

## 圧電素子で駆動される小型把持機構の微小発生力制御\*

長南 征二<sup>\*1</sup>, 江 鐘 偉<sup>\*1</sup>, 佐久間 伸一<sup>\*2</sup>

### Force Control of a Miniature Gripper Driven by Piezoelectric Bimorph Cells

Seiji CHONAN, Zhong-wei JIANG and Shinichi SAKUMA

A theoretical and experimental study is presented for the force control of a miniature gripper driven by piezoelectric bimorph cells. One finger of the gripper is modeled by a flexible cantilever with a force sensor attached to its free end. A pair of piezoelectric bimorph cells are glued to both sides of the cantilever. The mate of the finger is assumed to have adequate stiffness and can be modeled by a rigid beam. In the analysis, the output of the force sensor is defined by the arm tip displacement multiplied by the sensor stiffness. Both the PID control and the digital optimal control scheme are introduced to drive the arm so that the tip produces 0.03 N and maintains the commanded value constantly. It is shown that both the experimental and theoretical results are in good agreement with each other, further the piezoelectric bimorph cells work well as an actuator in minute force control of the gripper.

**Key Words:** Dynamics of Machinery, Miniature Gripper, Force Sensor, Minute Force Control, Piezoelectric Actuator, PID Control, Optimal Control

#### 1. 結 言

ロボットの研究開発の発展に伴い、ロボットハンドの高機能化、精密化が要求されている。今後ロボットはさまざまな環境に導入され、それに伴い多種多様な物を把持させる機会が増えてくるものと思われる。その一つに柔らかく壊れやすい小物体を把持する機構があるが、このような機構を実現するためには、マイクロアクチュエータや各種タイプの触覚センサの開発、先端力の微妙な制御が必要である。

ロボットハンドに関する研究<sup>(1)~(4)</sup>では、アクチュエータとしてサーボモータが広く使用され、その動力をワイヤかボールねじによって関節に伝達する方法が採用されている。このような駆動系では摩擦やバックラッシュによって、高速、高精度な位置決めや微小力制御の実現は困難であり、小型化にも限界をもたらす。そこで Ikuta ら<sup>(5)</sup>は形状記憶合金をアクチュエータとして用いたマイクロ把持機構を開発したが、形状記憶合金は高精度が望めない、応答速度が遅いなどの問題点がある。これに対して圧電素子は装置の高速、

高精度さらに小型化を可能とする。

ところで微小な柔らかい対象物を把持するためには把持力の微妙な制御が必要となるが、このためには高精度の接触力センサが不可欠である。接触力センサに関しては市販のものも幾らか見受けられるが、これらは測定範囲が広く、微小力の測定には使用できない。そこで本研究では高感度の半導体ひずみゲージを用いて接触力センサも試作する。

また、対象物を把持するためには把持力を正確に制御する必要があり、そのため力制御型ロボットハンドの研究<sup>(6)~(10)</sup>の過程でさまざまな制御方法が採用されてきたが、その中で一般的かつ実用的なものとしてPID制御と最適制御があげられる。

以上の点にかんがみ、本研究は先端に力センサを有しバイモルフ型圧電素子をアクチュエータとする小型把持機構の微小発生力制御を試み、具体例として把持機構先端に0.03 Nの力を発生させ一定に保持する問題につき数値シミュレーションと実験を行う。理論解析では指先端の力センサを弾性ばねでモデル化し、モード級数展開法およびガレルキン法を用いて運動方程式を解く。制御方法としてはPID制御と積分動作を含む最適制御を採用し、これらの制御効果、実用性などについて比較検討を行う。

\* 原稿受付 平成4年3月27日。

<sup>\*1</sup> 正員, 東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

<sup>\*2</sup> 東北大学大学院。

2. 理論解析

図1は本解析で取扱う圧電素子をアクチュエータとする小型把持機構のモデルである。これは把持機構の片側の指を小型フレキシブルアームとし、アーム根元にアクチュエータとして圧電素子を、さらにアーム先端に接触力センサを取付けたものであり、接触力センサをばね定数  $K_s$  のばねでモデル化している。相手方の指は十分な剛性を有し、図のように剛体でモデル化できるものとする。以下アーム先端の把持力  $F_s$  を一定にするように、圧電素子の発生する曲げモーメント  $M_p$  を制御する問題を考える。

アームが  $x$ - $y$  平面内でのみ振動し、センサが対象物と常に接触していると仮定すると運動方程式は

$$\begin{aligned} & [\rho(x)A(x) + m\delta(x-l)] \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ E(x)I(x) \left( 1 + c \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] \\ & = M_p [\delta'(x) - \delta'(x-l)] - F_s \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここで  $\rho(x)$ ,  $A(x)$ ,  $E(x)$ ,  $I(x)$  はそれぞれ素子・アーム系の密度、断面積、縦弾性係数、断面二次モーメントであり、 $m$  はセンサの質量、 $c$  は内部減衰係数、 $\delta(\cdot)$  はDiracのデルタ関数、 $\delta'(\cdot) = d\delta/dx$  である。また  $F_s$  は対象物がアームに加える力すなわちセンサの出力であり

$$F_s = K_s y(l, t) = K_s y(x, t) \delta(x-l) \quad (2)$$

と表される。ここに  $y(l, t)$  はアーム先端の変位である。

アーム根元には圧電素子が張り付けられているのでアームの断面は不連続となっている。そこでアームを二つの均一はりに分けて考え、固定端側から  $i = I, II$  とし、運動方程式(1)の解を

$$\left. \begin{aligned} y(x, t) &= \sum_{n=1}^N w_n^i(x) f_n(t) \\ i &= I, II \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

とおく。ここに  $w_n(x)$  は圧電素子を有するフレキシブルアームのモード関数であり、次のように与えられる。

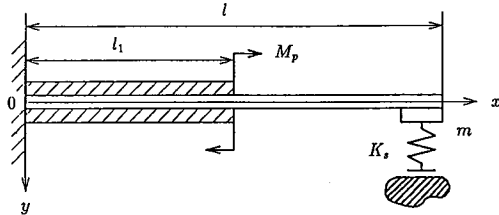


図1 解析モデル

$$\begin{aligned} w_n^i(x) &= A_n^i S(\xi_n^i x) + B_n^i T(\xi_n^i x) + C_n^i U(\xi_n^i x) \\ &+ D_n^i V(\xi_n^i x) + a_n^i \xi_n^i w_n^i(l) V[\xi_n^i(x-l)] H(x-l) \\ i &= I, II \end{aligned} \quad (4)$$

ここに

$$\begin{aligned} (\xi_n^i)^4 &= -\frac{(\rho A)^i b_n^2}{(EI)^i (1 + c p_n)} \\ a_n^i &= -\frac{m p_n^2 + K_s}{E_b I_b (1 + c p_n)} \\ S(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) + \cos(\xi x)] \\ T(\xi x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) + \sin(\xi x)] \\ U(\xi x) &= \frac{1}{2} [\cosh(\xi x) - \cos(\xi x)] \\ V(\xi x) &= \frac{1}{2} [\sinh(\xi x) - \sin(\xi x)] \end{aligned} \quad (5)$$

であり、 $H(x-l)$  はステップ関数、 $p_n$  は複素固有振動数である。固有値  $\xi_n^i$  および未定係数  $A_n^i \sim D_n^i$  はアームの境界条件および要素間において変位、傾き、モーメントおよびせん断力が連続であることにより決定される。

式(3)を式(1)に代入しガレルキン法を適用しマトリックス表示すると運動方程式は

$$M\ddot{F} + \Gamma\dot{F} + KF = UM_p \quad (6)$$

となる。ここに  $F = [f_1(t) \dots f_N(t)]^T$  であり、また  $M$ ,  $\Gamma$ ,  $K$  および  $U$  のマトリックスの要素はそれぞれ

$$\begin{aligned} m_{ij} &= \int_0^l [\rho(x)A(x) + m\delta(x-l)] w_j(x) w_i(x) dx \\ \gamma_{ij} &= \int_0^l c E(x)I(x) \frac{\partial^4 w_j(x)}{\partial x^4} w_i(x) dx \\ k_{ij} &= \int_0^l \left[ E(x)I(x) \frac{\partial^4 w_j(x)}{\partial x^4} \right. \\ &\quad \left. + K_s w_j(x) \delta(x-l) \right] w_i(x) dx \\ u_i &= \int_0^l [\delta'(x) - \delta'(x-l)] w_i(x) dx \\ i, j &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (7)$$

で与えられる。式(6)を連続時間系の状態方程式に表すと

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c M_p(t) \\ F_s(t) &= C_c x(t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし

$$\begin{aligned} x(t) &= \begin{Bmatrix} F(t) \\ \dot{F}(t) \end{Bmatrix}, \quad A_c = \begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}\Gamma \end{bmatrix} \\ B_c &= [O \ M^{-1} \ U]^T, \quad C_c = K_s [w_1 \dots w_N, 0 \dots 0] \end{aligned} \quad (9)$$

である。状態量  $x(t)$  を

$$x(t)=[f_1(t) f_2(t) \dots f_N(t) f_N(t)]^T \dots\dots\dots(10)$$

と並べ換えて式(8)を表すと

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c M_p(t) \\ F_s(t) &= C_c x(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

となる。ここに  $A_c, B_c, C_c$  は  $A'_c, B'_c, C'_c$  の要素を並べ換えたものである。式(11)をサンプリング周期  $T$  で離散化すると状態方程式および出力方程式は

$$\left. \begin{aligned} x(i+1) &= A x(i) + B M_p(i) \\ F_s(i) &= C x(i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

となる。ここに

$$\left. \begin{aligned} A &= \exp[A_c T] \\ B &= \int_0^T \exp[A_c t] B_c dt, C = C_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

である。

以下アーム先端の力が一定値になるように圧電素子の発生する曲げモーメントを制御する問題を考える。制御方法としては積分動作を含む最適制御とPID制御を採用し、それらの制御結果について比較検討する。

式(12)に対し、デジタル最適制御則を適用すると、制御入力

$$\left. \begin{aligned} M_p(i) &= -H x(i) + K z(i) \\ z(i+1) &= z(i) + F_d - [F_s(i) + F_s(i-1)]/2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

で与えられる。ここで第2式は積分器を表しており、ゲイン  $H, K$  は状態量  $x$  と制御入力  $M_p$  の偏差

$$\left. \begin{aligned} x_e(i) &= x(i) - x(\infty), \\ M_e(i) &= M_p(i) - M_p(\infty) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

に対し、評価関数

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} [x_e(i)^T Q x_e(i) + M_e(i+1) R M_e(i+1)] \dots\dots\dots(16)$$

が最小になるように決定される。ここに  $x(\infty), M_p(\infty)$  は  $F_s(i) \rightarrow F_d(i \rightarrow \infty)$  の場合における状態量と制御入力であり、 $Q, R$  はそれぞれ重み行列、重み係数である。

制御則式(14)を実現するためにはすべての状態量を知る必要があるが、実際にはそれは不可能である。そこで検出できない状態量を再現するために最小次元オブザーバを用いる。本研究では実験での演算時間を減らし、サンプリング周期を短くするために、力の時間微分  $\dot{F}_s$  を

$$\dot{F}_s(i) = [F_s(i) - F_s(i-1)]/T \dots\dots\dots(17)$$

で与え、オブザーバの次元を一つ減らす。

まずこの行列

$$S = \begin{bmatrix} C \\ W \end{bmatrix} : W((n-l) \times n) \dots\dots\dots(18)$$

が逆行列を持つように  $W$  を適当に選び、以下の交換を行う。

$$SAS^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, SB = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(19)$$

次に適当な設計パラメータ  $L$  を用い  $\hat{A}$  を

$$\hat{A} = A_{22} - LA_{12} \dots\dots\dots(20)$$

とおくと、最小次元オブザーバは次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(i) &= \hat{D}\omega(i) + \hat{H}F_s(i) \\ \omega(i+1) &= \hat{A}\omega(i) + \hat{K}F_s(i) + \hat{B}M_p(i) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(21)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} \hat{K} &= \hat{A}L + A_{21} - LA_{11} \\ \hat{B} &= B_2 - LB_1 \\ \hat{D} &= S^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n-1} \end{bmatrix} \\ \hat{H} &= S^{-1} \begin{bmatrix} I_l \\ L \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(22)$$

である。

ところで、1次モードのみを考えた場合には次の式を用いて状態量とした。

$$\hat{x}(i) = \begin{bmatrix} K_s w_1 & 0 \\ 0 & K_s w_1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} F_s \\ \{F_s(i) - F_s(i-1)\}/T \end{bmatrix} \dots\dots\dots(23)$$

式(21)または式(23)により状態量を推定した場合には制御則は

$$\left. \begin{aligned} M_p(i) &= -H\hat{x}(i) + Kz(i) \\ z(i+1) &= z(i) + \frac{1}{2}[2F_d - F_s(i) - F_s(i-1)] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(24)$$

となる。

一方、PID制御を用いた場合には制御則は

$$\begin{aligned} M_p(i) &= G_p[F_d - F_s(i)] + G_v[F_s(i) - F_s(i-1)]/T \\ &+ \frac{1}{2}G_i \sum_{k=0}^i [2F_d - F_s(k) - F_s(k-1)] \end{aligned} \dots\dots\dots(25)$$

で表される。ここに  $G_p, G_v$  および  $G_i$  はそれぞれ比例、微分および積分フィードバックゲインである。以

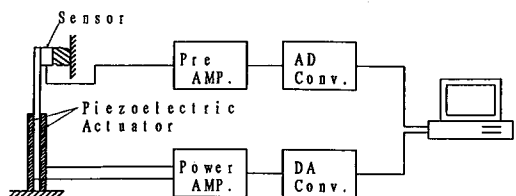


図2 実験装置概略図

上の解析をもとにして数値計算を行う。

### 3. 実験

本実験において使用した実験装置の概略図を図2に示す。実験ではアーム先端の力は、先端に取付けられた接触力センサにより測定され、センサ出力はAD変換後コンピュータに送られ、演算が行われる。演算結果は、DA変換器によりアナログ信号に変換され、パワーアンプで増幅された後に圧電素子に加えられアーム先端力を制御する。

この場合微小な力を測定するための高精度の力センサが必要となるので、本研究では高感度の半導体ひずみゲージを用いて接触力センサを試作した。試作した

表1 はり・素子系の物性値

	Beam	Piezoelectric Cell
Length(m)	$51.9 \times 10^{-3}$	$33.3 \times 10^{-3}$
Width(m)	$12.2 \times 10^{-3}$	$12.2 \times 10^{-3}$
Thickness(m)	$0.3 \times 10^{-3}$	$0.65 \times 10^{-3}$
Density( $\text{kg/m}^3$ )	$8.67 \times 10^3$	$8.3 \times 10^3$
Young's modulus( $\text{N/m}^2$ )	$102.5 \times 10^9$	$58.03 \times 10^9$
Damping coefficient(s)	$4.05 \times 10^{-6}$	
Tip mass(Kg)	$5.05 \times 10^{-3}$	
Stiffness of force sensor(N/m)	$2.11 \times 10^9$	

表2 はり・素子系の固有振動数

		Theoretical Value	Experimental Value
Fixed-Free	1st mode	71.5	71.5
	2nd mode	596	-
Fixed-Elastic	1st mode	123	-
	2nd mode	596	-

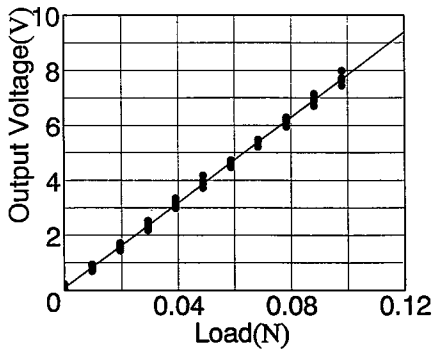


図3 接触力センサ特性

センサの荷重-出力圧特性を図3に示す。図中の黒丸はセンサに荷重を負荷あるいは除荷した場合の出力電圧であり、負荷、除荷ともに5回ずつ測定を行った。結果には多少ばらつきが見られるが線形性があり、最小二乗法を用いて線形化したものが、図中の直線である。この図より0.01N程度の微小な力も測定できることがわかる。

本研究で使用した圧電素子を貼り付けたアームの物性値を表1に示す。また表2には一端固定他端自由の境界条件下での固有振動数および本解析のモデルである一端固定他端ばね支持の境界条件下での固有振動数を示す。自由端を有するはりの2次モードの固有振動数と一端固定他端ばね支持の場合の固有振動数の実験値は、装置の都合により測定ができなかった。しかしながら、一端固定他端自由の場合のアームの1次モードの固有振動数は理論値と実験値と良く一致しており本解析が妥当であることがわかる。

なおPID制御を用いた場合、理論解析で使用した

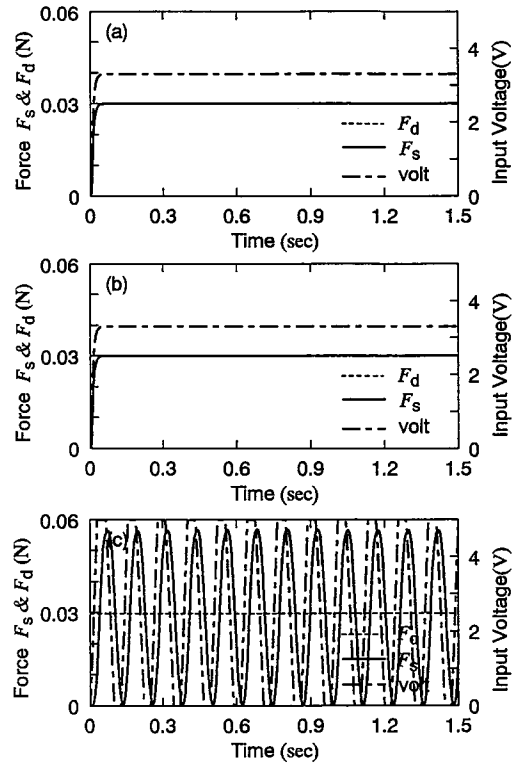


図4 最適制御による先端力応答(2次までを考慮);  $R=0.0001$ ,  $Q=\text{diag}(100 \ 1000 \ 1 \ 10)$ ; (a)計算結果(オブザーバを用いた場合); (b)計算結果(オブザーバを用いない場合); (c)実験結果

フィードバックゲイン  $G_p$ ,  $G_v$ ,  $G_i$  と実験装置でコンピュータから与えるフィードバックゲイン  $fgp$ ,  $fgv$ ,  $fgi$  との間には次のような関係がある。

$$(G_p, G_i) = (fgp, fgi), G_v = 110.6 T fgv \dots (26)$$

#### 4. 数値計算ならびに実験結果とその考察

最適制御則式(13)を用いて先端力を一定値  $F_d = 0.03$  (N) に保持する問題を考える。数値計算, 実験ともにサンプリング周期を 3(msec) とした。まず 2 次モードまでを考慮した場合の制御結果を示す。図 4 は数値計算において制御結果が最も良くなるように重み行列を  $R=0.0001$ ,  $Q=\text{diag}(100 \ 1 \ 000 \ 1 \ 10)$  と選んだ場合の結果である。図中の破線は目標値  $F_d$ , 実線は先端力  $F_s$ , 一点鎖線は制御入力であり, (a) は数値計算で状態量をオブザーバで推定した場合の結果, (b) はオブザーバを用いず状態量を解析的に求めた場合の結果であり, (c) は実験結果である。図(a), (b) の数値計算結果では素早く立上がり収束しているが, そのとき

のゲインを実験に用いた図(c)では制御入力が大きくなりすぎてしまい発散している。図 5 は重み行列を  $R=0.0001$ ,  $Q=(100 \ 100 \ 000 \ 0.001 \ 1)$  と変えた場合の結果である。このとき数値計算では図 4 に比べ立上がりが遅くなっており制御結果が多少劣化しているが, 実験では多少オーバーシュートがあるものの発散しなくなっている。さらに重み行列を  $R=0.00001$ ,  $Q=\text{diag}(100 \ 100 \ 000 \ 0.001 \ 1)$  と適当に調整した場合の結果が図 6 であり, 計算結果は立上がりさらに遅くなっているが, 計算結果と実験結果は類似した傾向を示している。以上の結果より最適制御則を用いた場合, 重み行列の選び方によって数値計算結果と実験結果にはかなりの相違が生じることがわかる。しかしながら以下に示すように, PID 制御則により制御を行った場合は計算および実験結果とも広範囲で良好に対応している。これは, 実際の実験ではアンプや動歪測定器内で入力・出力間に位相遅れが生じることや, 圧電素子のヒステリシスが理論解析では考量されず, また最適制

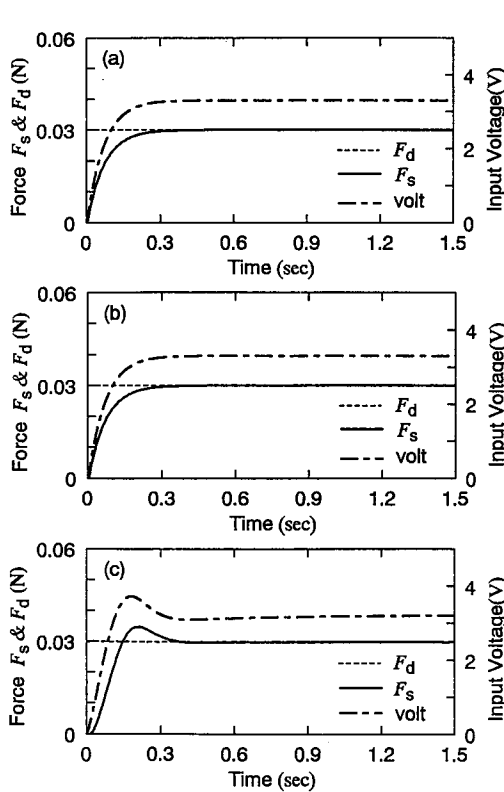


図 5 最適制御による先端力制御(2次モードまでを考慮);  $R=0.0001$ ,  $Q=\text{diag}(100 \ 100 \ 000 \ 0.001 \ 1)$ ; (a)計算結果(オブザーバを用いた場合); (b)計算結果(オブザーバを用いない場合); (c)実験結果

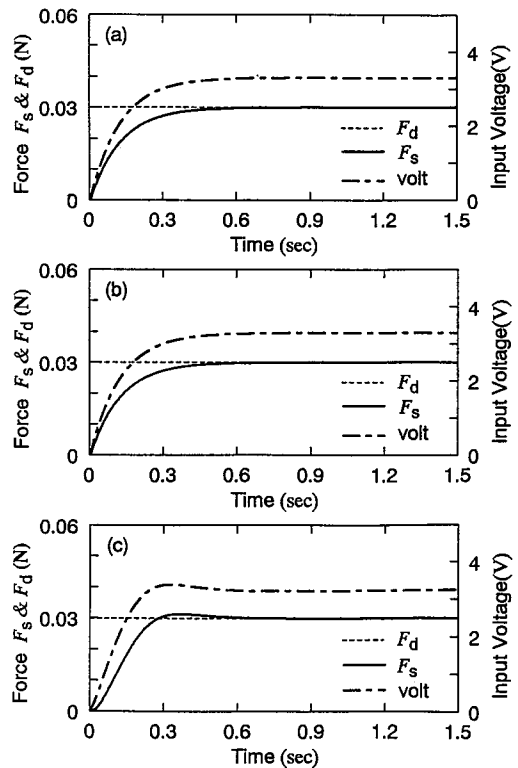


図 6 最適制御による先端力応答(2次モードまでを考慮);  $R=0.00001$ ,  $Q=\text{diag}(100 \ 100 \ 000 \ 0.001 \ 1)$ ; (a)計算結果(オブザーバを用いた場合); (b)計算結果(オブザーバを用いない場合); (c)実験結果

御で系の各モードの状態量を推定できていないことによるものと考えられる。この場合、特に高次モードの状態量が少しでも誤差を持つと重み行列( $Q, R$ )の値によってそれらの誤差が増幅され計算結果と実験結果に大きな相違が出てくることになる。これと比較してPID制御では各モードにフィードバックをかけず直接センサ出力信号にフィードバックをかけるため、実験で各モードの状態量を推定する必要のない形式となっている。

ここまでは2次モードまでを考慮した場合について検討したが、制御系を正確に単純化しサンプリング周期を短くすることなどを考え、1次モードのみを考慮して最適制御した場合の結果を以下に示す。図7は1次モードのみを考慮し最適制御した場合の結果である。図5と7を比較すると数値計算結果、実験結果ともにほぼ一致しており、1次モードのみを考えた場合でも2次モードを考慮した場合と同様の結果が得られている。したがって1次モードのみを考えるだけでも本システムは制御可能であることがわかる。

以上より、最適制御を用いた場合は数値計算では最適な制御結果が得られる。一方実験ではモデル化による誤差や実験条件が完全でないなどにより同一の制御パラメータに対して等しい制御効果は得られないものの、目的とする微小な先端力の制御は可能であると言える。

次にPID制御を用いて最適制御と同一条件下で制御を行った場合の結果を示す。図8はフィードバック

ゲインを  $G_p = fgp = 0.07$ ,  $G_v = 0.001$  ( $fgv = 0.003$ ),  $G_I = fgi = 0.05$  とした場合の結果であり、(a)は数値計算結果、(b)は実験結果である。数値計算、実験ともに約0.3秒で速やかに目標値に収束しており両者の波形は一致している。図9は立上りが速くなるようにゲインを  $G_p = fgp = 0.3$ ,  $G_v = 0.001$  ( $fgv = 0.003$ ),  $G_I = fgi = 0.1$  とした場合の結果である。数値計算結果では細かい振動が現れているが、実験では素早く目標値に

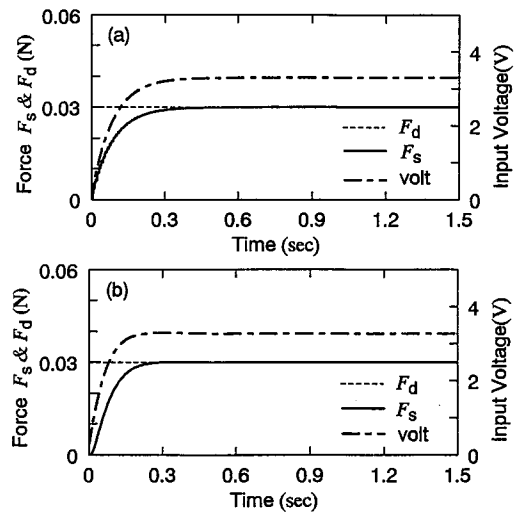


図8 PID制御による先端力応答；(a)計算結果( $G_p = 0.07$ ,  $G_v = 0.001$ ,  $G_I = 0.05$ )；(b)実験結果( $fgp = 0.07$ ,  $fgv = 0.003$ ,  $fgi = 0.05$ )

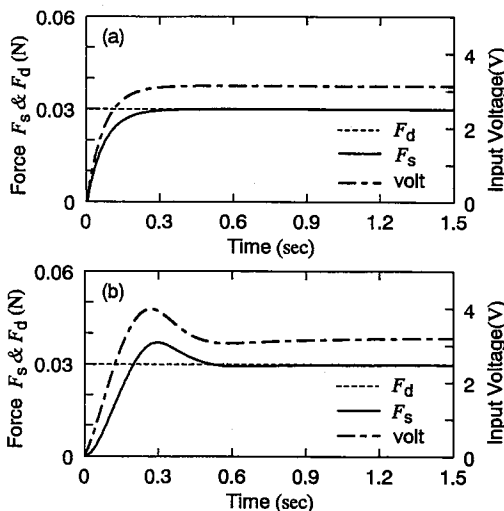


図7 最適制御による先端力応答(1次モードのみを考慮)； $R = 0.0001$ ,  $Q = \text{diag}(100 \ 100 \ 000)$ ；(a)計算結果；(b)実験結果

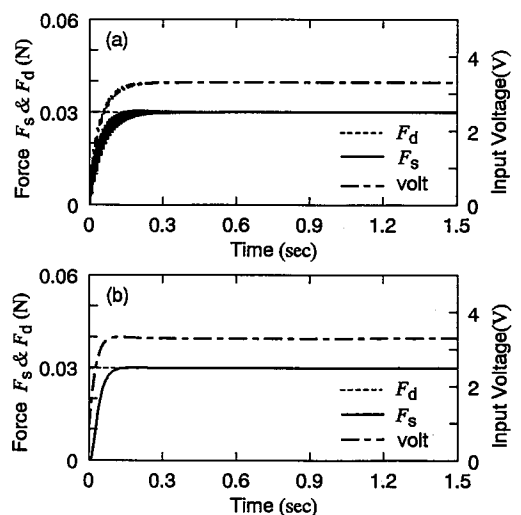


図9 PID制御による先端力応答；(a)計算結果( $G_p = 0.3$ ,  $G_v = 0.001$ ,  $G_I = 0.1$ )；(b)実験結果( $fgp = 0.3$ ,  $fgv = 0.003$ ,  $fgi = 0.1$ )

収束しており良好な結果が得られる。このように、PID 制御を用いることでアーム先端の微小力を制御することが可能であり、また数値計算結果と実験結果は良好に一致していることから、本解析法および解析モードは妥当であると言える。

ここまでは最適制御法と PID 制御法を用いた場合の結果を各々示したが、次に両者の比較検討を行いそれらの関係について調べる。図 10 は数値計算において求められた最も良い結果を示したものであり、図(a)は最適制御を、(b)は PID 制御を適用した場合の結果である。両図を比較すると最適制御を用いた場合には PID 制御を用いた場合に比べ、立ち上がりが早いことがわかる。これに対し実験で得られた最も良い結果が図 11 であり、同様に図(a)は最適制御、(b)は PID 制御を適用した場合である。このようにシミュレーションでは最適制御を用いた場合のほうが PID 制御を適用した場合よりも良い結果が得られている。一方、実験では PID 制御を用いたほうが簡単でかつ良い結果を得られている。したがって、実際の系で状態量が正確に推定できるのであれば最適制御則を用いたほうが良いこと、系の状態量を正確に推定できない場合は PID 制御則を用いたほうが妥当であると言える。しかしながら、PID 制御を用いる場合フィードバックゲインの決定が問題となる。本研究では始めに根軌跡によりゲインを求め、次にシミュレーションによってゲインの微調整を行った後実験に適用する手法を用いている。この場合、離散系における根軌跡はサ

ンプリング周期などでかなり変化し、適当なゲインを求めるにはかなりの検討を要する。一方、最適制御を用いる場合リッカチ方程式を解くことで数値的にフィードバックゲインが比較的容易に得られる。そこで、始めに最適制御則を用いフィードバックゲインを求め、次にその結果を PID 制御に適用することが可能かどうかを検討する。

最適制御を用いた場合の制御入力は式(14)で表されているが、1次モードのみを考慮したときの制御入力は

$$M_p(i) = -(H_1/C_1)F_s(i) - (H_2/C_1)[F_s(i) - F_s(i-1)]/T + Kz(i) \\ z(i+1) = z(i) + F_d - [F_s(i) + F_s(i-1)]/2 \dots\dots\dots (27)$$

となる。このときのゲインを PID 制御に適用することを考える。PID 制御の場合の制御入力は式(25)より

$$M_p(i) = G_p[F_d - F_s(i)] - G_v[F_s(i) - F_s(i-1)]/T + \frac{1}{2}G_I \sum_{k=0}^i [2F_d - F_s(k) - F_s(k-1)] \dots\dots (25)$$

で与えられる。式(25)、(27)を比較すると右辺の第 2、3 項は同形であり、

$$G_v = H_2/C_1, G_I = K \dots\dots\dots (28)$$

とおくことができる。

ところが第 1 項は最適制御では立ち上がり時に零であるが、PID 制御ではある値をとるため、最適制御の第 1 項のゲイン  $H_1/C_1$  をそのまま PID 制御に適用すると制御入力が急激に立ち上がり応答が発散してしま

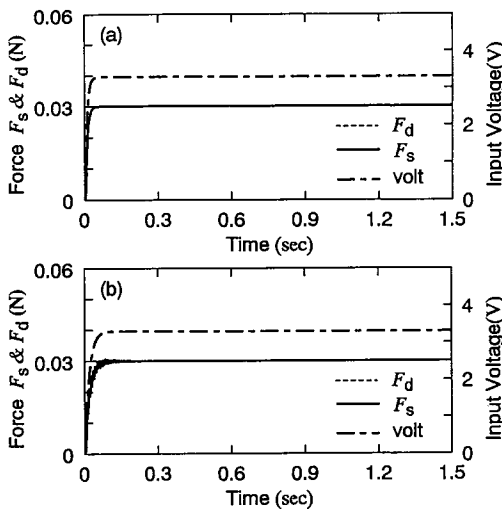


図 10 数値計算における先端力応答；(a)最適制御 ( $R=0.0001$ ,  $Q = \text{diag}(100 \ 1000 \ 1 \ 10)$ )；(b) PID 制御 ( $G_p=0.07$ ,  $G_v=0.001$ ,  $G_I=0.2$ )

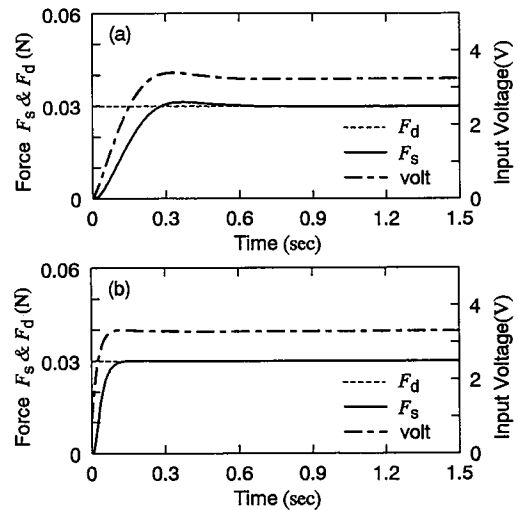


図 11 実験における先端力応答；(a)最適制御 ( $R=0.00001$ ,  $Q = \text{diag}(100 \ 100000 \ 0.001 \ 1)$ )；(b) PID 制御 ( $f_{gp}=0.3$ ,  $f_{gv}=0.003$ ,  $f_{gi}=0.1$ )

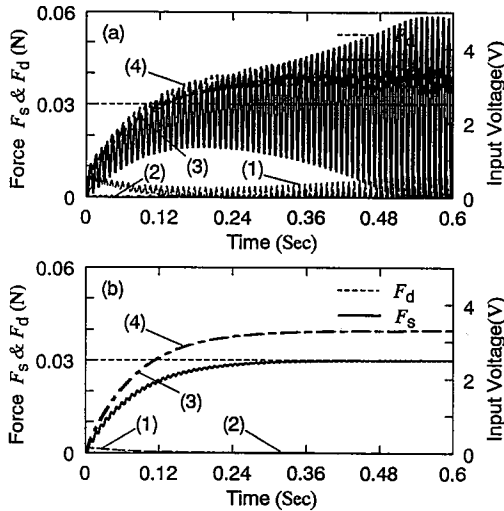


図 12 PID 制御による先端力応答と制御入力 [式(28), (29)よりゲインを換算した場合の計算結果]; (a)  $\alpha=0.5$ ; (b)  $\alpha=0.06$

った。そこで  $(G_p)_{\max} = H_1/C_1$  として  $G_p$  を

$$G_p = \alpha H_1 / C_1 \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad \dots\dots\dots (29)$$

と設定すれば急激な立上がりは避けられると思われる。最適制御のゲインを式(28), (29)により換算し、PID 制御に適用した場合の結果を図 12 に示す。図中の曲線(1)~(3)はそれぞれ PID 制御 [式(25)] の第 1~3 項による制御入力電圧、曲線(4)はこれらを足し合わせた  $M_p$  に対応する制御入力電圧を示す。図(a)は  $\alpha=0.5$  とした場合の結果であり、曲線(1)による入力が急激に立上がり先端力が発散している。これに対し  $\alpha=0.06$  とした場合の結果が図(b)である。始めに多少小さな振動が現れているが約 0.4 秒後に減衰し目標値 0.03 N に収束している。このように 1 次モードのみを考慮し、最適制御により得られたゲインを微調整し、これを PID 制御に適用することにより良好な制御を行うことが可能である。

### 5. 結 言

(1) バイモルフ型圧電素子をアクチュエータとする小型フレキシブルアームに対し、先端のセンサをば

ねでモデル化しモード級数展開法を適用した後に、連続時間系を離散時間系として取扱った。得られた数値計算結果と実験結果は良好に対応しており、本解析法を用いることにより小型フレキシブルアームの先端力制御問題を理論的に把握することができる。

(2) デジタル最適制御を用いて微小な先端力を制御した場合、数値計算では最適な制御結果が得られる。実験においては数値計算結果と同様の制御結果は得られないもののアーム先端の微小力を制御することは可能である。また本制御法を用いた場合は 1 次モードのみを考慮した場合にもシステムの良好な制御が可能である。

(3) PID 制御を適用し先端力を制御した場合には理論、実験とも良好な応答が得られ、PID 制御を採用することにより十分な制御効果が得られる。

(4) デジタル最適制御より求められたゲインを換算し、それを PID 制御に適用し制御を行うことで PID 制御の適切なゲインを比較的容易に得ることができる。

(5) バイモルフ型圧電素子をアクチュエータとして用いることにより、アーム先端の微小把持力を高速、高精度で制御可能である。

なお本研究は(財)マツダ財団、平成 2, 3 年度研究助成金の補助を受けて行われたことを付記する。

### 文 献

- (1) Salisbury, J. K. and Craig, J. J., *Int. J. Robot. Res.*, 1-1 (1982), 4-17.
- (2) 福田・下中, 機論, 53-487, C(1986), 731-738.
- (3) 今村・金子・横井・谷江, 機論, 55-516, C(1989), 2083-2090.
- (4) Dario, P. and Buttazzo, G., *Int. J. Robot. Res.*, 6-3 (1987), 25-48.
- (5) Ikuta, K., Beard, D. C., Ho, S. and Mojin, H., *ASME Winter Annual Meeting*, (1989), 241-246.
- (6) Yoshikawa, T. and Nagai, K., *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 7-1 (1991), 67-77.
- (7) Whitney, D. E., *ASME J. Dyn. Sys., Meas., and Contr.*, (1977), 91-97.
- (8) Raibert, M. H. and Craig, J. J., *ASME J. Dyn. Sys., Meas., and Contr.*, 103 (1981), 126-133.
- (9) Mills, J. K. and Goldenberg, A. A., *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 5-1 (1989), 30-46.
- (10) Seraji, H., *J. of Robot. Sys.*, 4-4 (1987), 551-578.