

# 先端質量の変動に対する フレキシブルロボットアームの振動制御

斎藤創 佐藤拓史 (長岡工業高等専門学校)

## Vibration Control of Flexible Robot Arm for Tip Mass Variations

\*H. Saitoh, H. Satoh (Nagaoka National College of Technology. )

**Abstract**— This paper deals with vibration control of the flexible robot arm for tip mass variations. Robot arm has been used in many fields of industry. Upon request, such as lightweight and high-speed operation of the robot arm, the robot arm will have the flexibility. Therefore, many researches about flexible robot arm have been reported. We have constructed the vibration control system of flexible robot arm for manual operation. However, the designed controller does not satisfy the control performance for parameter variations of the robot arm which assumed the luggage. In this research, we construct the vibration control system of flexible robot arm for tip mass variations. The experimental results show the effectiveness of the designed control system for tip mass variations.

**Key Words:** Vibration Control, Flexible Robot Arm, Mass Variation, Manual Operation

### 1 緒言

近年、様々な場面でロボットアームが用いられている。ロボットアームには、作業領域拡大のための長腕化、作業効率を上げるための高速動作、製造コスト削減のための軽量化が時として求められる。しかし、このような要求を満たそうとすると、ロボットアームは柔軟化してしまい、動作時に容易に振動が励起されてしまう。振動が励起されてしまうと、ロボットアームの位置決め精度が低下してしまう他に、作業効率、作業時の安全性も低下してしまうことが考えられる。したがって、このような柔軟なロボットアームを用いる際は、振動制御が必要となってくる。柔軟なロボットアームの振動制御に関する研究は数多く行われてきている<sup>1)2)</sup>。

これに対し、人が入力デバイスを用いてロボットアームを操作する用途が増えてきている。このような操作型のロボットアームの例として、国際宇宙ステーションのロボットアームが挙げられる。このロボットアームは全長 10[m] と非常に長腕であり、柔軟性を有してい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。柔軟なロボットアームを人が直接操作する場合は、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。よって、このような不規則な入力に対しても振動を抑制できる制御系を構成する必要がある。また、ロボットアームがどのような重さの物体をつかんでも振動を抑制する必要もある。

そこで、著者らはこれまでに操作型のロボットアームの振動問題を検証するためにジョイスティックで操作可能な 1 リンク回転型のフレキシブルロボットアームを制作した。ジョイスティックを用いて手動操作した場合でも振動を抑える制御系を設計し制御実験でその有効性を確認した<sup>3)4)</sup>。

しかしこれまでの研究では、ロボットアームにより物体を搬送するような状況は想定していなかった。ロボットアームにより物体の搬送を行うと、物体の有無によりモデルのパラメータが変化してしまい、十分な

制御性能が保てなくなる。

そこで、本研究では、ロボットアームで物体を搬送することを想定して、アーム先端の質量が変化した場合においても制振性能を損なわず、ジョイスティックによる操作を行ってもアームの振動を抑える制御系を構成する。モデル変動を考慮しないコントローラと設計したコントローラによる手動操作実験により設計した制御系の有効性を示す。

### 2 制御対象の構成とモデリング

#### 2.1 制御対象の構成

本研究で使用する 1 リンク回転型フレキシブルロボットアームの外観を Fig. 1 に示す。

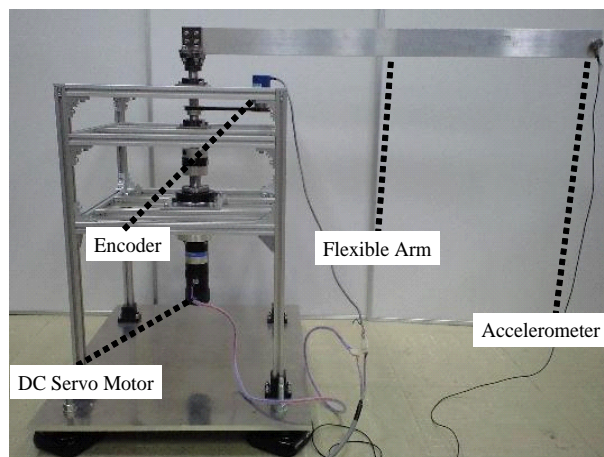


Fig. 1: Overview of experimental system

制御対象となるアーム部分はアルミ製で、長さ 750[mm]、幅 50[mm]、厚さ 3[mm] である。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う。また、DC サーボモータは内部に速度制御系が構成されたサーボアンプによって駆動する。アーム先端の加速度は加速度ピックアップ (RION PV-85) により測定し、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) によって測定する。また、アームはジョイスティック (栄通信工業 90JAM-YO-20R2G) による駆動が可能である。また、本研究では 物体の搬送を想定してアーム先端にペイロードを取り付けられるようにしてある。

コントローラの実装には dSPACE 社の DS1104 を用いる。エンコーダからの出力は DS1104 のカウンタポートに、加速度ピックアップからの出力は汎用振動計 (RION VM-83) を介して A/D ポートに接続されている。コントローラは、A/D ポート、カウンタポートに入力された情報を基に制御量を算出し、D/A ポートを介して、サーボアンプに入力される。また、コントローラ的设计には MATLAB, Simulink を用いる。

## 2.2 準備

Fig. 1 で示した制御対象は、モータ系、フレキシブルアームから構成されており、アーム先端の加速度は汎用振動計を介して出力され、アームの回転角度はエンコーダにより出力される。よって、制御対象は Fig. 2 に示す構成として考えることができる。

制御対象の数式モデルは、モータ系、フレキシブルアーム、汎用振動計のモデリングを行いそれらをまとめることで求める。制御対象の構成を個々にモデリングすることによって、後述するパラメータ同定を行いやすくする。

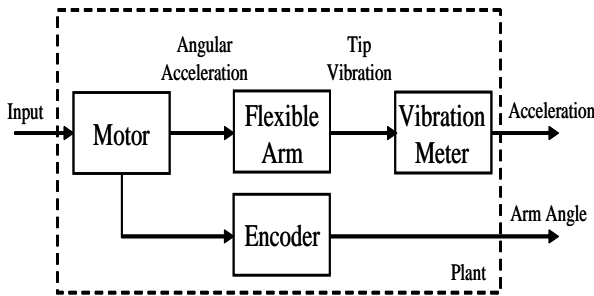


Fig. 2: Composition of plant

## 2.3 モータ系のモデリングとパラメータ同定

制御対象である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は回転角  $\theta$  に対して、次式で表わされる。

$$\ddot{\theta} + \alpha_1 \dot{\theta} + \alpha_2 \theta = \beta u \quad (1)$$

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。

内部パラメータは周波数応答法<sup>6)</sup>を用いて同定した。同定を行った結果、それぞれの内部パラメータは以下のように求まった。

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0.0631 \times 10^4 \\ \alpha_2 = 8.6002 \times 10^4 \\ \beta = 5.1905 \times 10^4 \end{cases} \quad (2)$$

## 2.4 アーム部のモデリングとパラメータ同定

フレキシブルアームは連続体であり、無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ため、有限次元のシステムとして考える必要がある。

これまでの研究<sup>3)4)</sup>で、3次振動モードまでを扱うことで十分な制振性能が得られることが分かっている。本研究では3次振動モードまでを考慮してモデリングを行う。ここでは、Fig. 3 に示す3質点集中定数系モデルとしてモデリングを行う<sup>5)</sup>。

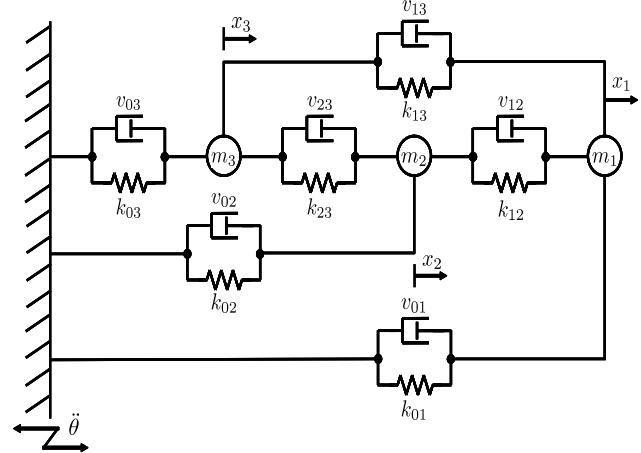


Fig. 3: Flexible arm model

各質点の変動量を  $x_j$  とし、 $m_j$  は各質点の質量、 $k_{ij}$  は質点間のばね定数、 $v_{ij}$  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  $\ddot{\theta}$  の制御入力がかかるとすると、Fig. 3 の運動方程式は以下のように表される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [V]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[F]\ddot{\theta} \quad (3)$$

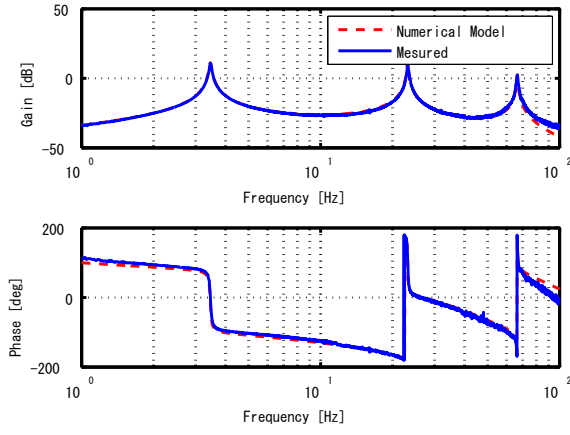
ここで、 $[M]$ 、 $[V]$ 、 $[K]$  はそれぞれ質量行列、減衰行列、剛性行列であり、 $[F]$  は制御力が働く場所を示す行列である。 $\{x\}$  はそれぞれの質点の位置を示す列ベクトルである。

Fig. 4 に、アーム先端のペイロードの有無による3次振動モードまでのFFT解析結果を示す。Fig. 4(a) がペイロード無しの場合、Fig. 4(b) がペイロード (100[g]) を付加した場合の測定結果とパラメータ同定を行った結果である。それぞれ実線が測定結果、破線が同定結果である。両者とも3次振動モードまでよく一致していることがわかる。また、各振動モードの周波数を Table 1 に示す。アーム先端にペイロードを付加すると、1, 2次振動モードは低周波側に変動するが、3次振動モードの周波数はほとんど変動していないことが確認できる。

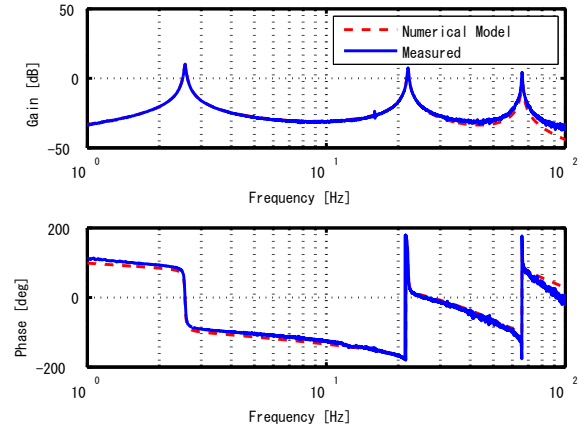
同定によって得られた物理パラメータを Table 2, 3 に示す。Table 2 はペイロード無し、Table 3 はペイロードありの場合である。このパラメータは後述するコントローラ設計で使用される。

Table 1: Frequencies of vibration modes

	Without payload	With payload
1st mode	3.47[Hz]	2.57[Hz]
2nd mode	22.91[Hz]	21.88[Hz]
3rd mode	66.07[Hz]	66.07[Hz]



(a) With out payload



(b) With payload

Fig. 4: Identification results of flexible arm

Table 2: Physical parameters of flexible arm without payload

Mass [kg]	Influence coefficient
$m_1 = 0.1195$	$\eta_1 = 0.00480$
$m_2 = 0.1000$	$\eta_2 = 0.00008$
$m_3 = 0.0990$	$\eta_3 = 0.02100$
Stiffness [N/m]	Damping [N·s/m]
$k_{01} = -302$	$v_{01} = 0.0223$
$k_{02} = -940$	$v_{02} = 0.0950$
$k_{03} = 13800$	$v_{03} = 0.3018$
$k_{12} = 575$	$v_{12} = 0.0321$
$k_{13} = -57$	$v_{13} = 0.0010$
$k_{23} = 2930$	$v_{23} = 0.0615$

Table 3: Physical parameters of flexible arm with payload

Mass [kg]	Influence coefficient
$m_1 = 0.2100$	$\eta_1 = 0.00480$
$m_2 = 0.1170$	$\eta_2 = 0.00008$
$m_3 = 0.0940$	$\eta_3 = 0.02400$
Stiffness [N/m]	Damping [N·s/m]
$k_{01} = -302$	$v_{01} = 0.0220$
$k_{02} = -740$	$v_{02} = 0.0868$
$k_{03} = 12800$	$v_{03} = 0.1728$
$k_{12} = 575$	$v_{12} = 0.0395$
$k_{13} = -74$	$v_{13} = 0.0010$
$k_{23} = 2930$	$v_{23} = 0.0615$

## 2.5 汎用振動計のモデリング

今回アーム先端の加速度の測定に用いる汎用振動計には3次のバターワースローパス特性が組み込まれている．このローパスフィルタの特性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．

$$H(s) = \frac{\omega_c^3}{s^3 + 2\omega_c s + 2\omega_c^2 s + \omega_c^3} \quad (4)$$

ここで $\omega_c$ はカットオフ周波数であり、本研究で使用する汎用振動計では $\omega_c = 2\pi \times 100$ [rad/sec]である．

## 2.6 制御対象の状態方程式

制御対象は、Fig. 2 に示すように、モータ系、フレキシブルアーム、汎用振動計の直列接続となっている．式(1),(3),(4)を用いて状態方程式を導出すると、以下ようになる．

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．

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (5)$$

ここで、各変数の詳細は以下ようになる．

$$\begin{aligned} x &= [x_l \quad x_a \quad x_m]^T, \\ A &= \begin{bmatrix} A_l & B_l C_a & B_l C_{m1} D_a \\ O_{3 \times 3} & A_a & B_a C_{m1} \\ O_{3 \times 3} & O_{3 \times 6} & A_m \end{bmatrix}, \\ B &= [O_{3 \times 1}^T \quad O_{6 \times 1}^T \quad B_m^T]^T, \\ C &= \begin{bmatrix} C_l & O_{1 \times 6} & O_{1 \times 3} \\ O_{1 \times 3} & O_{1 \times 6} & C_{m2} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

## 3 コントローラ設計

### 3.1 設計仕様

最終的な評価実験を行うことを想定し、ここでは目標値 $0.3$ [rad]を $1$ [sec]で入力するランプ入力に対して以下の仕様を満たすコントローラを設計することにする．

1. アームの回転角度は駆動開始から $2$ [sec]で目標値に整定させる
2. アームを直感的に操作するために、入力値に対する遅れを $0.1$ [sec]以内にする

### 3.2 LQ法によるコントローラ設計

ペイロードの有無によって制御性能に差が生じることを確認するために、LQ法によるコントローラ設計を行う．

LQ法は状態フィードバック制御の一つであり、すべての状態量を必要とする．しかし、本制御対象ではフ

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して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、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。

ここでは、ペイロード無しモデルに対して設計したコントローラをコントローラ1、ペイロードありの場合に対して設計したコントローラをコントローラ2とする。それぞれのコントローラを設計した際の設計パラメータを以下に示す。

#### コントローラ1

$$Q = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0, 1000000, 200000, 0, 90000, 0, 80)$$

$$R = 1$$

#### コントローラ2

$$Q = \text{diag}(0, 0, 0, 0, 0, 0, 320000, 100000, 40000, 90000, 0, 55)$$

$$R = 1$$

ここで設計したコントローラは、それぞれの条件の際に設計仕様を満たすように設計した。

### 3.3 $H_\infty$ 混合感度問題による設計

#### 3.3.1 ノミナルモデルの設定と一般化プラントの構成

Table 1 に示したようにペイロードの有無によってロボットアームの各振動モードの周波数が変化する。ペイロードの有無に関係なく制御性能を保証するためには、この周波数の変動とモデリングで無視した4次振動モード以降の影響を抑える制御系を構成する必要がある。そこで、本研究では、ノミナルモデルをペイロードの有無の中間の特性となるように設定してコントローラの設計を行う。ノミナルモデルはペイロードの有無の中間の特性となるように Table 4 に示すパラメータに設定した。

Table 4: Physical parameters of nominal model

Mass [kg]	Influence coefficient
$m_1 = 0.1735$	$\eta_1 = 0.00480$
$m_2 = 0.1145$	$\eta_2 = 0.00008$
$m_3 = 0.0940$	$\eta_3 = 0.02500$
Stiffness [N/m]	Damping [N·s/m]
$k_{01} = -302$	$v_{01} = 0.0205$
$k_{02} = -740$	$v_{02} = 0.0868$
$k_{03} = 12800$	$v_{03} = 0.1728$
$k_{12} = 575$	$v_{12} = 0.0395$
$k_{13} = -74$	$v_{13} = 0.0010$
$k_{23} = 2930$	$v_{23} = 0.0615$

まず、一般化プラントの構成について考える。ロボットアームに加わる外部からの外乱を  $\omega_1$  と定義する。また、モデル化の際に無視した高次振動モードと、ペイロードの有無によるモデルの変動分を不確かさとして捉え、外乱  $\omega_2$  と定義する。次に被制御量を設定する。制御の目的がアーム先端の振動を抑え、速く応答させることにあるので、観測量に重み付けした制御量  $z_1$  を定義する。同様に、過度の制御入力を抑えるために制御入力に重み付けした被制御量  $z_2$  を定義する。

制御対象と重み行列をまとめて一般化プラントを Fig. 5 のように構成した。このように一般化プラントを構

成すると  $W_S$  は感度関数に関する重み、 $W_T$  は相補感度関数に関する重みとなる。ここで、 $A, B, C, D$  は制御対象の係数行列であり、 $K$  は  $H_\infty$  コントローラである。

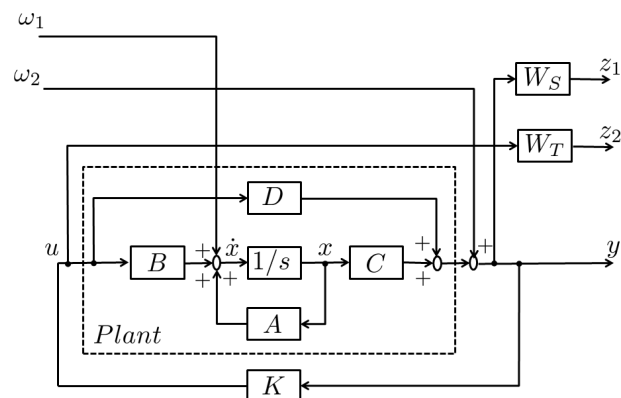


Fig. 5: Generalized plant

本制御系設計での制御問題は、系を内部安定にし、かつ条件

$$\|T_{zw}\|_\infty < \gamma \quad (6)$$

を満たすコントローラ  $K$  を構成する問題である。ここで  $T_{zw}$  は外乱  $\omega$  から被制御量  $z$  までの伝達関数行列を表す。

#### 3.3.2 重み関数の設定

ペイロードの有無によるモデルパラメータの変動と無視した4次振動モード以降を加法的な不確かさとして扱い、この不確かさを包含するように重み関数  $W_T(s)$  を設定する。Fig. 6 にペイロードの有無による周波数応答結果とノミナルモデルとの加法的な不確かさを示す。Reduction error1 がペイロード無し、Reduction error2 がペイロードありの不確かさである。これらの不確かさを包含するように重み関数  $W_T(s)$  を次式のように設定した。

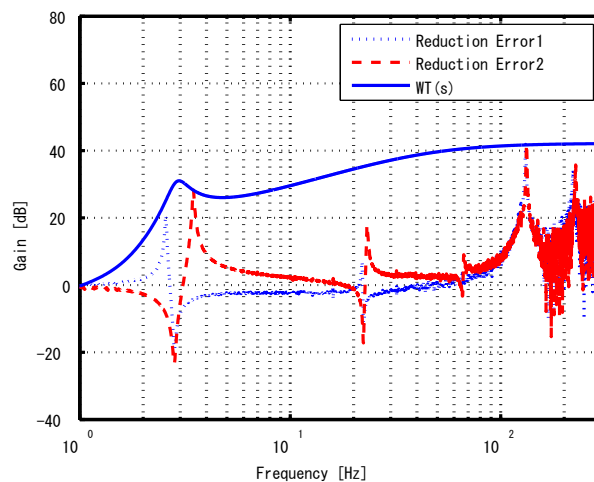


Fig. 6: Additive uncertainties

$$W_T(s) = \frac{s^3 + 12s^2 + 120s + 120}{0.07s^3 + 20s^2 + 100s + 6500} \times 9 \quad (7)$$

次に、感度関数に関する重み  $W_S(s)$  を 3.1 節で設定した仕様を満たすように、制御対象にランプ入力を与



えた際のシミュレーション結果を見ながら以下のように設定した。

$$W_s(s) = \text{diag}(W_{s1}, W_{s2})$$

$$W_{s1} = \frac{s^3 + 20s^2 + 120s + 1}{0.4s^3 + 50s^2 + 140s + 4000} \quad (8)$$

$$W_{s2} = \frac{0.628}{s + 0.628} \times 10900 \quad (9)$$

$\mathcal{H}_\infty$  コントローラの設計には、MATLAB の `hinflmi` コマンドを使用した。設計した  $\mathcal{H}_\infty$  コントローラをコントローラ 3 とする。

#### 3.4 ランプ入力に対する制御実験結果

設計したコントローラの制御性能を確認するためにアームの目標値に  $0.3[\text{rad}]$  を  $1[\text{sec}]$  で与えるランプ入力を与えた際の応答結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) がコントローラ 1 によるペイロード無しの応答結果、Fig. 7(b) がコントローラ 2 によるペイロードありの応答結果、Fig. 7(c) がコントローラ 3 によるペイロード無しの応答結果、Fig. 7(d) がコントローラ 3 によるペイロードありの応答結果である。また、グラフはそれぞれ上側がモータ出力軸の回転角度、下側がアーム先端の振れである。

各コントローラとも、アームの回転角度が駆動開始から  $2[\text{sec}]$  以内に目標値に整定しており、設計仕様 1 を満たしている。また、入力に対する出力の遅れも  $1[\text{sec}]$  以内に収まっており、設計仕様 2 を満たしている。設計通りのモデルに対しては十分な制御性能が得られることが確認できた。

## 4 評価実験

### 4.1 制御系の構成

3 章で設計したコントローラは設定通りのモデルに対しては十分な制御性能があることが確認できたが、人の操作によって物体を搬送することを想定した実験を行い設計したコントローラの評価を行う。

アームの操作はジョイスティックにより行うように構成し、Fig.8 の制御系として評価実験を行う。Fig.8 において構成してあるオブザーバは、アーム先端の振れを推定するために構成したものである。

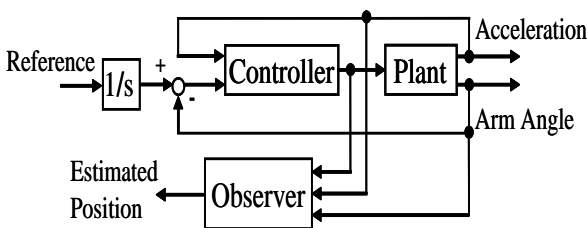


Fig. 8: Composition of control system for evaluation experiment

### 4.2 タスクの設定

評価実験を行う際に、タスクの設定を行う。ここでは、以下の一連の動作を行うことでタスク達成とする。

1. アーム根元の角度を  $0 \rightarrow 30[\text{deg}]$  へ
2. アーム根元の角度が  $\pm 1[\text{deg}]$  以内を満たす

3. アーム先端の振れが  $\pm 0.5[\text{mm}]$  以内を満たす
4. 角度と振れの条件を満たしたらアーム根元の角度を  $30 \rightarrow 0[\text{deg}]$  へ
5. 再度角度と振れの条件を満たす

上述の一連の動作が完了したらタスク達成とする。試行は 3 回行い、タスク達成までの時間を測り、その平均時間を実験結果とする。できるだけ振動を発生させずに素早くタスクを終えることを意識して行う。

### 4.3 評価実験結果

3 章で設計した 3 つのコントローラに対して、ペイロードの有無による評価実験を行った。そのタスク達成までの平均時間を Fig. 9 に示す。

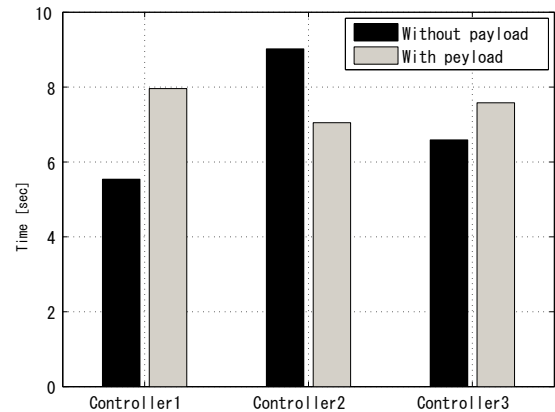


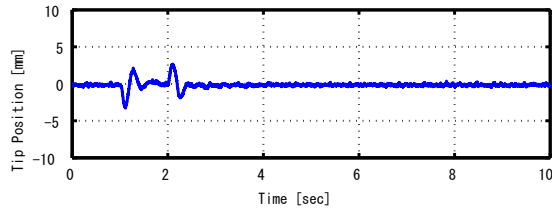
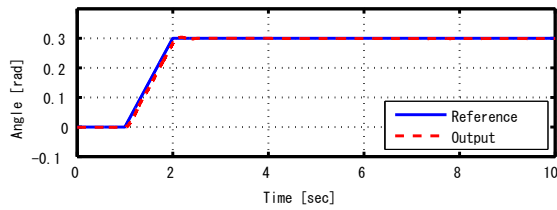
Fig. 9: Results for evaluation experiment

コントローラ 1 はペイロード無しのモデルに対して設計したコントローラであるのでペイロード無しではおよそ  $5.5[\text{sec}]$  でタスク達成が実現できている。しかし、物体の搬送を想定したペイロードありでは、タスク達成までにおよそ  $8.0[\text{sec}]$  がかかっており、制御性能の劣化が確認できる。

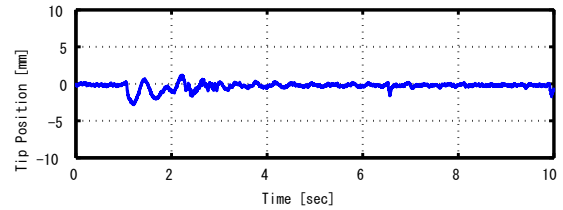
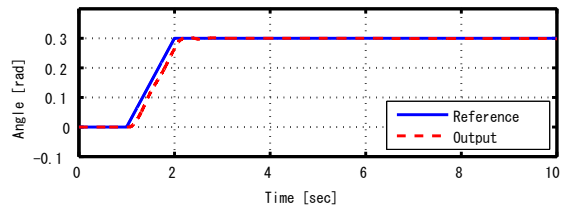
一方、コントローラ 2 は、ペイロードありのモデルに対して設計したコントローラであるので、ペイロードありでおおよそ  $7.1[\text{sec}]$  でタスク達成している。コントローラ 1 でのペイロード無しよりもタスク達成に時間がかかっているが、それは操作者がペイロードありでの動作に慣れていなかったことが影響していると思われる。コントローラ 2 において、ペイロード無しの場合には、タスク達成までにおよそ  $9.0[\text{sec}]$  まで制御性能の劣化が確認できる。LQ 法によるコントローラでは、コントローラ設計に用いたモデルに対しては十分な性能を有しているが、パラメータ変動には弱いという結果になる。

コントローラ 3 では、ペイロード無しでは、タスク達成までにおよそ  $6.6[\text{sec}]$ 、ペイロードありではおおよそ  $7.6[\text{sec}]$  であり、ペイロードの有無によるタスク達成に要する平均時間差は  $1[\text{sec}]$  程とコントローラ 1, 2 よりも良好な結果が得られた。ただし、Fig. 7 の結果でも分かるようにモータの角度応答でオーバーシュートが生じているため、タスク達成まで時間を要していると思われる、更に向上できることが期待できる。

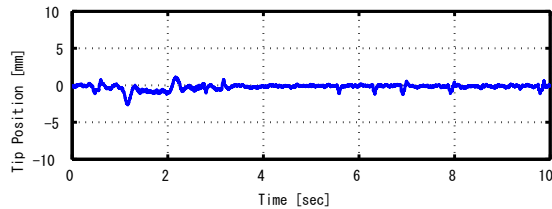
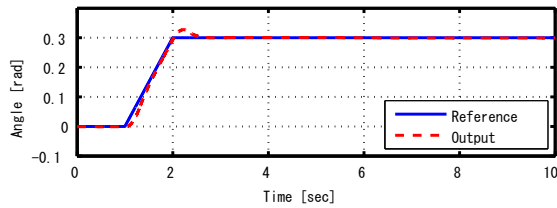
評価実験結果より、パラメータ変動を考慮したロバスト制御系設計法を用いることにより、物体の搬送の



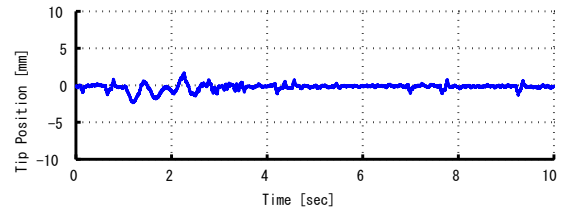
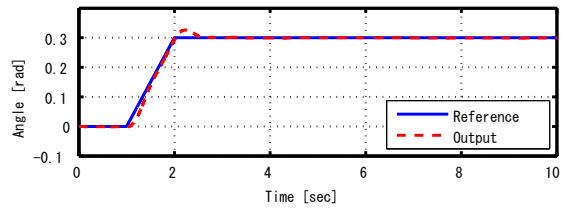
(a) Without payload using controller1



(b) With payload using controller2



(c) Without payload using controller3



(d) With payload using controller3

Fig. 7: Results of ramp response

ような動作をさせる場合でも、振動を抑えた制御系が構成できることが示せた。

## 5 結言

先端質量の変動に対するフレキシブルロボットアームの振動を抑える制御系を構成するために、1リンク回転型のフレキシブルロボットアームを構成した.LQ法を用いてコントローラを設計した場合、アーム先端の質量変動によってコントローラの性能が著しく悪化することを確認した。これに対して、 $H_\infty$  ロバスト制御系設計方法を用いてコントローラを設計した場合、ペイロードの有無によるパラメータ変動に対してもそれほど性能は劣化せず、安定した性能が得られたことを確認した。

## 謝辞

本研究費の一部は、平成 24 年度公益財団法人内田エネルギー科学振興財団試験研究費助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 山本真剣, 土館浩平, 渡辺亨, 背戸一登, 田島洋, "フレキシブルロボットアームのモデリングと制御", Dynamics and Design Conference 2002 CD-ROM 論文集, 116 (2002)
- 2) 山本幸典, 高村耕平, 渡辺亨, 背戸一登, "曲げねじれ連成における不確かさを考慮したフレキシブルアームのロ

バスト制御", Dynamics and Design Conference 2003 CD-ROM 論文集, 132 (2003)

- 3) 増井詠一郎, 佐藤拓史, "ジョイスティック操作に対するフレキシブルロボットアームの振動制御", 第 54 回自動制御連合講演会予稿集, 152/157 (2011)
- 4) 増井詠一郎, 佐藤拓史, "操作型フレキシブルアームの手先振動制御", 第 12 回計測制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, 152/157 (2011)
- 5) 背戸一登, "構造物の振動制御", 75/77, コロナ社 (2006)
- 6) 足立修一, "MATLAB による制御のためのシステム同定", 127/154, 東京電機大学出版局 (1996)