2 自由度制御系を用いたフレキシブルアームの力制御*

奥田 幸治^{*1}, 久原 和征^{*1}
佐々木 実^{*2}, 藤澤 二三夫^{*3}Force Control of Flexible Arm
Using Two-Degree-of-Freedom Control SystemKouji OKUDA, Kazuyuki KUHARA,
Minoru SASAKI and Fumio FUJISAWA

So far, a considerable amount of research has been devoted to flexible arms, especially to their modelling, position control and vibration control. Meanwhile very few research has addressed the problem of force control, since it is one of the most important functions of the robot tasks. In this paper, we present a two-degree-of-freedom control system for the force control of flexible cartesian robots. Use of a two-degree-of-freedom control system guarantees the independent design of the feedforward and feedback control characteristics. The feedforward controller is designed using inverse dynamics, while the design of the stabilized feedback controller is achieved by Lyapunov's direct method. Numerical simulation and experimental results confirm that faster precise force control can be realized with the proposed control system.

Key Words: Flexible Arm, Force Control, Two-Degree-of-Freedom Control System, Lyapunov's Direct Method

1. ま え が き

近年, 産業用ロボットの高速化, 省エネルギー化の要求や, 宇宙用ロボットの打ち上げ時におけるペイロードの重量制限などの理由により, ロボットアームの軽量化が望まれている。アームの軽量化は, 剛性の低下を招くために, アームの運動に伴い弾性振動を発生し, 作業効率を低下させる。特に, 宇宙空間では, 単位時間当たりのコストが莫大であるので, 作業能率の低下は深刻な問題となる。このような背景から, この弾性振動を陽に考慮したフレキシブルアームの制御に関する研究が数多く行われているが, その多くは, モデル化, 位置制御, 振動制御に関する研究についてである。一方, ロボットに課せられる作業を考えた場合, ペイロードの運搬時における対象物の把持や組立作業などの, 対象物と接触した状態での作業が必要とされる。これらの作業は, 位置制御だけによる制御戦略では不十分であり, 力制御が必要とされる。

最も基本的なフレキシブルアームの力制御は, 力を

直接フィードバックする方法である。この方法は最も簡単であるが, フレキシブルアームは非最小位相系となるため, 高ゲイン時において不安定化が問題となることが知られている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。この方法とは別に, 制御帯域の拡大などを目的として, 状態フィードバックを用いた手法⁽⁴⁾⁽⁵⁾が研究されているが, 状態フィードバックを用いた手法は, オブザーバによる状態量の計算も含めて多くの計算を必要とする。空間的な制約やペイロードの制約など厳しい条件が課せられる宇宙用マニピュレータでは, このような手法よりはむしろ計算量の少ないシンプルな制御系が好ましい。また, フレキシブルアームは, 無限自由度の振動モードを有する分布定数系で表される。そのため, 状態空間モデルに基づく制御系の設計を行った場合, コントローラの設計に際しては, モード展開時にモードの打ち切りを行わなければならない, スピルオーバーによる制御性能の劣化や不安定化が問題となる。

フレキシブルアームの位置制御, 振動制御においては, スピルオーバーによる制御性能の劣化や不安定化問題を解決する研究として, リアプノフの安定性理論に着目した研究が行われている⁽⁶⁾。リアプノフの安定性理論に基づいた制御方法は, その制御則が安定であることが理論的に保証されると同時に, すべてのモード

* 原稿受付 1997年4月28日。

*¹ 学生員, 岐阜大学大学院(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)。*² 正員, 岐阜大学工学部。*³ 正員, 八戸工業大学(〒031-0814 八戸市妙字大開88-1)。

についてフィードバック安定化を行えるので、スピルオーバーによる不安定化問題も解決できる。しかしながら、位置制御にみられるような理論的に安定性を保証する論文は、フレキシブルアームの力制御においていまのところ見当たらない。

本論文では、このリアプノフの安定性理論に着目し、力制御における安定な制御則をリアプノフの直接法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を用いて導く。並進形フレキシブルアームの場合、リアプノフの直接法により、システムを漸近安定化するフィードバック量としてアームの根元せん断力が導出される。たわみが大きいというフレキシブルアームの特性を積極的に利用した力制御の研究例⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾は数件見受けられるが、コントローラの設計において運動方程式を静的なものに近似したものや1自由度制御系であるために、優れた過渡応答特性が得られていない。本論文ではまず、逆システムを用いてフィードフォワードコントローラを設計する。フィードフォワード制御は希望する出力が得られるように入力を整形する制御方法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾で、優れた過渡応答特性をもつ。さらに、このフィードフォワード制御とリアプノフの直接法より導出されるせん断力フィードバックを組み合わせ、2自由度制御系⁽¹³⁾を用いて並進形フレキシブルアームの力制御を行う。この2自由度制御を用いることにより、フィードフォワード制御の特徴である過渡応答特性に優れた力制御が期待できると同時に、リアプノフの直接法を用いて導出されるせん断力フィードバックにより、外乱やパラメータ変動に対するロバスト性を有する力制御が期待できる。

本論文では、この2自由度制御系を用いた並進形フレキシブルアームの力制御の有効性を数値シミュレーションと実験の両面から検証する。

Fig. 1 Constrained flexible arm

2. モデル化

図1に対象物によってアームの先端が拘束されているときの並進形フレキシブルアームを示す。アクチュエータである直流モータが回転するとモータに取付けられたシャフトが回転し、ボールスクリュウの機構によってシャフトの回転運動がモービルステージの並進運動に変換され、アームが並進運動する仕組みとなっている。

アームの絶対変位を $w_s(x, t)$ 、モービルステージの絶対変位を $w_b(t)$ 、アームのモービルステージに対する相対変位を $w(x, t)$ とする。 $w_s(x, t)$ 、 $w_b(t)$ 、 $w(x, t)$ の間には次の関係がある。

$$w_s(x, t) = w_b(t) + w(x, t) \quad (1)$$

システムの運動エネルギーを T 、ポテンシャルエネルギーを V 、仮想仕事を W 、拘束条件を C_r とすると、それぞれ、次のように表される。

$$T = \frac{1}{2} \rho A \int_0^l \left\{ \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial w_b(t)}{\partial t} \right\}^2 dx + \frac{1}{2} M_b \left\{ \frac{dw_b(t)}{dt} \right\}^2 \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{2} EI \int_0^l \left\{ \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right\}^2 dx \quad (3)$$

$$W = P(t) w_b(t) \quad (4)$$

$$C_r = w_s(l, t) = w_b(t) + w(l, t) = 0 \quad (5)$$

ここで、 t は時間、 EI はアームの曲げ剛性、 ρ はアームの密度、 A はアームの断面積、 $P(t)$ はシャフトの軸方向に加わる力である。ハミルトンの原理

$$\int_c \delta(T - V + W + \lambda C_r) dt = 0 \quad (6)$$

を用いると、モービルステージの運動方程式は、速度比例形の粘性減衰、Voigt形の粘性減衰およびボールスクリュウの機構を考慮してまとめると次式となる。

$$M_b \frac{d^2 w_b(t)}{dt^2} + C_0 \frac{dw_b(t)}{dt} + EI \left(1 + C \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^3 w(0, t)}{\partial x^3} = H_0 T(t) \quad (7)$$

ここで、 λ はラグランジェ乗数、 $T(t)$ はトルク、 M_b はモービルステージの質量、 C_0 は減衰係数、 H_0 はトルクに関する定数、 C はVoigt形の粘性減衰係数である。アームの運動方程式、および、その境界条件は

$$EI \left(1 + C \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \left(\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + \frac{d^2 w_b(t)}{dt^2} \right) = 0 \quad (8)$$

$$w(0, t) = \frac{\partial w(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$EI\left(1+C\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial^3 w(l,t)}{\partial x^3}+\lambda=0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$EI\left(1+C\frac{\partial}{\partial t}\right)\frac{\partial^2 w(l,t)}{\partial x^2}=0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。

アームの先端で対象物に及ぼす力 $f(x)$ とラグランジェ乗数 λ の関係は拘束条件(5)より

$$f(t)=\lambda\frac{\partial C_r}{\partial w}=\lambda \quad \dots\dots\dots (12)$$

の関係がある。

3. 制御系の設計

3・1 フィードフォワードコントローラ 3章では、フィードフォワードコントローラを設計するために、2章で導出した運動方程式を逆動力学法を使って解くことにより逆システムを導出する。

式(1),(7)~(11)を時間についてラプラス変換すると

$$W_s(x,s)=W_b(s)+W(x,s) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$M_0 s^2 W_b(s)+C_0 s W_b(s)+EI(1+C s)\frac{\partial^2 W(0,s)}{\partial x^2}=H_0 T(s) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$EI(1+C s)\frac{d^4 W(x,s)}{dx^4}+\rho A s^2\{W_b(s)+W(x,s)\}=0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$W(0,s)=\frac{\partial W(0,s)}{\partial x}=0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$F(s)=-EI(1+C s)\frac{d^3 W(l,s)}{dx^3} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$M(s)=EI(1+C s)\frac{d^2 W(l,s)}{dx^2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 $F(s)$ 、 $M(s)$ はそれぞれ目標先端力、目標先端モーメントである。式(15)の一般解は、

$$W(x,s)=k_1 \cos \beta x+k_2 \sin \beta x+k_3 \cosh \beta x+k_4 \sinh \beta x-W_b(s) \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで、

$$\beta^4=-\frac{s^2 \rho A}{(1+C s)EI}$$

であり、 k_1, k_2, k_3, k_4 は境界条件により決まる未定数である。式(19)を式(13)~(18)に代入することによ

り次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(s) \\ M(s) \\ W_s(l,s) \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで、

$$\begin{aligned} a_{11} &= -EI(1+C s)\beta^3 \sin \beta l \\ a_{12} &= +EI(1+C s)\beta^3 (\cos \beta l + \cosh \beta l) \\ a_{13} &= -EI(1+C s)\beta^3 \sinh \beta l \\ a_{21} &= -EI(1+C s)\beta^2 \cos \beta l \\ a_{22} &= -EI(1+C s)\beta^2 (\sin \beta l + \sinh \beta l) \\ a_{23} &= +EI(1+C s)\beta^2 \cosh \beta l \\ a_{31} &= \cos \beta l \\ a_{32} &= \sin \beta l - \sinh \beta l \\ a_{33} &= \cosh \beta l \end{aligned}$$

よって、式(19),(20)より $W(x,s)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} W(x,s) &= \frac{\Delta k_1}{\Delta} (\cos \beta x - 1) \\ &+ \frac{\Delta k_2}{\Delta} (\sin \beta x - \sinh \beta x) + \frac{\Delta k_3}{\Delta} (\cosh \beta x - 1) \quad \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \quad \Delta k_1 = \begin{vmatrix} F(s) & a_{12} & a_{13} \\ M(s) & a_{22} & a_{23} \\ W_s(l,s) & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \\ \Delta k_2 &= \begin{vmatrix} a_{11} & F(s) & a_{13} \\ a_{21} & M(s) & a_{23} \\ a_{31} & W_s(l,s) & a_{33} \end{vmatrix}, \\ \Delta k_3 &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & F(s) \\ a_{21} & a_{22} & M(s) \\ a_{31} & a_{32} & W_s(l,s) \end{vmatrix} \end{aligned}$$

式(21)に先端における目標先端力 $F(s)$ 、目標先端モーメント $M(s)$ 、目標先端位置 $W_s(l,s)$ を代入すると、それらの目標軌道に対応した $W(x,s)$ が得られる。トルク制御形モータの場合は、式(13),(14)に式(21)を代入することによって、速度制御形モータの場合は、式(13)に式(21)を代入することによって入力整形された信号が得られる。式(21)はそのままの形では周波数領域の関数なので、時間領域の関数にするために逆ラプラス変換する必要がある。逆ラプラス変換には、数値逆ラプラス変換法の一つである FILT (Fast Inverse Laplace Transform) 法⁽¹⁴⁾ を適用した。なお、本研究は力制御が目的であるので、 $W_s(l,s)=M(s)=0$ とする。

3・2 制御則の導出 3・1 節では、入力整形法の一つである逆システムを逆動力学問題を解くことによ

Fig. 2 Feedforward control

て得た。図2に入力整形による制御の概念図を示す。入力整形法は、希望する出力が得られるように入力を整形する手法である。原理的には、制御対象の零極点をフィードフォワード制御によってキャンセルすることになるので、過渡応答特性に優れた制御系を設計できる。しかしながら、入力整形法は開ループによる制御法であるため、逆システムにモデル化誤差を含んでいる場合や、プラントに対して外乱が加わった場合に、それらを補償することができない。そこで、この入力整形による開ループ系にフィードバック制御系を付加することができれば、モデル化誤差、外乱等によって生じる振動や定常偏差を効果的に補償することが可能となる。ここで、分布定数系であるフレキシブルアームに対してどのようなフィードバック制御系を設計すればよいかという問題が生じる。すなわち、フレキシブルアームは無次元の振動モードを有するので、状態空間モデルに基づく制御系を設計した場合、モード展開時にモードの打ち切りを行うために、スピルオーバーによる制御性能の劣化や不安定化が問題となる。このような問題を克服する方法として、リアプノフの直接法を利用した研究が数多くなされている。リアプノフの直接法はリアプノフ関数を定義し、その時間微分が負になるように制御則を選定する方法である。モードの打ち切りや近似を行わないので、論理的にはすべてのモードを考慮した制御が可能であり、かつ、その制御系は漸近安定である。

本研究ではリアプノフ関数 $E(t)$ の候補として次式を考える。なお、簡単化のために、ここでは、Voigt形の粘性減衰係数 C は零とする。

$$E(t) = \frac{1}{2} \rho A \int_0^l \left\{ \frac{\partial w_s(x, t)}{\partial t} \right\}^2 dx + \frac{1}{2} EI \int_0^l \left\{ \frac{\partial^2 w_s(x, t)}{\partial x^2} \right\}^2 dx \quad (22)$$

ここで、第1項はアームにおける運動エネルギーを、第2項はアームの曲げひずみによってもたらされるポテンシャルエネルギーである。式(22)を時間について微分すると

$$\frac{\partial E(t)}{\partial t} = \rho A \int_0^l \frac{\partial w_s}{\partial t} \frac{\partial^2 w_s}{\partial t^2} dx + EI \int_0^l \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \frac{\partial^3 w_s}{\partial x^2 \partial t} dx \quad (23)$$

式(23)にアームの運動方程式(8)を代入すると

$$\frac{\partial E(t)}{\partial t} = -EI \int_0^l \frac{\partial w_s}{\partial t} \frac{\partial^4 w_s}{\partial x^4} dx + EI \int_0^l \frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} \frac{\partial^3 w_s}{\partial x^2 \partial t} dx \quad (24)$$

式(24)の第2項を部分積分し、境界条件(9)～(11)を

代入すると次式を得る。

$$\frac{\partial E(t)}{\partial t} = EI \frac{\partial^3 w_s(0, t)}{\partial x^3} \frac{\partial w_s(0, t)}{\partial t} + f(t) \frac{\partial w_s(l, t)}{\partial t} \quad (25)$$

ここで、アームの先端は対象物によって拘束されているので、 $\partial w_s(l, t)/\partial t = 0$ である。よって、式(25)は次式となる。

$$\frac{\partial E(t)}{\partial t} = EI \frac{\partial^3 w_s(0, t)}{\partial x^3} \frac{\partial w_s(0, t)}{\partial t} \quad (26)$$

しかし、式(26)は、このままの形では、正とも負ともなりうる。そこで、式(26)を常に負とするために、制御則を

$$\frac{dw_b(t)}{dt} = -\gamma \left\{ EI \frac{\partial^3 w_s(0, t)}{\partial x^3} \right\}, \quad (\gamma > 0) \quad (27)$$

と選ぶ。すると、式(26)は

$$\frac{\partial E(t)}{\partial t} = -\gamma \left\{ EI \frac{\partial^3 w_s(0, t)}{\partial x^3} \right\}^2 \leq 0 \quad (28)$$

となり、上式は常に非正定値をとる。よって、エネルギーの総和は時間とともに単調に減少することになり、式(27)より、制御入力を根元位置速度、フィードバック量を根元せん断力とすることによって、システムを漸近安定化できることが示される。

次に目標先端力 $\tilde{f}$ に対する先端力 $f(t)$ の誤差の収束性について考える。

$\tilde{f}$ は次式を満たすものとする。

$$\tilde{f} = EI \frac{\partial^3 w_{sd}(l)}{\partial x^3} \quad (29)$$

ここで、 $w_{sd}(x)$ は上式を満たす $w_s(x)$ の解とする。また、 $w_{sd}(x)$ は次式を満たすものとする。

$$\left. \begin{aligned} w_{sd}(0) &= 0, & \frac{\partial w_{sd}(0)}{\partial x} &= 0 \\ EI \frac{\partial^2 w_{sd}(l)}{\partial x^2} &= 0, & EI \frac{\partial^4 w_{sd}(x)}{\partial x^4} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

誤差 $e(x, t)$, $e_s(x, t)$ を次式のように定義し

$$e(x, t) = w(x, t) - w_{sd}(x) \quad (31)$$

$$e_s(x, t) = w_s(x, t) - w_{sd}(x) \quad (32)$$

式(30)を考慮して式(8)～(11)に代入すると

$$EI \frac{\partial^4 e(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \left(\frac{\partial^2 e(x, t)}{\partial t^2} + \frac{d^2 w_b(t)}{dt^2} \right) = 0 \quad (33)$$

$$e(0, t) = \frac{\partial e(0, t)}{\partial x} = 0 \quad (34)$$

$$-EI \frac{\partial^3 e(l, t)}{\partial x^3} + \tilde{f} = f(t) \quad (35)$$

$$EI \frac{\partial^2 e(l, t)}{\partial x^2} = 0 \quad (36)$$

を得る。ここで、式(33)は目標先端力として $\tilde{f}$ の負荷が加えられているときのアームの絶対変位 $w_{sd}(x)$

と $w_s(x, t)$ の間の誤差に関するシステム, 式(34)～(36)は誤差システムに関する境界条件である.

リアプノフ関数 $E_e(t)$ の候補として次式を考える.

$$E_e(t) = \frac{1}{2} \rho A \int_0^l \left\{ \frac{\partial e_s(x, t)}{\partial t} \right\}^2 dx + \frac{1}{2} EI \int_0^l \left\{ \frac{\partial^2 e_s(x, t)}{\partial x^2} \right\}^2 dx \dots (37)$$

式(30)および式(33)～(36)を考慮して式(22)と同様にして式展開を進めると

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_e(t)}{\partial t} &= \frac{\partial^3 e_s(0, t)}{\partial x^3} \frac{\partial e_s(0, t)}{\partial t} \\ &= \left\{ EI \frac{\partial^3 w_s(0, t)}{\partial x^3} - EI \frac{\partial^3 w_{sd}(0)}{\partial x^3} \right\} \frac{\partial w_s(0, t)}{\partial t} \dots (38) \end{aligned}$$

となる. 制御則を

$$\begin{aligned} \frac{dw_b(t)}{dt} &= -\gamma \left\{ EI \frac{\partial^3 w_s(0, t)}{\partial x^3} - EI \frac{\partial^3 w_{sd}(0)}{\partial x^3} \right\}, \\ (\gamma > 0) \dots (39) \end{aligned}$$

と選ぶことにより, 式(38)は

$$\frac{\partial E_e(t)}{\partial t} = -\gamma \left\{ EI \frac{\partial^3 w_s(0, t)}{\partial x^3} - EI \frac{\partial^3 w_{sd}(0)}{\partial x^3} \right\}^2 \leq 0 \dots (40)$$

となり, 上式は常に非正定値をとる. よって, 目標せん断力と実際のせん断力の差をフィードバックすることによって得られる誤差システムは漸近安定であることが示された.

せん断力フィードバックを行った場合の誤差システムの安定性を根軌跡によって示したものを図3に示す. 図中に示すように, 実軸に近いほうから順に一次, 二次, 三次の振動モードの根軌跡を表している. どのモードについても極は安定な左半面に存在し, フィードバックゲインを大きくすることによって, より安定化されることがわかる.

Fig. 3 Root loci with root shear force feedback

漸近安定化可能であるフィードバック量であるせん断力を計測するためのセンサは市販品では存在しないので, 本研究では, 二組のひずみゲージをアームに貼り付けることによってせん断力を測定する. すなわち, アームの根元に貼り付けたひずみゲージによって得られるモーメントの値とアームの根元から微小位置 ($x=\epsilon$) ずらしたところに貼り付けたひずみゲージによって得られたモーメントの値の差をとり, その差を微小距離で割ることによって近似的にせん断力を算出する. これを数式で示すと次のようになる.

$$\begin{aligned} EI \left(1 + C \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^3 w(0, t)}{\partial x^3} \\ = \left\{ EI \left(1 + C \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 w(\epsilon, t)}{\partial x^2} \right. \\ \left. - EI \left(1 + C \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 w(0, t)}{\partial x^2} \right\} / \epsilon \end{aligned}$$

3.3 2 自由度制御系 以上の議論により導出された制御則のブロック線図を図4に示す. ただし, 目標根元位置速度を $\tilde{w}_b(t)$, 目標根元せん断力を $\tilde{S}_f(t)$, 根元せん断力を $S_f(t)$, 入力電圧を $v(t)$ とした. この制御則は, フレキシブルアームを制御するのに, センシングする信号としてアームの根元のせん断力だけを

Fig. 4 Block diagram

Fig. 5 Experimental setup

利用するシンプルなものであり、アームの先端に力センサを取付ける必要がない。よって、システムの軽量化につながるとともに実装が容易である。また、アームのたわみを利用しているため、フレキシブルなアームの特性を生かした制御方法であると言える。

制御入力である根元位置速度 $s\tilde{W}_b(s)$ および目標根元せん断力 $\tilde{S}_f(s)$ はそれぞれ次のようになる。

$$s\tilde{W}_b(s) = s(k_1 + k_3) = s \frac{\Delta k_1}{\Delta} + s \frac{\Delta k_3}{\Delta} \quad \dots\dots\dots (41)$$

$$\tilde{S}_f(s) = -2EI(1 + Cs)\beta^3 \frac{\Delta k_2}{\Delta} \quad \dots\dots\dots (42)$$

4. 実験装置

図5に、本研究で提案した2自由度制御系の有効性を確認するために用いた実験装置を示す。デジタルコントローラ(NECPC 9801 パーソナルコンピュータ)から算出された制御入力信号は、D/A コンバータ、モータドライバを介してモータに送られる。本制御系

では、制御入力を根元位置速度とするので、直流モータのドライバは、速度制御形のものを用いる。根元位置速度信号は、モータに内蔵されたエンコーダより得られる信号をF/V コンバータで変換することで得られる。対象物に力が加わると、アームの根元にせん断力が生じる。せん断力は、アームの根元と根元から1 cm 離れたところに二組のひずみゲージを貼り付け、2箇所のモーメントを測定し、測定された信号を動ひずみ計、A/D コンバータを介してパーソナルコンピュータに取り込み、パーソナルコンピュータ上でそれらの信号の差分をとることによって算出される。実験および数値計算プログラムはC言語を用い、サンプリング周期は6 ms とした。フレキシブルアームに関する物理パラメータを表1に示す。フレキシブルアームは、長方形断面をもつアルミニウムを用いた。

5. 数値シミュレーションおよび実験結果

5章では、提案した2自由度制御系の有効性をシミュレーションおよび実験結果により検証する。先端における目標先端力 $F(s)$ は任意に設定することができる。そこで、目標先端力軌道として、図6に示すBang-Bang 加速度曲線に基づく軌道について検討を行った。その際、負荷力とその立上り時間を -0.2 N, 1.0 s と設定した。Bang-Bang 加速度曲線に基づく軌道は、剛体ロボットの移動を最短時間で行う場合の軌

Table 1 The physical parameters of the flexible arm

Nomenclature	Value	Unit
E	6.32×10^{10}	Pa
I	1.31×10^{-11}	m^4
C	1.12×10^{-4}	s
ρ	2.74×10^3	kg/m^3
A	4.12×10^{-5}	m^2
ℓ	0.978	m

Fig. 6 Desired force trajectory

Fig. 8 Control input voltage

Fig. 7 Desired shear force trajectory

Fig. 9 Control input torque

(a) Tip force

(b) Root shear force

Fig. 10 Simulation results with model error

道である。図7は、目標軌道に対応する目標せん断力である。この条件における制御入力電圧は、式(41)によって得られる根元位置速度をモータの入力電圧に換算することで図8のように求められる。また、トルク入力の場合の制御入力図9のようになる。

図10に Bang-Bang 加速度曲線に基づく軌道を目標先端力軌道とした場合の2自由度制御系を用いた先端の力の時間応答と根元のせん断力の時間応答波形の数値シミュレーション結果を示す。シミュレーション条件として、逆システムの曲げ剛性 EI の値をノミナルプラントの曲げ剛性の値に対して-20%のモデル化誤差を設定してある。これは、逆システムにモデル化

(a) $\gamma=0$ (a) $\gamma=0$ (b) $\gamma=5$ (b) $\gamma=5$ (c) $\gamma=15$

Fig. 11 Experimental results without model error

Fig. 12 Experimental results with model error

誤差を設けることによって、フィードフォワードコントローラは目標先端力軌道に追従不可能となり、定常偏差を生じる。しかし、フィードバックコントローラが補償するように機能するかどうかを確認できれば、2 自由度制御系がモデル化誤差に対してロバスト性を有しているかどうか検証することができる。図 10(a), (b)より、フィードバックゲイン γ の値を大きくすればするほど根元のせん断力は速やかに目標せん断力軌道に追従し、同時に、先端の力もフィードバックゲインの値を大きくすればするほど目標先端力軌道に速やかに追従することがわかる。

図 11 は逆システムの曲げ剛性にモデル化誤差を設けない、すなわち、逆システムがパラメータマッチングされている場合の根元のせん断力の時間応答の実験結果である。モデル化誤差を設けていないので、せん断力は目標せん断力にオーバーシュートなくよく追従している。図 12 は、シミュレーションと同様に、逆システムの曲げ剛性 EI の値をノミナルプラントの曲げ剛性の値に対して -20% のモデル化誤差を設定した場合の 2 自由度制御系を用いた根元のせん断力の時間応答の実験結果である。シミュレーション結果と同様に、フィードバックゲインを大きくすればするほどせん断力は速やかに目標せん断力軌道に追従することがわかる。

6. ま と め

本論文では、並進形フレキシブルアームの力制御における 2 自由度制御系の有効性について検討した。フィードフォワードコントローラを逆動力学問題を解くことによって得られる逆システムにより構成し、過渡応答特性を良くするとともに、リアプノフの直接法を適用してロバスト安定な制御則を導出することによって、フィードバック制御によりモデル化誤差に対するロバスト性を補償した。本力制御システムは、計測の必要な物理量が、根元の位置速度と根元のせん断力のみであるので実装が容易であり、かつ、フレキシブルアームの弾性たわみが大きい特性を積極的に力制御に活かした制御システムであると考えられる。数値シミュレーションおよび実験結果から、提案した 2 自由度制御系が、並進形フレキシブルアームの力制御におい

て、過渡応答特性に優れ、かつ、モデル化誤差に対するロバスト性も有している優れた力制御系であることが示された。

文 献

- (1) Chiou, B. C. and Shahinpoor, M., Dynamic Stability Analysis of a One-Link Force-Controlled Flexible Manipulator, *J. Robotic Systems*, 5-5(1988), 443-451.
- (2) Chiou, B. C. and Shahinpoor, M., Dynamic Stability Analysis of a Two-Link Force-Controlled Flexible Manipulator, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 112(1990), 661-666.
- (3) Matsuno, F., Asano, T. and Sakawa, Y., Modeling and Quasi-Static Hybrid Position/Force Control of Constrained Planar Two-Link Flexible Manipulators, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 10-3(1994), 287-297.
- (4) 松野文俊・笠井正三郎・田中美和子・若城邦子, 1 リンク・フレキシブル・アームのロバスト力制御, 計測自動制御学会論文集, 32-7(1996), 1011-1019.
- (5) 松野文俊・浅野俊雄・坂和幸, 環境に拘束されたフレキシブル・マニピュレータのモデリングと位置と力の動的なハイブリッド制御, 日本ロボット学会誌, 11-3(1993), 419-428.
- (6) Balas, M. J., Direct Velocity Feedback Control of Large Space Structure, *J. Guidance Control*, 2-3(1979), 252-253.
- (7) Shifman, J. J., Lyapunov Functions and the Control of the Euler-Bernolli Beam, *Int. J. Control*, 57-4(1993), 971-990.
- (8) Fujii, H. and Ishijima, S., Mission-Function Control for Slew Maneuver of a Flexible Space Structure, *AIAA J. Guidance Cont. Dyn.*, 12-6(1989), 858-865.
- (9) 金鎮秀・鈴木邦章・内山勝, リンクのひずみを用いるフレキシブルマニピュレータの力制御, 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会 '96 講演論文集, A(1996-6), 173-176.
- (10) 小島宏行・川鍋隆, PIS 制御を用いたフレキシブルロボットアームの位置と力の制御, 日本ロボット学会誌, 10-3(1992), 353-360.
- (11) Singer, N. C. and Seering, W. P., Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 112(1990), 76-82.
- (12) Sasaki, M., Yamagata, E. and Inooka, H., Trajectory Control of a Flexible Robot Arm Using Inverse Dynamics, *Proc. Korean Automatic Control Conf.*, (1988), 987-992.
- (13) Sasaki, M., Okuda, K., Fujisawa, F. and Okamoto, R., Two-Degree-of-Freedom Control System for Motion Control of Flexible Cartesian Robots, *ASME Int. Mech. Eng. Congress Exp.*, Active Control of Vibration and Noise, DE-Vol. 93(1996), 127-134.
- (14) 細野敏夫, 数値ラプラス変換, 電気学会論文誌, 99-10, A(1979), 494-500.