Fig.6 Control simulation of connected piezoelectric actuators
(Disp. $\times 50$)

Target displacement (μm)
 Ch1: 0 \rightarrow 100 \rightarrow 150 \rightarrow 100 \rightarrow 150 \rightarrow 50, Ch2: 0 \rightarrow 100 \rightarrow 100 \rightarrow 100 \rightarrow 100 \rightarrow 100
 Ch3: 0 \rightarrow 100 \rightarrow 150 \rightarrow 50 \rightarrow 100 \rightarrow 150, Ch4: 0 \rightarrow 150 \rightarrow 50 \rightarrow 150 \rightarrow 50 \rightarrow 150

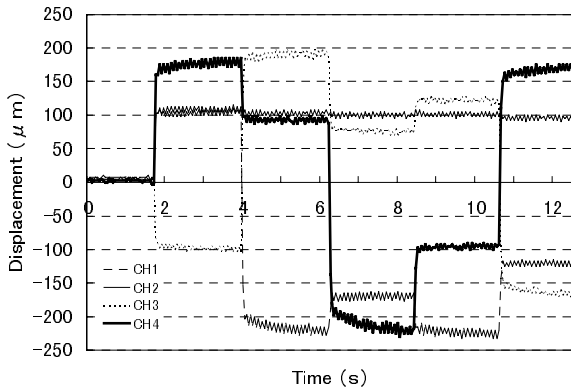


Fig.7(a) Quasi-static displacement control without considering time-dependent characteristics

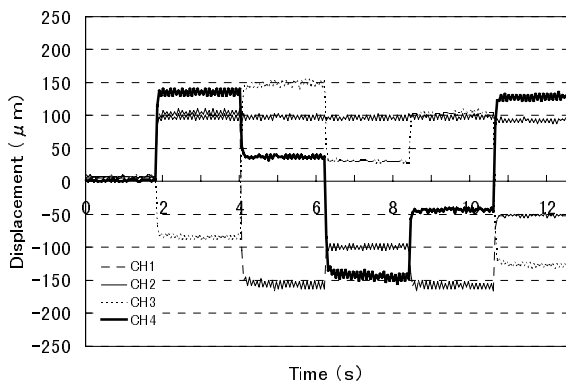


Fig.7(b) Quasi-static displacement control by considering time-dependent characteristics

各アクチュエータに対する先端変位の時刻歴を示し、図7(b)には経験式を考慮した場合の時刻歴を示す。また、図8にはその目標変位を得るのに必要な制御電圧の推移を示した。図7(a)と図7(b)とを比較した結果、図(b)ではクリープおよび残留変位の影響が抑えられ、各アクチュエータが目標とする変位に達していることが確認できる。また、例えば図8のCh1とCh2の同じ100(μm)を目標

とした領域でも、Ch1では34.9(V),Ch2では38.2(V)と違う制御電圧値が計算されている。このことから、ゴムで連結された4本のアクチュエータが1つの連続体として取り扱われ、個々のアクチュエータが連続体の一部として制御されていることが確認された。

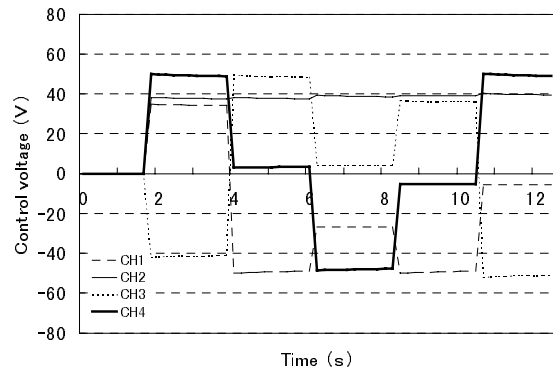


Fig.8 Time history of the control voltage

6. 結言

本研究では、圧電アクチュエータ集合体のFEM最適制御システムの開発をおこなった。非適合有限要素の導入によりリアルタイム性を確保し、時間依存項の経験式の導入により一定変位への高い追従性を実現した。

本システムは、フィードバック制御を頼ることなく、材料の特性情報を最大限に利用した最適制御システムであり、そこに用いたアルゴリズムは他の材料制御システムにも適用可能である。また、FEMを制御法として使用することにより、連続体として取り扱われる系全体を並列的に把握し、突然の故障などにも柔軟に対処できる、冗長性の高い制御が可能となることが考えられる。今後、さらに複雑な系について検討を重ねたい。

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: 圧電アクチュエータ集合体のFEMによる静的オープンループ制御, 計算工学講演会論文集, 第3巻, 第2号, (1998), 511-514.
- [3]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(A編), 第65巻, 第629号, (1999), 120-126
- [4]H.allik,T.j.R.Hughes : Finite element method for piezoelectric vibration , Int. J.Numer. Methods Eng. , Vol2, (1970), 151-157
- [5]Besedow R.W., Cocks T.D. : Piezoelectric ceramic displacement characteristics at low frequencies and their consequences in Fabry-Perot interferometry , J. Phys. E:Sci. Instrum,Vol.13, (1980), 840-844