



Title	2関節剛体-弾性アームの振動制御
Author(s)	小林, 幸徳; 大津, 輝之; 山田, 元
Citation	北海道大學工學部研究報告, 179, 19-29
Issue Date	1997-02-28
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/42481
Type	bulletin (article)
File Information	179_19-30.pdf



[Instructions for use](#)

2 関節剛体-弾性アームの振動制御

小林幸徳 大津輝之 山田 元

(平成8年11月14日受理)

Vibration control of a rigid-flexible two-link arm

Yukinori KOBAYASHI, Teruyuki OOTSU and Gen YAMADA

(Received November, 14, 1996)

Abstract

Vibration control of a rigid-flexible two-link arm that is operated horizontally by two DC-servo motors is investigated. Two piezoelectric actuators are attached to both sides of the flexible arm to improve the vibration control. The equation of motion of the system is derived by Hamilton's principle and the state equation is obtained by means of the constrained modal method. The digital optimal regulator theory is applied to control the arm positioning and the vibration of the flexible arm, and minimal order observer is also introduced. The performance of the controller is investigated by experiments and simulation.

1. ま え が き

宇宙で使用されるマニピュレーターのように、軽量で低剛性なロボットマニピュレーターでは、駆動時や停止時に発生する弾性振動の抑制が重要な問題となっている。その解決策としては、減衰能を高めて振動を吸収する受動型の振動制御と、アクチュエーター等を用いたアクティブ振動制御がある。

従来、1関節弾性アームの位置決めと振動制御においては、一つのモーターによる位置決めと振動制御に関する研究が多くなされている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。しかし、ここで位置決めと振動の制御は相反する関係にある。位置決め性能を向上させるためには、駆動モーターの急な加減速が必要であり、その結果弾性アームの振動が生じやすい。反対に振動を抑制するためには、モーターの速度を抑えて駆動しなければならない。この相反する二つの制御性能を一つのモーターで両立させるのには限界がある。このために制御性能の一層の向上をめざし、アーム駆動用と振動制御用のアクチュエーターを分離して位置決めと振動制御の両立を試みる研究がなされている。中でも片持ちはり等の振動制御においては、圧電素子の逆電圧効果を利用した研究が多い⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。

本研究では、第一アームが剛体、第二アームが弾性体である2関節剛体-弾性アームを制御対象とし、各関節をDCサーボモーターによって直接駆動し、さらに第二アームに圧電素子を接着して、これによって発生するモーメントを利用した振動制御および位置決め制御のシミュレー

ションと実験を行う。そのため、支配方程式を Hamilton の原理によって導出し、拘束モード法を適用して有限次元の状態方程式を得る。そしてデジタル最適制御による実験とシミュレーションを実施し、制御効果を検証する。

2. 理論解析

図 1 に本論文で取り扱う 2 関節弾性アームモデルを示す。静止座標系 $O-XY$ の原点に第一関節を置き、それには長さ l_1 、慣性モーメント J_1 の剛体アームが取り付けられている。このモデルは、点 O を中心として、水平な XY 平面内で回転するものとし、重力の影響は無視する。また、剛体アームとともに回転する座標系を $O-x_1y_1$ 、その回転角を θ_1 とする。第一アームの先端 O_1 には、質量 m_h 、 O まわりの慣性モーメント J_{h0} 、 O_1 まわりの慣性モーメント J_h 、回転半径 r_h の第二関節が取り付けられている。第二関節には、長さ l_2 の弾性アームの一端が固定されていて、その固定端を原点とし、それと共に回転する局所座標系を $x-y$ 、その回転角を θ_2 、第二アームの y 方向変位を v とする。第二アームには、圧電素子が接着されているため、部分的に密度等が異なる段付きはりとし、はりのみの部分の密度、断面積、曲げこわさをそれぞれ、 $\rho_b, A_b, E_b I_b$ とし、圧電素子を接着している部分の密度、断面積、曲げこわさをそれぞれ、 $\rho_a, A_a, E_a I_a$ とする。ただし、 E はヤング率、 I は断面二次モーメントである。また、回転軸 O, O_1 では、アクチュエーターによって、トルク u_1, u_2 が与えられ、さらにはりには圧電素子の両端 l_{a1}, l_{a2} に、圧電素子によるトルク M_a が作用するものとする。

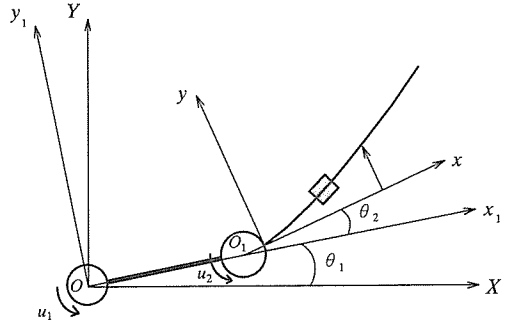


図 1 2 関節剛体-弾性アームの座標系

以上の仮定のもとに系のエネルギー評価を行い、Hamilton の原理を適用して運動方程式を導く。また、得られる運動方程式は無次元を有するので、本論文ではアームの弾性変位を i 次元の片持ちはりの固有関数と時間関数を用いて

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t) \quad (1)$$

と展開し、これを運動方程式に代入することによって有限次元 n の近似式を導出する。

すなわち、第一関節まわりのモーメントの釣り合いより、

$$V_1 \ddot{\theta}_1 + V_2 \ddot{\theta}_2 + \sum_{i=1}^n Q_{1i} \ddot{q}_i = u_1 \quad (2)$$

ここで、

$$V_1 = J_1 + J_{h0} + J_h + \int_0^{l_2} \rho A [l_1^2 + (x + r_h)^2 + 2l_1(x + r_h) \cos \theta_2] dx \quad (3)$$

$$V_2 = J_h + \int_0^{l_2} \rho A [(x + r_h)^2 + l_1(x + r_h) \cos \theta_2] dx \quad (4)$$

$$Q_{1i} = \int_0^{l_2} \rho A (x + r_h + l_1 \cos \theta_2) \phi_i dx \quad (5)$$

第二関節まわりには,

$$V_3 \ddot{\theta}_1 + V_4 \ddot{\theta}_2 + \sum_{i=1}^n Q_{2i} \ddot{q}_i = u_2 \quad (6)$$

ただし,

$$V_3 = J_h + \int_0^{l_2} \rho A [(x+r_h)^2 + l_1(x+r_h) \cos \theta_2] dx (= V_2) \quad (7)$$

$$V_4 = J_h + \int_0^{l_2} \rho A [(x+r_h)^2] dx \quad (8)$$

$$Q_{2i} = \int_0^{l_2} \rho A (x+r_h) \phi_i dx \quad (9)$$

となる。次にたわみ振動の式を求めると,

$$\ddot{q}_i + \omega_i^2 q_i + \sum_{j=1}^n R_{ij} \dot{q}_j(t) + U_{1i} \ddot{\theta}_1 + U_{2i} \ddot{\theta}_2 = M_a(t) \{ \phi_i'(l_{a2}) - \phi_i'(l_{a1}) \} \quad (10)$$

ここで,

$$R_{ij} = \int_0^{l_2} C \rho A \omega_j^2 \phi_i(x) \phi_j(x) dx \quad (11)$$

$$U_{1i} = \int_0^{l_2} \rho A (x+r_h + l_1 \cos \theta_2) \phi_i(x) dx (= Q_{1i}) \quad (12)$$

$$U_{2i} = \int_0^{l_2} \rho A (x+r_h) \phi_i(x) dx (= Q_{2i}) \quad (13)$$

である。なお、 C は減衰係数である。また、 $\dot{}$ は時間に関する微分を表す。

次に、それぞれの関節を駆動するサーボモーターについて、関節トルク u_k を満たす式を求めると,

$$u_k(t) = K_{T_k} i_k(t) - J_{0k} \ddot{\theta}_k(t) - C_{0k} \dot{\theta}_k(t) \\ L_k \frac{di_k(t)}{dt} + R_k i_k(t) + K_{E_k} \dot{\theta}_k(t) = e_k(t) \quad (k=1, 2) \quad (14)$$

ここで、添字 k は k 番目の関節のモーターに関する諸量であることを示し、各係数は

K_{T_k}	: トルク定数	(N · m / A)
J_{0k}	: モーター軸の慣性モーメント	(Kg · m ²)
C_{0k}	: モーター軸の粘性減衰係数	(N · m · s)
L_k	: DCサーボモーター電機子インダクタンス	(V · s / A)
R_k	: DCサーボモーター電機子抵抗	(V / A)
K_{E_k}	: 誘起電圧定数	(V · s)
$i_k(t)$: DCサーボモーターに流れる電流	(A)
$e_k(t)$: DCサーボモーターにかかる電圧	(V)

である。

以上の式を整理すると、状態方程式

$$M \dot{x} = Ax + Bu \quad (15)$$

が得られる。ここで状態量ベクトル x と入力ベクトル u は

$$x = \{ \theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, q_1, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n, i_1, i_2 \}^t \quad (16)$$

$$\mathbf{u} = \{e_1, e_2, v_a\}^t$$

となる。なお、 v_a は圧電素子の電圧であり、 $\mathbf{M}, \mathbf{A}, \mathbf{B}$ は、以下に示すような係数マトリックスである。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_1 + J_{01} & V_2 & 0 & \dots & 0 & Q_{11} & \dots & Q_{1n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_3 & V_4 + J_{02} & 0 & \dots & 0 & Q_{21} & \dots & Q_{2n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & U_{11} & U_{21} & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & U_{1n} & U_{2n} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & L_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & L_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_{01} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & K_{T1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_{02} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & K_{T2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_1^2 & \dots & 0 & -R_{11} & \dots & -R_{1n} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\omega_n^2 - R_{n1} & \dots & -R_{nn} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{E1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & -R_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{E2} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -R_2 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{a1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & M_{an} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

ただし、

$$M_{ai} = \frac{2\kappa E_a l_a}{i a h} \{ \phi'_i(l_{a2}) - \phi'_i(l_{a1}) \} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (20)$$

であり、 l_a は圧電素子の長さ、 h は弾性アームの厚さ、 κ は圧電素子に印加する電圧と生じる伸びとの関係を表す比例定数である。

一方、実験においては、モーターの回転角度 θ_1, θ_2 、回転角速度 $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ 、弾性アームの固定端からの距離 l_{si} の点のひずみ ϵ を検出できるとすると、出力方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{y} = \{ \theta_1, \theta_2, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \epsilon \}^t = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (21)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_1 & \dots & D_n & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

ただし,

$$D_i = \frac{h}{2} \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} \Big|_{x=l_{st}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (23)$$

3. デジタル最適制御系

前節までは連続時間系として解いたが、実際にコンピュータを用いて実験を行うときは、離散時間系で考えなければならない。本研究では、離散化した状態方程式をもとに、デジタル最適制御系を設計することによって、弾性アームの位置決めと振動制御を行う。また、状態フィードバックに必要な状態変数のすべては観測できないので、最小次元の最適オブザーバーもあわせて設計する。

そこでまず、連続時間系の状態方程式をサンプリング周期 T で離散時間系に変換し、その式をもとに離散時間系の制御系を考える。前節の状態方程式をサンプリングタイム T で離散時間系に変換すると、

$$\mathbf{x}(k+1) = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{x}(k) + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{u}(k) \quad (k=1, 2, \dots) \quad (24)$$

ここで、

$$\bar{\mathbf{A}} = \exp(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}T) = \mathbf{I} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}T + \frac{(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A})^2}{2!}T^2 + \frac{(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A})^3}{3!}T^3 + \dots \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{B}} &= \int_0^T \exp(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\tau) d\tau \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \\ &= \left\{ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}T + \frac{(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A})}{2!}T^2 + \frac{(\mathbf{M}^{-1}\mathbf{A})^3}{3!}T^3 + \dots \right\} \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \end{aligned} \quad (26)$$

本報告では最適制御則を用いることとし、評価関数 J を次の離散型の一般的な二次形式で設定する。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\mathbf{x}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{x}(k) + \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \mathbf{u}(k) \right) \quad (27)$$

ここで、 \mathbf{Q} , \mathbf{R} は正定で対称な重み行列である。このとき、定常最適制御則は、

$$\mathbf{u}(k) = -\mathbf{F}\mathbf{x}(k) \quad (28)$$

$$\mathbf{F} = (\mathbf{R} + \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}})^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}} \quad (29)$$

であり、 \mathbf{P} は、離散型リカッチ方程式、

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}} - \bar{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}} (\mathbf{R} + \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{B}})^{-1} \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{A}} \quad (30)$$

を満たす正定対称行列である。なお、本研究においては、この方程式の解法に連続時間系のポッターの方法に対応した手法を用いる⁽⁷⁾。

実験においては、直接計測可能な状態変数と不可能な状態変数があり、そのままでは制御系が

成立しない。そこで、ここでは最小次元オブザーバーを用いて、計測できない状態変数を計算によって求める。離散時間系の最小次元のオブザーバーの式は以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \omega(k+1) &= \hat{A}\omega(k) + \hat{K}y(k) + \hat{B}u(k) \\ \hat{x}(k) &= \hat{D}\omega(k) + \hat{H}y(k) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

ただし、ある $(n-p) \times n$ 行列 U に対して

$$\left. \begin{aligned} \hat{A}U + \hat{K}C &= \hat{U}A \\ \hat{B} &= UK \\ \hat{D}u + \hat{H}C &= \hat{I} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

である。行列 U の決定には、ゴピナスの設計法を用いた。式(28)で表される制御則に状態変数の推定値を用いると、

$$u(k) = -F\hat{x}(k) \quad (33)$$

と表すことができる。この式を式(31)に代入すると

$$\left. \begin{aligned} \omega(k+1) &= \hat{A}\omega(k) + \hat{K}y(k) - \hat{B}F\hat{x}(k) \\ \hat{x}(k) &= \hat{D}\omega(k) + \hat{H}y(k) \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

となる。これが、オブザーバを適用して得られるシステム方程式である。

しかしながら、実験においては計算時間の遅れがあるため $u(k)$ を同時刻の $x(k)$ で求めることは不可能である。そこで、演算時間の遅れを考慮するため $x(k) = \bar{A}x(k-1) + \bar{B}u(k-1)$ なる関係を $x(k)$ の予測式として使用し、この式を上の式に代入して最終的に以下の式を導く。

$$\left. \begin{aligned} u(k) &= -F\bar{A}\hat{x}(k-1) - F\bar{B}u(k-1) \\ \omega(k) &= \hat{A}\omega(k-1) + \hat{K}y(k-1) + \hat{B}u(k-1) \\ \hat{x}(k-1) &= \hat{D}\omega(k-1) + \hat{H}y(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

4. 実験およびシミュレーション

4.1 実験装置

図2に実験装置の概略図を、表1～6に諸元を示す。第一アームはアルミ軽合金を用いて剛体とみなせる直方体リンク、第二アームはアルミ製弾性アームであり、その固有振動数は表2に示すとおりである。圧電素子は積層セラミックス型を使用し、第二アームの根元から22.5 mmの位置に瞬間接着剤によって接着した。また、ひずみ信号は第二アームの根元から45.5 mmに貼付されたひずみゲージによって測定した。デジタル制御則におけるサンプリングタイムは10 ms

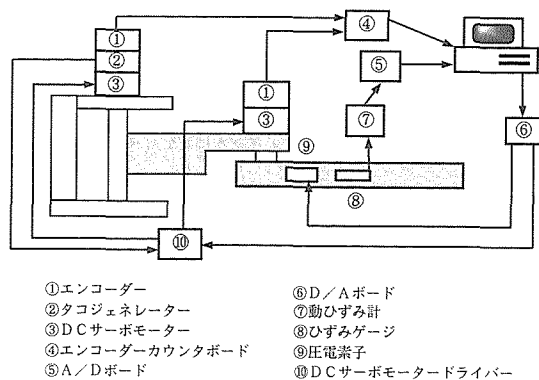


図2 実験装置

表1 第一アームの緒元

l_1	1.13×10^{-1} m
J_1	5.28×10^{-3} Kg·m ²

表2 第二アームの緒元

l_2	0.25	m
b_2	0.02	m
h_2	0.04×10^{-2}	m
E_2	69	GPa
I_2	1.07×10^{-13}	m ⁴
ρ_2	2.71×10^3	Kg/m ³
A_2	8.0×10^{-6}	m ²
C_2	1.0×10^{-4}	N·s/m ²

はりの固有振動数

一次	4.82	Hz
二次	30.24	Hz
三次	84.67	Hz

表3 第二関節の緒元

m_h	0.353×10^{-1}	Kg
r_h	0.02	m
J_h	1.09×10^{-5}	Kg·m ²
J_{h0}	4.03×10^{-4}	Kg·m ²

表4 第一モーターの緒元

K_{T1}	0.1764	N·m/A
J_{o1}	2.05×10^{-5}	Kg·m ²
C_{o1}	6.0×10^{-4}	N·m·s
L_1	6.0×10^{-3}	V·s/A
R_1	10.7	Ω
K_{E1}	0.1768	V·s

表5 第二モーターの緒元

K_{T2}	0.0534	N·m/A
J_{o2}	4.9×10^{-6}	Kg·m ²
C_{o2}	2.5×10^{-5}	N·m·s
L_2	1.4×10^{-3}	V·s/A
R_2	2.7	Ω
K_{E2}	0.05347	V·s

表6 圧電素子の緒元

l_{pa}	18.0×10^{-3}	m
W_{pa}	5.0×10^{-3}	m
E_{pa}	55	GPa
I_a	1.4×10^{-3}	m ⁴
ρ_{pa}	8.0×10^3	Kg/m ³
A_{pa}	2.5×10^{-5}	m ²
l_{pa1}	22.5×10^{-3}	m
l_{pa2}	40.5×10^{-3}	m

とし、弾性振動モードは一次振動のみを考慮する。

また、今回の実験においては圧電素子に印加できる電圧が増幅回路の都合から最大 30 V なので、シミュレーションにおいても圧電素子への入力電圧は最大 30 V とする。さらに、実験装置に特有の摩擦やガタによる起動時の影響を、シミュレーションにおいては弾性変位の初期速度 $\dot{q}_1 = 0.01$ を与えることで考慮した。なお、最適制御系の重み行列は

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{1, 1, 0.001, 0.001, 1, 1, 1, 1\}, \quad \mathbf{R} = \text{diag}\{3, 3, 0.000001\} \quad (36)$$

である対角行列を使用した。

4.2 実験とシミュレーションの比較および考察

第一、第二アームが一直線上にある静止状態から、第一アームを -30° 、第二アームを 30° 回転させて停止する制御実験を行ったときの実験結果を図3と図5に、それらに対応したシミュレーション結果を図4と図6に示す。また、それぞれの関節角およびひずみの整定時間とはりの減衰比および振動数を表7に示す。なお、表中のMはモーターのみ、Pは圧電素子を併用したことを表し、Eは実験、Sはシミュレーションを意味する。(ここで言う整定時間とは、角度においては目的角の5パーセント以内、ひずみにおいては第二アーム先端の弾性変位に変換したときの振動

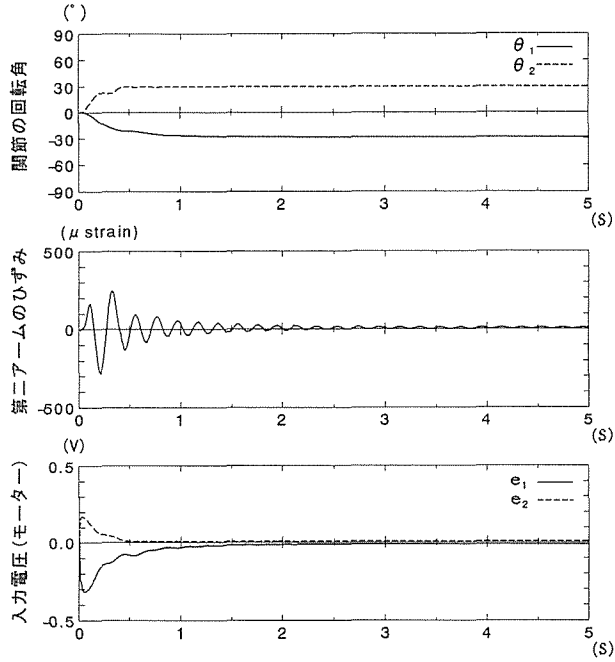


図3 モーターのみによる実験

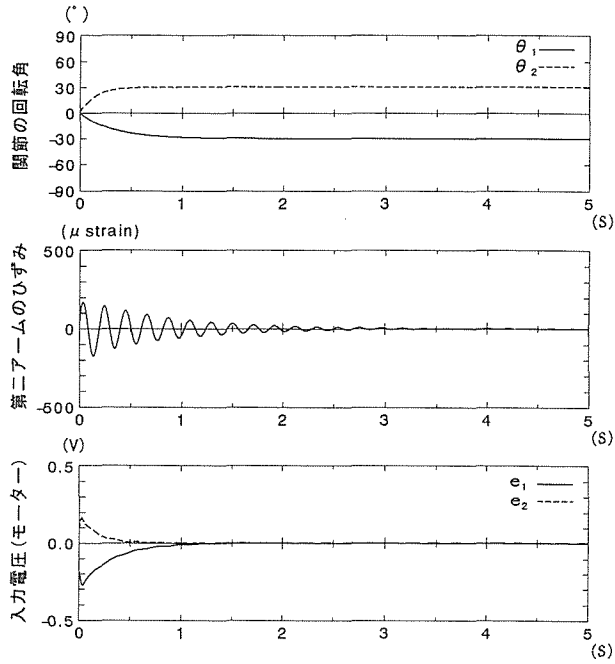


図4 モーターのみによるシミュレーション

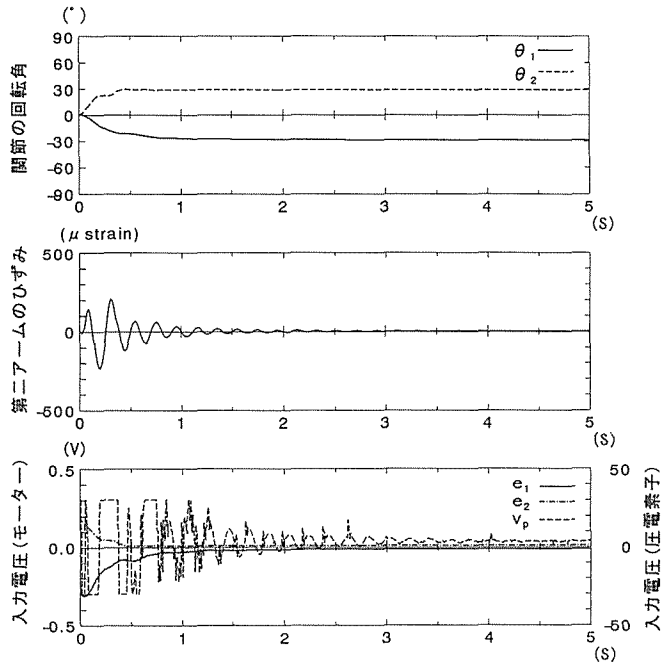


図5 圧電素子を併用した実験

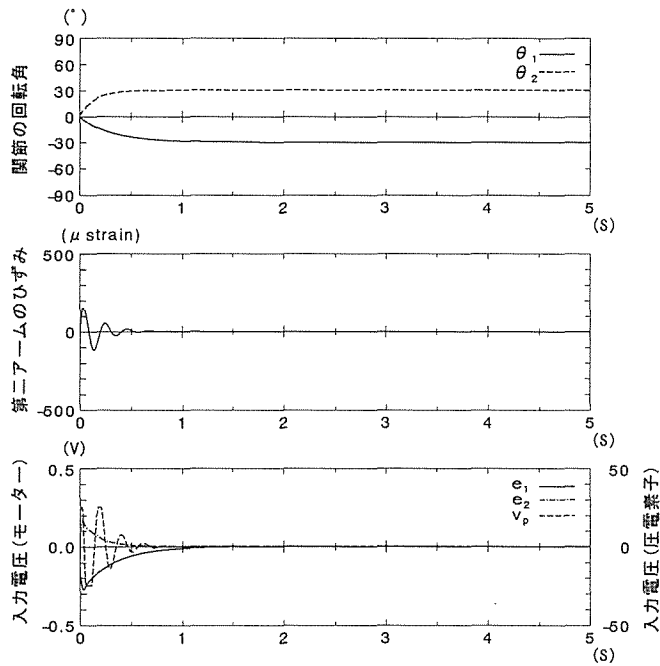


図6 圧電素子を併用したシミュレーション

表7 制振性能の比較

		整定時間(s)			減衰比	振動数(Hz)
		第一関節角	第二関節角	ひずみ		
M	E	1.99	0.45	4.19	0.065	4.79
	S	0.96	0.47	2.67	0.040	4.80
P	E	2.18	0.44	1.97	0.100	4.74
	S	0.96	0.47	0.52	0.175	4.76

振幅が ± 1 mm 以内になるまでの時間を表す。)

図3は、モーターのみを用いて制御した場合の実験結果であり、第二アーム先端の最大変位は約3.5 cmであった。表7の整定時間を見ると、第一関節角度は2秒程度で、第二関節角度が0.5秒ほどで収束している。しかし、指定した角度より約 2° 小さな角度で止まってしまっている。これは入力電圧からわかるように、目的角度に近づくにつれてモーターの電圧が減少し、関節部の摩擦の影響で駆動できなくなったためと考えられる。また、弾性振動の整定時間は4秒を越えており、5秒以降も振動が残留している。同じ条件で行ったシミュレーション(図4)と比較すると、角度と入力電圧の収束状況はほぼ一致するが、弾性振動に関しては駆動直後の挙動に違いが認められる。シミュレーションにおける第二アーム先端の最大変位は約2.2 cmであった。

次に、図5に圧電素子を併用した場合の実験結果を示す。角度はモーターのみの場合とほぼ同様に収束しているが、弾性振動の整定時間は2秒以下となっている。実験における第二アーム先端の最大変位は約3 cm、シミュレーションでは約2.8 cmであった。また、表7中の減衰比を比較すると明らかのように、実験で約1.5倍、シミュレーションでは4倍以上の向上が認められる。

圧電素子に印加された電圧に着目すると、弾性振動がほぼ収束した後もプラス側に電圧がかかり続けていることがわかる。この原因としては、今回の制御系がアームの位置制御および振動制御を統合した形で構成されているため、関節が目的角に収束しないことによるフィードバックによって、圧電素子にも電圧がかかり続けていると考えられる。一方シミュレーション(図6)においては、弾性振動はすみやかに制御され、圧電素子への印加電圧も実験よりかなり小さく抑えられている。これは、実験においては圧電素子の接着ロスや、サンプリングタイムによる位相のずれが生じているためと思われる。

あとがき

2関節剛体-弾性アームの振動制御において圧電素子を併用して実験およびシミュレーションを行った結果、以下の結論を得た。

1. モーターのみによる制御では、実験において駆動直後に関節部の摩擦やガタによると思われる挙動が見られるが、全体としてはシミュレーションと良く一致した。
2. 圧電素子を併用した場合は、モーターのみによる制御に比べ、実験・シミュレーションともに制御性能の向上が認められた。
3. 実験においては、圧電素子の接着ロスや関節角度の定常偏差によるフィードバックが原因と考えられる挙動が見られた。

本研究においては、関節部のガタ等の影響をシミュレーションで初期速度を与えることで簡易に考慮したが、今後これをより適切にモデル化することが必要と考えられる。また、弾性振動の

制御とモーターの回転制御を分離して制御系を設計すれば、上記3に述べた挙動が改善され、一層の性能向上が可能と考えられる。

参考文献

- (1) Book, W. J., Maizza-Neto, O. and Whitney, D. E., Feedback Control of Two Beam, Two Joint Systems With Distributed Flexibility, *Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 97 (1975), 424.
- (2) Cannon, R. H. and Schmitz, E., Initial Experiments on the End-Point Control of Flexible One-Link Robot, *Int. J. of Robotics Research*, 3-3 (1984), 62.
- (3) 福田敏男, フレキシブルロボットアームの制御(第一報 一, 二自由度系の位置ぎめ時の振動制御), 日本機械学会論文集, 51-468, C (1985), 51.
- (4) 内山勝・姜兆慧・箱守京次郎, フレキシブルロボットアームの補償制御, 日本ロボット学会誌, 7-4 (1989), 284.
- (5) Lammerts, I. M. M., Adaptive Computed Reference Computed Torque Control of Flexible Robots, *Trans. ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 117 (1995), 31.
- (6) 羅正華, フレキシブル・マニピュレータの出力フィードバック制御, 日本ロボット学会誌, 12-2 (1994), 200.
- (7) 吉田和夫・下郷太郎・村野健一, 弾性構造系のデジタル最適制御(弾性回転アーム位置決め制御), 日本機械学会論文集, 52-484, C (1986), 3073.
- (8) Bailey, T. and Hubbard, J. E. Jr., Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam, *J. of Guidance Control, Dynamics*, 8-5 (1985), 605.
- (9) 西原修・他3名, 圧電アクチュエータによる片持ばりの振動制御, 日本機械学会論文集, 57-538, C (1991), 1916.
- (10) 江鐘偉・長南征二・谷順二, 圧電素子をアクチュエータとするフレキシブルアームの変位制御(理論解析法ならびに素子の駆動法), 日本機械学会論文集, 56-522, C (1990), 416.
- (11) 谷順二・他5名, 圧電素子による片持ちばりの曲げ振動に対するデジタル最適制御, 日本機械学会論文集, 56-525, C (1990), 1147.