

# 操作型フレキシブルアームの手先振動制御

増井詠一郎 (長岡工業高等専門学校 専攻科), 佐藤 拓史 (長岡工業高等専門学校)

## Vibration Control of Manually-operated Flexible Arm

Yoichiro MASUI (Nagaoka National College of Technology, Advanced Course),  
and Hiroshi SATOH (Nagaoka National College of Technology)

Abstract: This paper deals with vibration control of manually-operated flexible robot arm. Upon request, such as lightweight and high-speed operation of the robot arm, the robot arm will have the flexibility. Many researches of the flexible robot arm have been reported. Trapezoidal velocity function to control for the flexible robot arm has a valid result. However, manual operation would cause vibrations to the arm. In this research, we construct the vibration control system of the flexible robot arm for manual operation. Linear quadratic regulator method is used to design the controller to achieve reduced vibration. Experimental results show the effectiveness of the control system is designed for manual operation.

### 1 緒言

近年、多様化する産業の中でロボットアームは多く用いられている。ロボットアームに対しては、コストダウン、作業の効率化といった観点から軽量化、高速動作、長尺化など様々な要求がある。そのような要求を満たした場合、ロボットアームは柔軟性を有し、駆動する際に振動を励起することがある。このようなロボットアームは駆動する際に上手く軌道生成を行うことで、振動を励起せずに駆動できることが知られている<sup>1, 2)</sup>。

一方で、人がロボットアームを操作する用途が増えてきている。記憶に新しい例では、2010年4月に国際宇宙ステーションで宇宙飛行士の山崎直子さんがロボットアームを操作し、補給を行ったことが挙げられる<sup>3)</sup>。このロボットアームは全長10[m]以上と非常に長尺なものであり、フレキシブル性を有するロボットアームである。補給用モジュールの取り出しから取り付けには数時間かけて行うなど、その操作には高度な技術が必要となる。このように人が直接操作する場合は、決まった動作をさせるのではなく任意に動作させるために用いられる。軌道生成による振動の低減は入力信号が既知である必要があり、このケースに対して適用することは難しい。また、人による操作は操作入力が不規則になりやすく、振動を発生させる要因となる。そこで、手動操作に対しては振動を発生させないのではなく、励起した振動を抑える手法が有効であると考えられる。

そこで、本研究では1リンク回転型フレキシブルロボットアームを構成し、アーム先端の振動を抑える制御系を設計する。コントローラの設計には最適レギュレータ法を用いて、各振動モードを低減させる制御系を構成する。台形状速度関数を用いて軌道生成を行った場合と設計したコントローラを用いてジョイスティックにより手動操作した場合について制御実験を行い両者を比較検討する。ジョイスティック操作を行っても手先振動を抑えることができ、軌道生成を行った場合と同等の制振性能が得られていることを示し、設計したコントローラの有効性を示す。

### 2 実験装置

Fig. 1 に実験装置の構成を示す。制御対象となるロボットのアーム部分は、アルミ材 (750 × 50 × 3[mm]) を使用する。アームの駆動は DC サーボモータ (SANYO T511T-012 110W) にハーモニックドライブを介して行い、速度制御系が構成されたサーボアンプにより駆動する。アーム先端の加速度は加速度ピックアップ (RION PV-85) と汎用振動計 (RION VM-83) を介し

て測定し、アームの回転角度はハーモニックドライブの出力軸にタイミングプーリを介してロータリーエンコーダ (多摩川精機 TS5312N510 2000C/T) により測定する。コントローラの設計には MATLAB, Simulink を用い、制御系の実装には dSPACE 社の DS1104 を用いる。

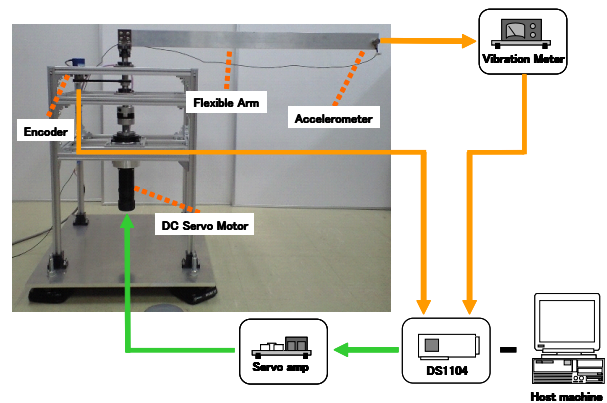


Fig.1 Composition of experimental system

### 3 モデリング

#### 3.1 準備

制御対象となるフレキシブルアームロボットは、フレキシブルアーム部、アームを駆動するモータ系から構成される。得られるシステム情報は、アーム根元の回転角度とアーム先端の加速度であり、アーム先端の加速度は汎用振動計を介して出力される。したがって、本研究での制御対象を Fig. 2 として考えることにする。

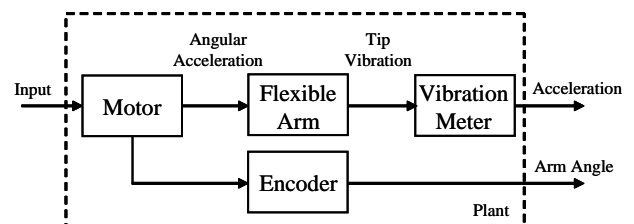


Fig.2 Composition of experimental model

### 3.2 フレキシブルアームのモデリング

フレキシブルアームは連続体であり、無限次元の振動モードを有する．これをそのまま数式モデルとして表現することはできない．まず、有限次元のシステムとして考える必要がある．そこで、本研究では3次振動モードまでを考慮することとする．ここではFig. 3に示す3質点の集中定数系モデルとしてモデリングを行う<sup>4)</sup>．

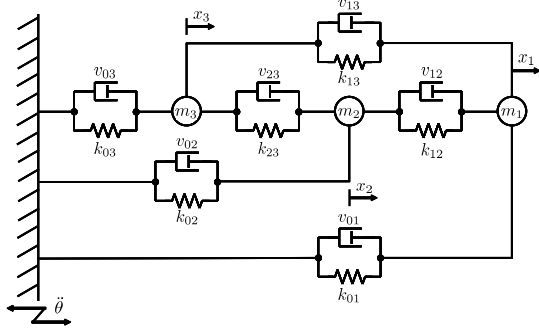


Fig.3 Flexible arm model

各質点の変動量を  $x_j$  とし、 $m_j$  は各質点の質量、 $k_{ij}$  は質点間のはね定数、 $v_{ij}$  は質点間の減衰係数である．また、各質点の加速度影響定数を  $\eta_j$  として、固定端に角加速度  $\ddot{\theta}$  の制御入力加わるとすると、Fig. 3の運動方程式は以下のように表される．

$$[M]\{\ddot{x}\} + [V]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[F]\ddot{\theta} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[V]$ 、 $[K]$  はそれぞれ質量行列、減衰行列、剛性行列であり、 $[F]$  は制御力が働く場所を示す行列である． $\{x\}$  はそれぞれの質点の位置を示す列ベクトルである．

### 3.3 モータ系のモデリング

フレキシブルロボットアームの駆動にはDCサーボモータを用い、モータの駆動には内部に速度制御系が構成されたサーボアンプを用いる．速度制御系が構成されたモータ系を次式に示す3次系として表現する<sup>5)</sup>．

$$\ddot{\theta} + \alpha_1 \dot{\theta} + \alpha_2 \theta = \beta u \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta$  はモータ系の内部パラメータであり、 $u$  はサーボアンプに加える入力電圧である．

### 3.4 汎用振動計のモデリング

アーム先端の加速度は汎用振動計を用いて測定する．この汎用振動計には3次のバターワースローパス特性が組み込まれている．これをセンサ特性として表現する必要がある．汎用振動計の伝達関数を次式のように表現する．

$$H(s) = \frac{\omega_c^3}{s^3 + 2\omega_c s + 2\omega_c^2 s + \omega_c^3} \quad (3)$$

ここで  $\omega_c$  はカットオフ周波数である．

### 3.5 制御対象の数式モデル

前節までに求めた式(1)、(2)、(3)よりアーム部、モータ系、汎用振動計について状態空間モデルを導出する．Fig. 2よりアーム先端の加速度に関してはモータ系、フレキシブルアーム、汎用振動計の直列接続構造となっており、モータの回転角度も観測す

ることを考慮し、制御対象全体の状態空間モデルを導出すると、

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} A_l & B_l C_a & O_{3 \times 3} \\ O_{3 \times 3} & A_a & B_a C_{m1} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 6} & A_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ x_a \\ x_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{3 \times 1} \\ O_{6 \times 1} \\ B_m \end{bmatrix} u \\ y = \begin{bmatrix} C_l & O_{1 \times 6} & O_{1 \times 3} \\ O_{1 \times 3} & O_{1 \times 6} & C_{m2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ x_a \\ x_m \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

として求まる．ここで、添え字  $m, a, l$  はそれぞれモータ系、フレキシブルアーム、汎用振動計に関する係数行列である．また、出力方程式における1行目はアーム先端の振動加速度、2行目は回転角度を表す係数ベクトルである．

### 3.6 パラメータ同定

Fig. 2に示す個々のシステムについてパラメータ同定を行う．得られたパラメータを用いたシミュレーション結果とFFTアナライザを用いた測定結果をFig. 4に示す．

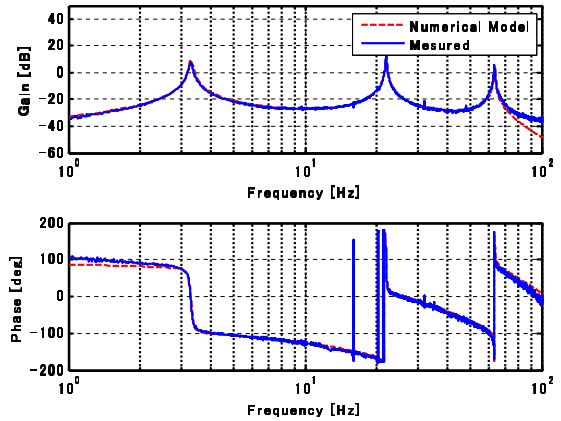


Fig.4 Identification result of experimental system

Fig. 4より、モデリングを行った3次振動モードまでよく一致していることが確認できる．同定した物理パラメータをTable 1に示す．

Table 1 Physical parameters of system

Mass [kg]	Influence coefficient
$m_1 = 0.132$	$\eta_1 = 0.0052$
$m_2 = 0.100$	$\eta_2 = 0.0001$
$m_3 = 0.100$	$\eta_3 = 0.0210$
Stiffness [N/m]	Damping [N·s/m]
$k_{01} = -295.7$	$v_{01} = 0.0404$
$k_{02} = -940$	$v_{02} = 0.0828$
$k_{03} = 12700$	$v_{03} = 0.3096$
$k_{12} = 600$	$v_{12} = 0.0126$
$k_{13} = -50$	$v_{13} = 0.0010$
$k_{23} = 2600$	$v_{23} = 0.0546$
Motor Parameters	
$\alpha_1 = 0.0631 \times 10^4$	
$\alpha_2 = 8.6002 \times 10^4$	
$\beta = 5.1905 \times 10^4$	

## 4 コントローラ設計

### 4.1 設計指針

本研究では、コントローラの設計に現代制御理論の1つである状態フィードバック制御を用いる。フィードバックゲインの設計には最適レギュレータ法を用いる。本制御対象はフレキシブルアーム先端の加速度とアーム根元の回転角度の状態量しか得ることができないため、同一次元オブザーバを構成することで状態量の推定を行う。オブザーバ極の設計には極配置法を用いて、オブザーバ極はレギュレータ極の実部を2倍安定側へ移動させることで設計する。

### 4.2 コントローラ設計

振動問題では、状態量の速度項に重みを置くことでダンピング効果が得られることが知られている。コントローラ設計で用いる状態空間モデルはモード分解を行い、状態量をモード座標系へ変換した<sup>6)</sup>。こうすることで、各モードへ個別にダンピング効果を与えることが可能となる。今回は、振動制御の有無で手先振動に与える影響を検証するため以下に示す2種類のコントローラを設計した。

#### コントローラ 1

$$Q = \text{diag}(0,0,0,0,0,0,0,0,0,15000,0,40)$$

$$R = 30$$

#### コントローラ 2

$$Q = \text{diag}(0,0,0,0,0,0,100000,30000,0,15000,0,40)$$

$$R = 30$$

ここで、コントローラ 1 は振動制御無し、コントローラ 2 は振動制御有りで、1次、2次振動モードに重み係数を与え、各振動モードを低減させる。また、アームを直感的に操作するために、ジョイスティック入力に対する追従性を考慮に入れて、遅れは0.1[sec]以内になるように設計した。

## 5 制御実験

### 5.1 制御系の構成

一般にジョイスティックでの操作は位置指令値よりも速度指令値で与えるほうが直感的に操作しやすい。そこで、速度指令値を位置指令値に変換するために、Fig. 5のように制御系を構成した。

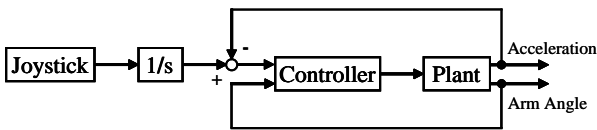
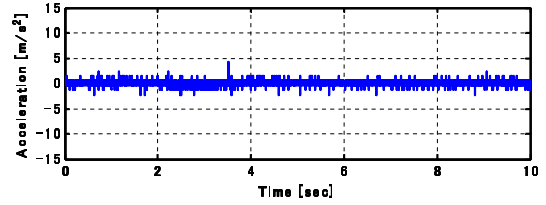
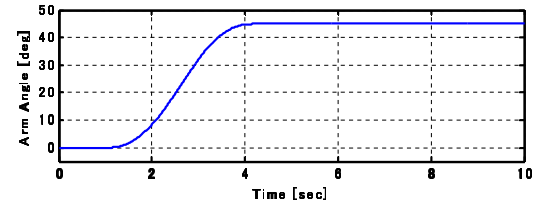


Fig.5 Composition of controlled system for joystick

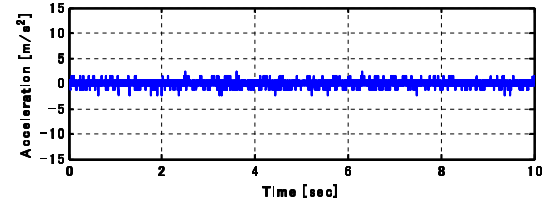
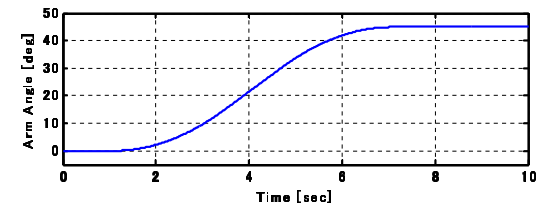
### 5.2 台形状速度入力関数による制御実験

台形状速度関数はロボットの制御でよく用いられる入力関数の一つである。これを積分して位置指令値に変換することで、指令値はS次曲線となり、滑らかにロボットを駆動することができ、振動が励起しにくくなる。振動制御を行わないコントローラ 1を用いて、1[sec]から指令値を与え、目標位置45[deg]までの駆動を3[sec]で行う場合(case1)と6[sec]で行う場合(case2)について実験を行う。その結果をFig. 6に示す。Fig. 6(a)がcase1, Fig. 6(b)がcase2の結果である。グラフはそれぞれ上からアーム根元の角度、アーム先端の加速度である。

アーム根元の角度応答は、どちらも滑らかなS字曲線を描いていることが確認できる。case1では、駆動時に若干振動が励起



(a) case1



(b) case2

Fig.6 Experimental results for trapezoidal velocity control

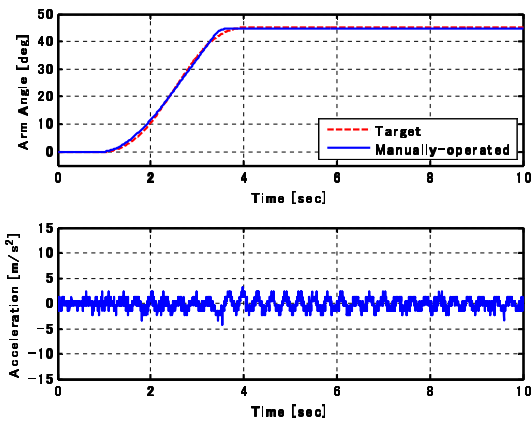
しているが、case2ではまったく振動が励起していないことが確認できる。このように決まった動作をさせる場合には、適切な軌道生成を行うことで振動を生じさせない駆動が実現できる。

### 5.3 手動操作による制御実験

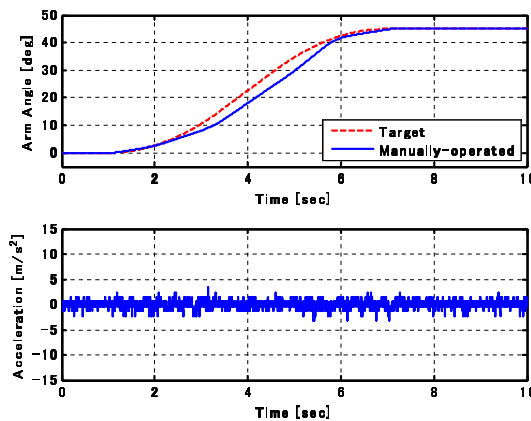
台形状速度関数を用いた場合と同様に振動制御を行わないコントローラ 1を用いて case1 と case2 の条件で実験を行う。アームの操作は台形状速度関数で与えた位置目標値に追従するように行った。その結果をFig. 7に示す。Fig. 7(a)がcase1, Fig. 7(b)がcase2の結果であり、グラフはそれぞれ上からアーム根元の角度、アーム先端の加速度である。

アーム根元の角度応答は、台形状速度関数の場合と同じように操作しているにも関わらず、駆動開始時と停止時に急変化しているため、アーム先端に振動を励起させている。特に、case1の場合には駆動開始時から振動が励起してしまい、先端の位置決め精度は著しく悪い。case2の場合でも、指令値の急変化が起こらないようにゆっくり動作させているにも関わらず、停止時に振動を励起している。このように人が操作した場合は、ゆっくり動作させた場合でも滑らかに指令値を与えることが難しく、わずかな操作ミスで振動が励起してしまうことが確認できる。

次に、振動制御を行うコントローラ 2を用いて case1 と case2 の条件で制御実験を行う。アームの操作は、同様に台形状速度関数で与えた位置目標値に追従するように行った。この時の結果をFig. 8に示す。Fig. 8(a)がcase1, Fig. 8(b)がcase2の結果で



(a) case1



(b) case2

Fig.7 Experimental results for manual operation with controller1

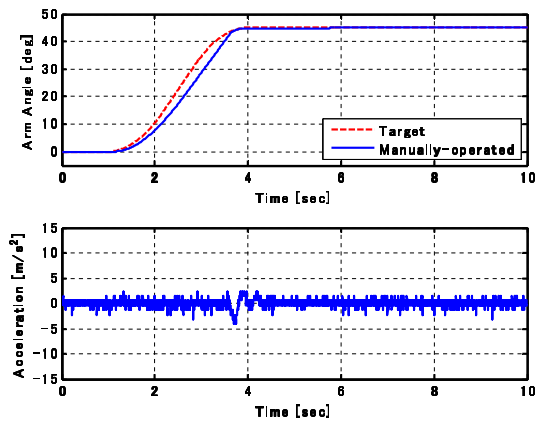
あり、グラフはそれぞれ上からアーム根元の角度、アーム先端の加速度である。

case1 では、駆動時には滑らかに操作できているため振動を励起していないが、停止時にはアームを急激に止める操作をしているため振動を励起している。しかし、振動制御を行うことで0.5[sec] ほどで制振していることがわかる。また、case2 では、まったく振動を励起せず良好な制振結果が得られている。

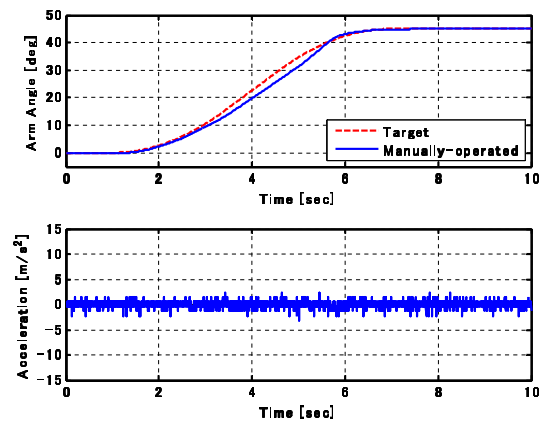
台形状速度関数を用いた場合とコントローラ2の場合のアーム先端の振動応答波形面積を1ノルムとして算出し、面積比率を求めた。その結果をTable 2に示す。両者ともcase2の方が振動を抑制できていることが確認できるが、これは手先振動を抑えるためにはゆっくりと駆動したほうが良いことを反映した結果である。また、振動制御を行うコントローラの場合、手動操作であっても台形状速度関数を用いた場合と同等以上の性能が得られており、その有効性が確認できる。

Table 2 Area ratios of response

	case1	case2
Trapezoidal velocity control	65.8977	56.5435
Manual operation with controller2	63.8499	52.3447
Area ratio	0.9689	0.9257



(a) case1



(b) case2

Fig.8 Experimental results for manual operation with controller2

## 6 結 言

フレキシブルロボットアームの手先振動を抑え駆動させる制御系を構成するために、1リンク回転型フレキシブルロボットアームを構成した。台形状速度関数を用いた位置指令値を与えた場合、手先振動が発生しにくい制御であることを確認した。しかし、同様の入力をジョイスティックを用いて行っても、手先振動を励起してしまい、十分な制御性能が得られないことを確認した。そこで、ジョイスティックを用いてフレキシブルアームを手動操作した場合でも振動を抑えるコントローラを最適レギュレータ法を用いて設計し、制御実験でその有効性を確認した。台形状速度関数を用いた場合と手動操作を用いた場合を比較し、同等の制振性能を得られるコントローラを設計することができた。

## 参考文献

- 1) 小島宏行, 関節角目標値計画によるフレキシブルロボットアームの残留振動抑制制御に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 65 巻, 635 号, 2659/2664, (1999)
- 2) 阿部晶, 駆動トルクに着目したフレキシブルマニピュレータの軌道計画, 日本機械学会論文集 (C 編), 74 巻, 745 号, 154/161, (2008)
- 3) <http://www.jaxa.jp/>
- 4) 背戸一登, 構造物の振動制御, コロナ社, (2008)
- 5) 森政弘, 小川鑛一, 初めて学ぶ基礎制御工学, 東京電機大学出版局, (2008)
- 6) 永井正夫, 景山一郎, 田川泰敬, 振動工学通論, 産業図書株式会社, (1995)