

# TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

on-off弁駆動型空圧式除振台の定位性能向上へのアプローチ

|       |  |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2020-06-12<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 中田, 拓海<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1934">https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1934</a>  |

修士学位論文

on-off 弁駆動型空圧式除振台の定位性能向上へのアプローチ

2019 年度

(2020 年 3 月)

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

海洋システム工学専攻

中田 拓海

## 目次

はじめに

|     |                     |        |
|-----|---------------------|--------|
| 第1章 | システムの構成             |        |
|     | 1.1 装置構成            | 4 p ~  |
|     | 1.2 制御モデル           | 5 p ~  |
| 第2章 | 制御設計                |        |
|     | 2.1 サーボ系を用いた制御設計    | 8 p ~  |
|     | 2.2 フィードフォワードを用いた制御 | 9 p ~  |
|     | 2.3 入力列の作成          | 9 p ~  |
| 第3章 | 実験                  |        |
|     | 3.1 実験方法            |        |
|     | 3.1.1 フィードバック制御     | 10 p ~ |
|     | 3.1.2 追加入力列の作成      | 11 p ~ |
|     | 3.2 数値シミュレーション結果    | 12 p ~ |
|     | 3.3 考察              | 16 p ~ |
|     | 3.4 追加シミュレーション      | 17 p ~ |
|     | 3.5 追加シミュレーションの考察   | 19 p ~ |
|     | まとめ                 | 20 p ~ |
|     | 参考文献                |        |
|     | 謝辞                  |        |
|     | 付録                  |        |

はじめに

精密部品の測定では床からの振動が測定結果に多大な影響を及ぼすため、床振動を絶縁するという目的で空圧式除振台が用いられている。この装置の構成は、風船状の空気ばねと呼ばれる部品の上にテーブルを置いた単純な構造であり、テーブルの上に測定器を載せて使用する。空圧式除振台は、空気ばねによって床からの振動エネルギーがテーブル上に伝わらないというメリットをもつ反面、テーブル上の振動エネルギーも床に逃すことができないというデメリットをもつ。そのため、測定器にはワークの位置決め機構など、少なからず稼動部が内在しており、稼動部が動くことによりその反力を受けてしまうと、テーブルが振動し続けてしまうといった問題もある。

そこで、空気ばね内にアクティブに空気を流入出させることで、テーブル上で印加された外乱に対する振動抑制性能を高める研究がなされている。[1][2][3]。これらの研究では精密に流量を調整できるサーボ弁を用いている。しかし、サーボ弁は比較的高価であり装置導入の障害となり得る。これに対して、非常に安価な on-off 弁を用いた装置構成を前提とした研究もなされている。しかし、on-off 弁を用いた場合では、振動抑制性能は高いのだが、定常偏差が残ってしまうという問題点がある。

そこで、本稿では on-off 弁だけを用いてステップ外乱に対し高い制振性能を維持しつつ、定常性能を向上させるような方法を提案する。

## 第1章 システムの構成

### 1.1 装置構成

本稿で扱う空圧式除振台 (Herz 社製 DT-4048M) とその周辺機器は Fig.1 に示す。台は四つの空気ばねにより支持されており, 四つの空気ばねを同時に駆動することで鉛直並進方向  $z$  の運動を制御することができる。これらの空気ばねは配管により同一空間となっており, 吸気用 on-off 弁および排気用 on-off 弁(クロダニューマティクス株式会社製 VA01HPSC24-1P)によって流量を調整している。また, 振動絶縁性能を向上させるため, 各空気ばねにバッファタンクを接続している。

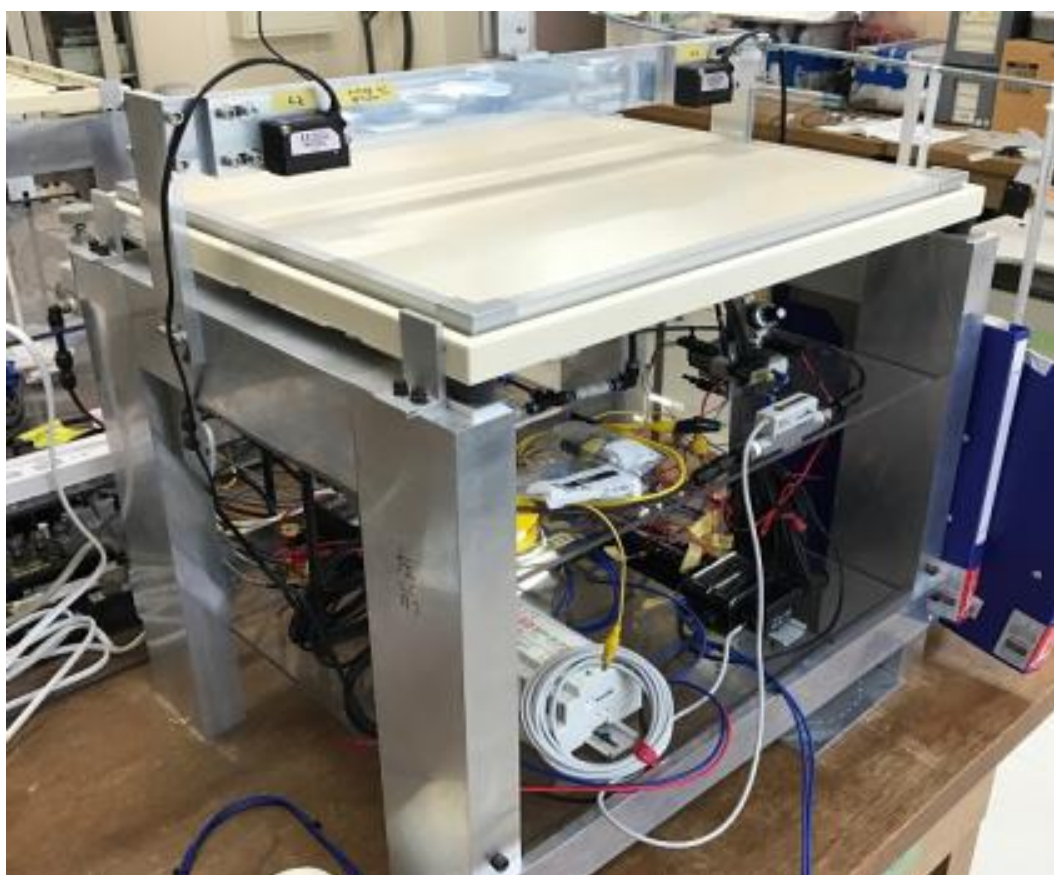


Fig.1 空圧式除振台

吸気時には, エアーコンプレッサーにてあらかじめ貯蔵しておいた  $0.5[\text{MPa}]$  の圧縮空気を放出した後, 空圧レギュレータを用いることで  $0.2[\text{MPa}]$  に減圧を行い, 一定の圧力となった圧縮空気をを用いて吸気を行う。排気時には空気ばね内の空気を大気

へ放出することで排気を行う。また、吸排気時の on-off 弁の駆動タイミングの組み合わせを Table1 に示す。この組み合わせにより、空気ばねへ流入出する空気量は量子化された値となる。

Table1 on-off 弁の組み合わせとその流量

|    | Val.#1 | Val.#2 | Control input $u$ |
|----|--------|--------|-------------------|
| 吸気 | On     | -      | $H_+$             |
| 排気 | -      | On     | $H_-$             |
|    | -      | -      | 0                 |

また、今回行う実験には、台の鉛直方向変位、空気ばね内圧、バッファタンク内圧の測定が必要となる。

台の鉛直方向変位は KEYENCE 社製の IA-030 という変位センサーを用いている。測定距離は 20~45mm、繰り返し制度が 2 $\mu$ m、サンプリング周期が 0.33/1/2/5ms の 4 段階となっている。

空気ばね内圧、バッファタンク内圧はコガネイ社製の GS610A を用いる。測定圧力は -100~+100kPa、レスポンス時間は 2.5ms となっている。

## 1.2 制御モデル

鉛直並進方向のみの運動に限定して考えることで、四つの空気ばねを一つの空気ばねに見立てたモデルを導出する。運動方程式は文献[4]を参考にして

$$M\ddot{z} + c_p\dot{z} + k_pz = Sp_a - d \quad (1)$$

$$\dot{p}_a = \frac{\kappa R_s T_s}{(z_a + h_p z) S} (u(t - L) - \mu(p_a - p_b)) - \frac{\kappa(p_0 + p_a)}{z_a + h_p z} h_p \dot{z} \quad (2)$$

$$\dot{p}_b = \frac{\kappa R_s T_s}{z_b S} \mu(p_a - p_b) \quad (3)$$

となる。文字の定義と値は Table2 に示す。

Table2 モデルのパラメータ

|             |          |   |
|-------------|----------|---|
| 台の鉛直方向の変位   | $z$      | [m]                                     |
| 空気ばねの圧力     | $p_a$    | [Pa]                                    |
| バッファタンクの圧力  | $p_b$    | [Pa]                                    |
| 目標値との偏差     | $e$      | [m]                                     |
| 制御入力 (質量流量) | $u$      | [kg/s]                                  |
| 初期圧力        | $p_0$    | 0.035[MPa]                              |
| 台の質量        | $M$      | 13.6[kg]                                |
| 空気ばねのばね定数   | $k_p$    | $9.34 \times 10^3$ [N/m]                |
| 空気ばねの粘性定数   | $c_p$    | 25.6[Ns/m]                              |
| 台と空気ばねの接触面積 | $S$      | $2.83 \times 10^{-3}$ [m <sup>2</sup> ] |
| 気体定数        | $R_s$    | 287[J/(kg·K)]                           |
| 比熱比         | $\kappa$ | 1.4[-]                                  |
| 機体温度        | $T_s$    | 293[K]                                  |
| バルブ係数       | $\mu$    | $2.34 \times 10^{-7}$ [kg/(s·Pa)]       |
| 質量流量のむだ時間   | $L$      | 10[ms]                                  |
| 等価空気ばね高さ    | $z_a$    | 0.050[m]                                |
| 等価バッファタンク高さ | $z_b$    | 0.365[m]                                |
| 体積変換係数      | $h_p$    | 2[-]                                    |
| 外乱          | $d$      | [N]                                     |

そして、状態変数を  $x = [z, \dot{z}, p_a, p_b]^T$  とし、制御入力を  $u$  として線形近したシステムは

$$\Sigma_c : \dot{x}(t) = A_c x(t) + b_c u(t - L) + \hat{b}_c \quad (4)$$

と表される。ただし、 $K_{gp} = \frac{\kappa R_s T_s}{z_a S}$ ,  $K_{zp} = \frac{\kappa p_0 h_p}{z_a}$ ,  $K_a = K_{gp} \mu$ ,  $K_b = \frac{\kappa R_s T_s}{z_b S} \mu$  であり

$A_c$ ,  $b_c$ ,  $\hat{b}_c$  は

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_p}{M} & -\frac{c_p}{M} & \frac{S}{M} & 0 \\ 0 & -K_{zp} & -K_a & K_a \\ 0 & 0 & K_b & -K_b \end{bmatrix}, \quad b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{gp} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{b}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

である。

本稿で扱う空圧式除振台の操作量は空気ばねへ流入出する流量となるが、Table1で示したように流量は近似的に離散値入力となる。ただし、 $H_+ = 5.14 \times 10^{-4} [\text{kg/s}]$ , (24[l/min]),  $H_- = -3.21 \times 10^{-4} [\text{kg/s}]$ , (15[l/min])は流量の値である。これにより、線形入力  $\sigma$  を離散値入力  $u$  に変換する量子化器  $\phi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  がシステムに内蔵されていると考えることができる。

$$u = \phi(\sigma) = \begin{cases} H_+, & \text{if } \frac{H_+}{2} \leq \sigma \\ H_-, & \text{if } \sigma \leq \frac{H_-}{2} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

この量子化器は3値の出力値( $H_+$ ,  $H_-$ , 0)をもつ非線形量子化器である。



## 第2章 制御設計

### 2.1 サーボ系設計

本稿ではステップ外乱に対して除振台の振動抑制制御を目指していく。ステップ外乱の場合、通常、制振後も偏差が残り続ける。そこで、目標値との偏差をなくすためサーボ系を用いて制御設計を行う。

目標値 $y_{ref}[m]$ として(4)式をサーボ系へ拡張すると、 $x = [z, \dot{z}, p_a, p_b, e]^T$ として

$$\dot{x}(t) = A_c \dot{x}(t) + b_c u(t - L) + \hat{b}_c + C_c y_{ref} \quad (7)$$

$A_c, b_c, \hat{b}_c, C_c$  は

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_p}{M} & -\frac{c_p}{M} & \frac{s}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{zp} & -K_a & K_a & 0 \\ 0 & 0 & K_b & -K_b & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{gp} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{b}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる。

以降では、簡単のため、入力むだ時間は無視し(7)式の係数行列 $A_c, b_c, \hat{b}_c$ をサンプリング時間 4ms で入力に 0 次ホールドを適用して離散化した

$$\Sigma : x[k + 1] = Ax[k] + bu[k] + \hat{b}d[k] + Cy_{ref} \quad (10)$$

を制御系設計用の制御対象として用いる。ただし、 $k \in \{0\} \cup \mathbb{Z}_+$ はステップ数とし、 $\mathbb{Z}_+$ は正の整数の集合とする。

離散値入力を用いたサーボ系では、小さな偏差に対しても時間が経つと偏差が積分されていき、入力が変わり偏差を取り除こうとする。しかし、離散値入力では 1 度に入る流量が決まっているため、誤差なく目標値に近づけることは難しい。また、時間が経ち制振されてから入力が入ることで、その入力が入った点で振動が起きてしまう。

そこで、そのデメリットを解消するために不感帯のような考え方を用いる。不感帯を用いると、設定したある範囲内に変位が収まるとそこで入力が 0 となり、時間が経ち入力が加わることで振動を繰り返すことがなくなる。しかし、不感帯内に変位が収まった時点で、それ以上偏差を小さくすることもできなくなる。不感帯をそのまま用いた場合、上で述べたようにある程度の偏差を許容したままというデメリットは残ってしまう。不感帯のように自分で設定したある範囲内に変位が収まった時、その点でフィードバック制御からフィードフォワード制御に切り替え、定常性能を向上させていく。

この目標値近傍でのフィードバックとフィードフォワードの切り替えの境界を  $\delta$  とする.

## 2.2 フィードフォワードを用いた制御

除振台の変位が境界  $\delta$  に入り, 目標値との偏差が  $\alpha$  である場合を考える.

本稿で用いる入力は離散値入力であり, その 1 ステップで空気ばねに流入する空気流量はほぼ定まっており, その際の除振台の移動量もそれにより定まっている. 今回用いる 3 値の入力のうち  $H_+$ ,  $H_-$  に対応する除振台の移動量を  $e_+$ ,  $e_-$  [m] とする. この  $e_+$ ,  $e_-$  が互いに素であるならば, 任意の  $\alpha$  に対して  $ie_+ + je_- = \alpha$  を満たすような整数  $i$ ,  $j$  が存在する. また  $e_+$ ,  $e_-$  の符号は逆となるため  $i$ ,  $j$  は自然数となる. つまり  $H_+$ ,  $H_-$  を印加する回数を  $i$ ,  $j$  としその組み合わせによって任意の移動量に調整することが出来る.

そこで, あらかじめ不感帯の大きさより小さくなるような除振台の移動量となるように入力  $H_+$ ,  $H_-$  の組み合わせを数パターン作っておき, それを除振台が不感帯に入った後に残った偏差の大きさに応じて印加することで, その偏差を取り除くことを目指す.

次の項では, どのように入力列を作っていくかを説明していく.

## 2.3 入力列の作成

まず, 各入力  $H_+$ ,  $H_-$  の 1 ステップ分に対する除振台の移動量  $e_+$ ,  $e_-$  を調べる. 得られた移動量  $e_+$ ,  $e_-$  を組み合わせて不感帯より小さな移動量となるように入力  $H_+$ ,  $H_-$  の回数を求める. こうして求めたそれぞれの入力の回数となるように入力列を作成していくが, その回数となっても, ただ無作為に並べて作った入力列では制振性能が悪くなってしまう可能性がある.

そこで, 目標値を  $\alpha$  とする新たな最適レギュレータ問題を考える. 新しく重み行列を設定し, これによって得られる最適レギュレータシステムをシミュレーションすることで制振性能の高い入力列を取得していく. 除振台の変位が設定したある範囲に入るまでのフィードバック制御でも最適レギュレータを用いたゲインを使うが, 同じ重みではそもそも入力が出ないような目標値に対して制御入力を得なくてはならないため, 違う重みを調整して作っていく.

入力の組み合わせを考える際, 入力  $H_+$ ,  $H_-$  が各 1~4 ステップとなるように作る. また, 不感帯に入らない入力列の組み合わせは除いておく.

入力の組み合わせとその入力による除振台の移動量は Table3 のようになった.

Table3 入力ステップ数とその入力による変位の移動量

| $H_- \backslash H_+$ | 1回      | 2回     | 3回     | 4回     |
|----------------------|---------|--------|--------|--------|
| 1回                   | -0.353  | 3.549  | 7.451  | 11.353 |
| 2回                   | -4.608  | -0.706 | 3.196  | 7.098  |
| 3回                   | -8.863  | -4.961 | -1.059 | 2.843  |
| 4回                   | -13.008 | -9.216 | -5.314 | -1.412 |

単位はそれぞれ $\times 10^{-5}$ [m]

### 第3章 実験

#### 3.1 実験方法

##### 3.1.1 フィードバック制御

(10)式のシステム  $x[k+1] = Ax[k] + bu[k] + \hat{b}d[k] + Cy_{\text{ref}}$  に対してフィードバック制御を行う。

まず、重み行列を  $Q = \text{diag}(1 \times 10^{13} \ 3 \times 10^9 \ 1 \times 10^0 \ 1 \times 10^{-4} \ 1 \times 10^{14})$ ,  $R = 1 \times 10^1$  として、最適レギュレータによりゲイン  $F$  を得る。

$$F = [-4.12 \times 10^{-2} \ 4.67 \times 10^{-2} \ 2.20 \times 10^{-7} \ 2.22 \times 10^{-7} \ -4.04 \times 10^0]$$

次に設計したゲイン  $F$  を用いてシステム(10)式に対してフィードバック制御を行っていく。0.1[kg]の重りを台にのせるようなステップ外乱を想定し、目標値  $y_{\text{ref}} = 0$  として除振台の時間応答をシミュレーションで計算する。

ここではまず、除振台の変位が  $-5.0 \times 10^{-5} \sim +5.0 \times 10^{-5}$  [m] に収まると入力が 0 となるような不感帯を用いてシミュレーションをしていく。ここでは、不感帯を用いたフィードバック制御のみを行っていくため、定常偏差が残る。

次にフィードフォワードで使うための入力列を取得する。

### 3.1.2 追加入力の作成

目標値  $y_{\text{ref}}$  を Table.3 に示した値に設定してシステム(10)式に対してフィードバック制御を行う。

こちらでも最適レギュレータを用いてゲイン  $F'$  を設計していくが、重み行列は  $y_{\text{ref}}$  の値によって調整していき、

$$Q_1' = \text{diag}(1 \times 10^{15} \ 1 \times 10^1 \ 1 \times 10^0 \ 1 \times 10^{-4} \ 1 \times 10^{15})$$

$$Q_2' = \text{diag}(1 \times 10^{16} \ 1 \times 10^1 \ 1 \times 10^0 \ 1 \times 10^{-4} \ 1 \times 10^{15})$$

$$Q_3' = \text{diag}(1 \times 10^{15} \ 1 \times 10^1 \ 1 \times 10^0 \ 1 \times 10^{-4} \ 3 \times 10^{15})$$

を用いてゲイン  $F'$  を得る。  $R'$  は全て同じく  $R' = 1 \times 10^1$  を用いる。

$$F_1' = [9.20 \times 10^0 \ 2.09 \times 10^{-1} \ 2.75 \times 10^{-7} \ 2.24 \times 10^{-7} \ -1.09 \times 10^1]$$

$$F_2' = [2.67 \times 10^1 \ 3.75 \times 10^{-1} \ 3.27 \times 10^{-7} \ 2.24 \times 10^{-7} \ -9.07 \times 10^0]$$

$$F_3' = [9.36 \times 10^0 \ 2.11 \times 10^{-1} \ 2.75 \times 10^{-7} \ 2.24 \times 10^{-7} \ -1.88 \times 10^1]$$

得られたゲインを用い、目標値  $y_{\text{ref}}$  に対してフィードバック制御を行っていくが、目標値に対して入力が大きいため、ゲインをかなり大きくしなければ入力が現れない。そこで、最初の入力 1 ステップ分は  $H_+$  か  $H_-$  を加え、その後からフィードバック制御を行っていく。

得られたゲインを用いてフィードバック制御をシステム(10)式に対して行っていくと、印加される入力は、設定した目標値に対応した入力  $H_+$ 、 $H_-$  の回数と違う場合がある。しかし、入力の回数は Table.3 と合わせる必要があるため、今回は所望の回数が入力が入った時点で入力が 0 となるように設定する。

こうして、フィードバック制御を行った時の入力を保存し、フィードフォワードで用いるための入力列とする。

保存した入力列をフィードフォワードで印加することで定常偏差を取り除いていくことを目指す。具体的には、まずステップ外乱に対してゲイン  $F$  を用いてフィードバック制御を行う。フィードバック制御を行っていき、除振台の変位が目標値近傍の  $\delta$  に入ってから保存した入力列の中から残るはずの定常偏差に応じて一つの入力列を選び出しフィードフォワードで印加する。

この時、定常偏差が取り除かれているか、また、制振性能がどう変わっているかを数値シミュレーションで確認する。

### 3.2 数値シミュレーション結果

(10)式のシステムに対してゲイン $F = [-4.12 \times 10^{-2} \ 4.67 \times 10^{-2} \ 2.20 \times 10^{-7} \ 2.22 \times 10^{-7} - 4.04 \times 10^0]$ を用いてフィードバック制御を行い, Fig.2 の応答を得た.

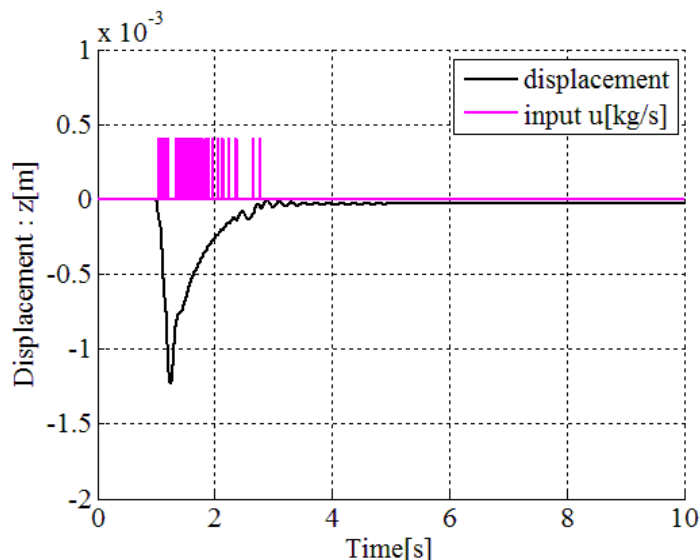


Fig.2 除振台の時間応答

Fig.2 では, 追加の入力を入れていないため, 除振台の変位が不感帯に入ってから変位が $-3.2 \times 10^{-5}$ [m]のままとなり, 定常偏差が残っている.

次に, 追加入力の作成を行う. 除振台の変位が $-5.0 \times 10^{-5} \sim +5.0 \times 10^{-5}$ [m]の範囲に収まり, 振動がほぼ収まった時点を境界  $\delta$  としてフィードバック制御とフィードフォワードを切り替える.

Table.3 の中から移動量が $-5.0 \times 10^{-5} \sim +5.0 \times 10^{-5}$ [m]に入っているものを選び 9 つの入力パターンを作成した.

まず, ゲイン $F_1' = [9.20 \times 10^0 \ 2.09 \times 10^{-1} \ 2.75 \times 10^{-7} \ 2.24 \times 10^{-7} - 1.09 \times 10^1]$ を用いて目標値  $y_{\text{ref}} = -0.353 \times 10^{-5}$ ,  $y_{\text{ref}} = 3.196 \times 10^{-5}$  に対してフィードバック制御を行っていき, 入力列を得る. Fig.3, Fig.4 はそれぞれ目標値に対して制御を行った際の入力と除振台の時間応答を示している.

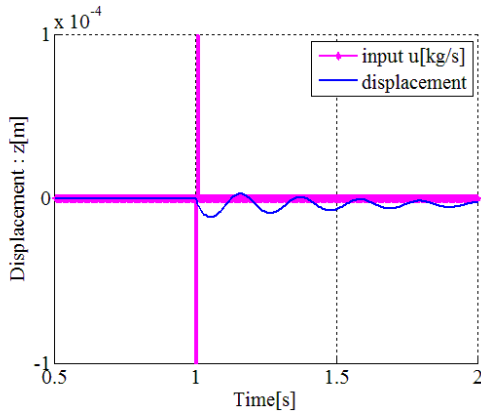


Fig.3  $y_{ref} = -0.353 \times 10^{-5}$ の時間応答

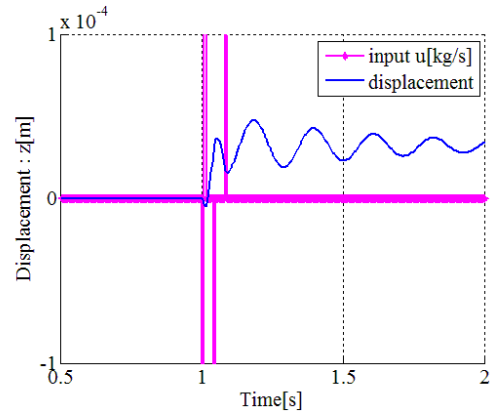


Fig.4  $y_{ref} = 3.196 \times 10^{-5}$ の時間応答

次にゲイン  $F_2' = [2.67 \times 10^1 \ 3.75 \times 10^{-1} \ 3.27 \times 10^{-7} \ 2.24 \times 10^{-7} \ -9.07 \times 10^0]$  を用いた場合も同様にし、目標値  $y_{ref} = 3.549 \times 10^{-5}$ ,  $y_{ref} = -0.706 \times 10^{-5}$ ,  $y_{ref} = -1.059 \times 10^{-5}$ ,  $y_{ref} = 2.843 \times 10^{-5}$ ,  $y_{ref} = -1.412 \times 10^{-5}$  に対してフィードバック制御を行い入力列を得る。

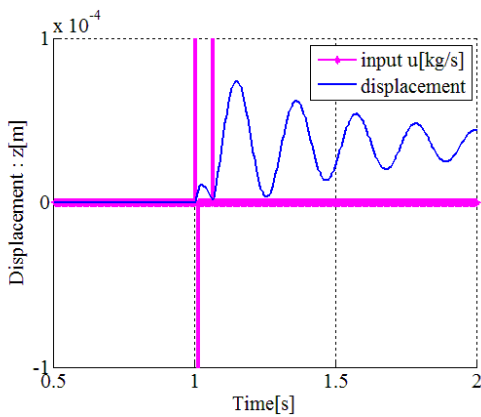


Fig.5  $y_{ref} = 3.549 \times 10^{-5}$ の時間応答

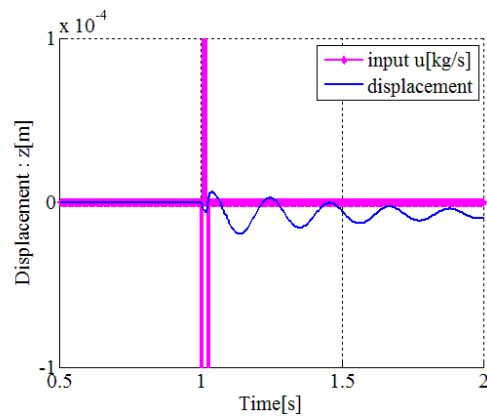


Fig.6  $y_{ref} = -0.706 \times 10^{-5}$ の時間応答

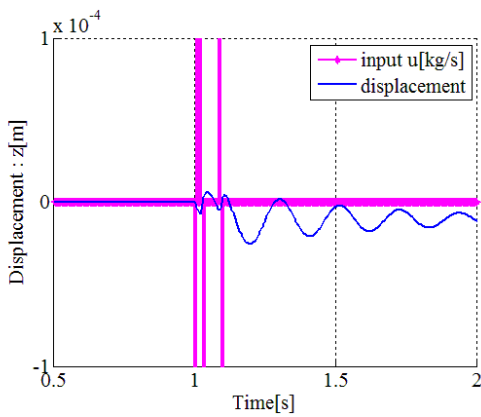


Fig.7  $y_{ref} = -1.059 \times 10^{-5}$ の時間応答

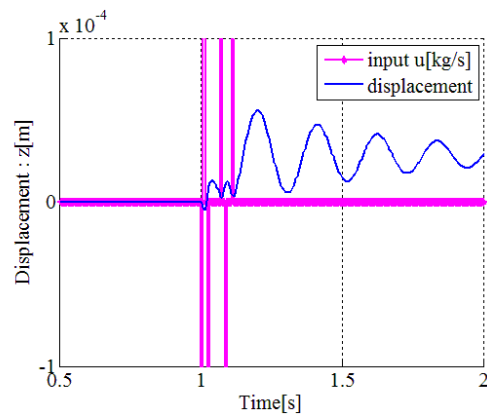


Fig.8  $y_{ref} = 2.843 \times 10^{-5}$ の時間応答

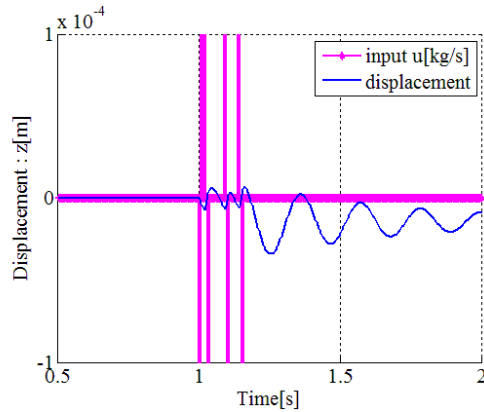


Fig.9  $y_{\text{ref}} = -1.412 \times 10^{-5}$ の時間応答

ゲイン  $F_3' = [9.36 \times 10^0 \ 2.11 \times 10^{-1} \ 2.75 \times 10^{-7} \ 2.24 \times 10^{-7} \ -1.88 \times 10^1]$  を用いた場合にも入力列を取得していく．目標値  $y_{\text{ref}} = -4.608 \times 10^{-5}$ ，  $y_{\text{ref}} = -4.961 \times 10^{-5}$  に対してフィードバック制御を行っていき，入力列を得る．

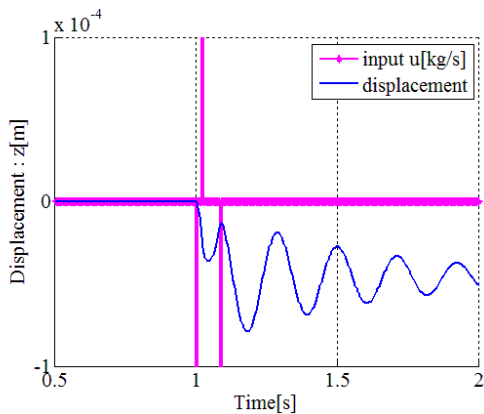


Fig.10  $y_{\text{ref}} = -4.608 \times 10^{-5}$ の時間応答

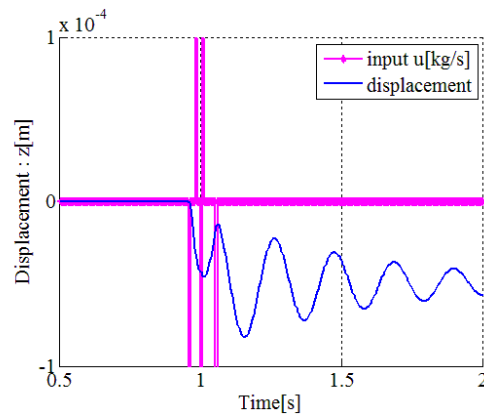


Fig.11  $y_{\text{ref}} = -4.961 \times 10^{-5}$ の時間応答

こうして得られた 9 パターンの入力列を境界  $\delta$  内に入ってからフィードフォワード制御に用いていく．具体的には，追加の入力を加えなかった場合に残るはずの偏差と移動量の差の絶対値をすべての入力列のパターンに対して計算し，その中で値が一番小さくなる入力パターンを選び印加していく．

Fig.12 は(10)システムに対しゲイン  $F$  を用いてフィードバック制御を行っていき，図の 2.8[s] の時点でフィードフォワード的に入力列を加えた場合の除振台の時間応答を示している．追加入力がなかった場合では定常偏差が  $-3.2 \times 10^{-5}$  [m] 残っていたため，移動量が  $3.196 \times 10^{-5}$  [m] の入力列が印加されている．

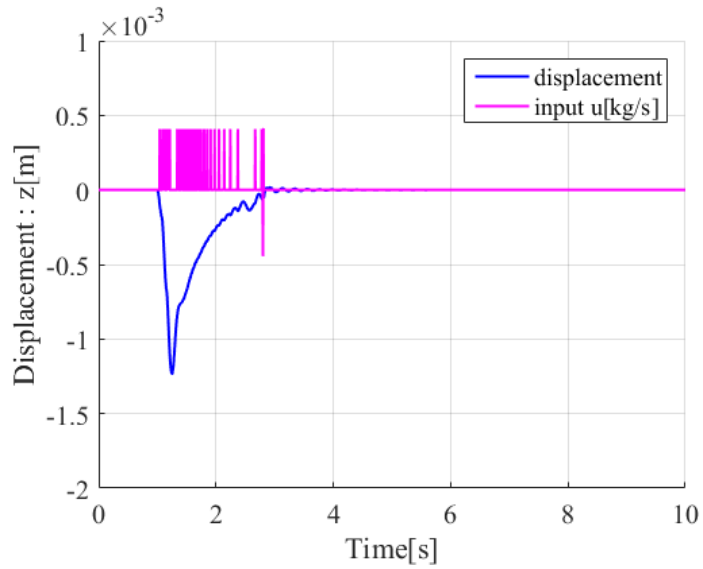


Fig.12 追加入力を加えた場合の除振台の時間応答

Fig.13, Fig.14 は不感帯を用いたフィードバック制御のみによる除振台の変位の時間応答(黒点線)とフィードバック制御とフィードフォワード制御を組み合わせたものによる除振台の変位の時間応答(青線)の比較となっている.

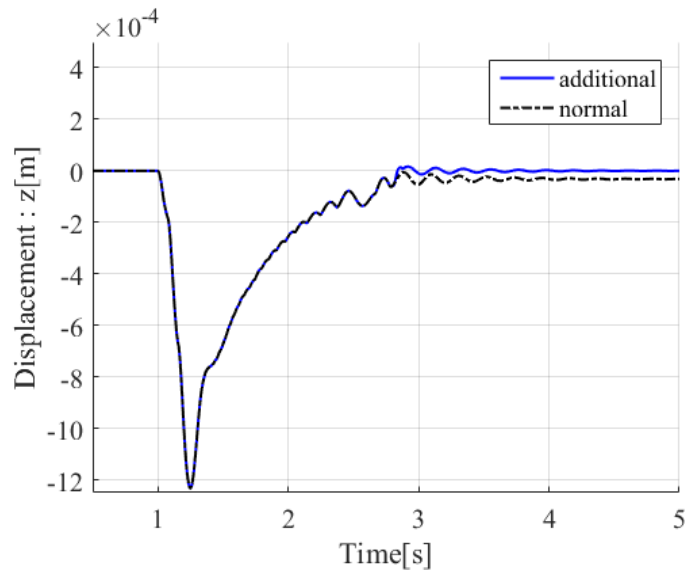


Fig.13 除振台の応答の比較



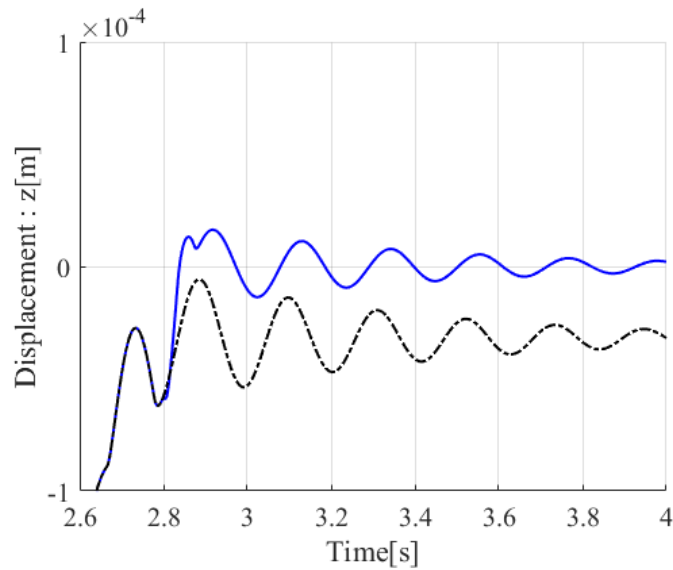


Fig.14 Fig.13 の拡大図

### 3.3 考察

入力列の作成では3種類の重み行列を用いてゲインを設計したが、重みを付ける際、ステップ外乱に対するフィードバック制御で使うゲイン $F$ の設計に用いた重み行列 $Q$ と比較し、変位と偏差の項の重みを大きくし速度に対する重みをかなり小さくしている。速度に対して重みを小さくしなければ初めの1ステップ目の入力を入れた場合にも、その後全く入力が現れなかった。また $Q_2'$ 、 $Q_3'$ では変位と偏差の重みが変わっているが、目標値が大きくなるほど、変位の重みを小さく、偏差の重みを大きくしていくと上手く入力列が取得できると考えられる。

Fig.12ではフィードフォワードで追加の入力を加えている。この時の定常偏差は $-6.35 \times 10^{-8}[\text{m}]$ となっており、定常偏差をかなり小さくすることが出来ている。

Fig.14より追加入力を加えた場合にも、制振性能は通常のフィードバック制御のものものと比べてもほとんど変わっておらず、目標としていた制振性能を劣化させず定常偏差を取り除くことが出来ていると考えられる。

### 3.4 追加シミュレーション

追加の実験として、入力列を加えるタイミングを変えて定常偏差と制振性能がどう変化するかを確かめた。入力列を加える際の速度、変位の条件を変えてシミュレーションを行った。

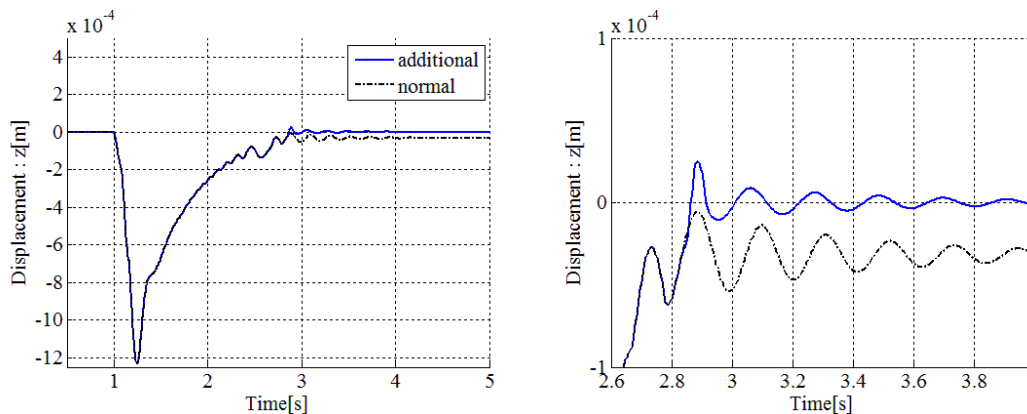


Fig.15 除振台の応答(2.83s)

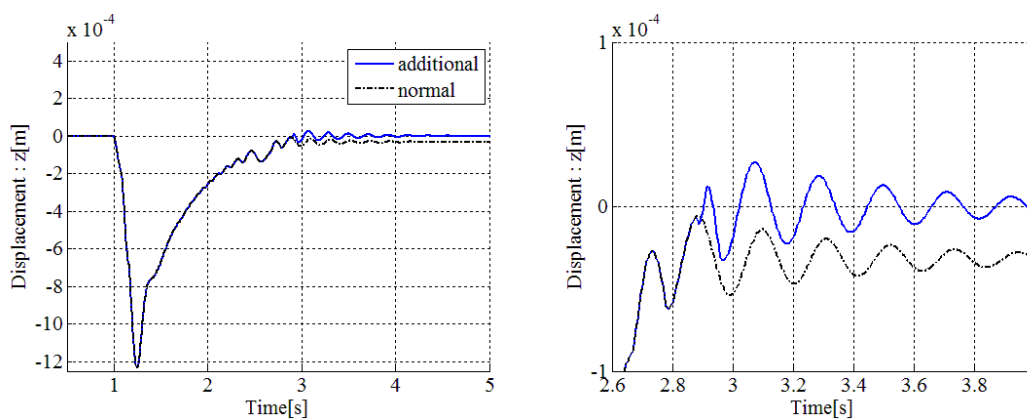


Fig.16 除振台の応答(2.88s)

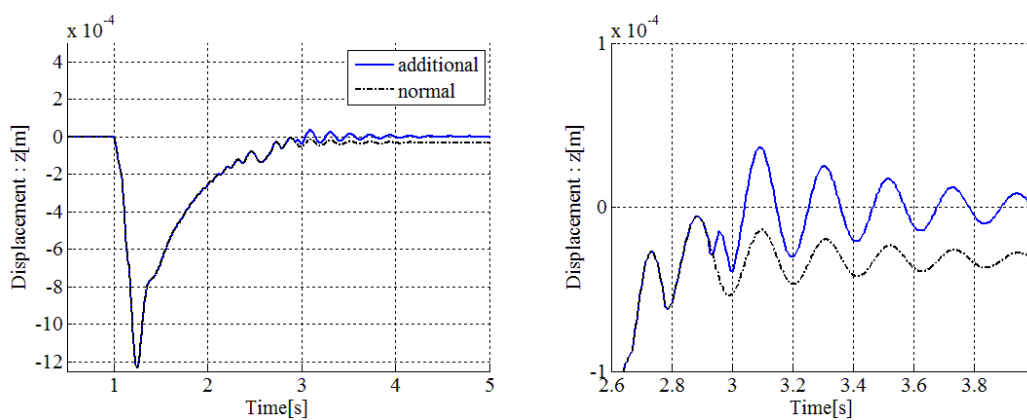


Fig.17 除振台の応答(2.92s)

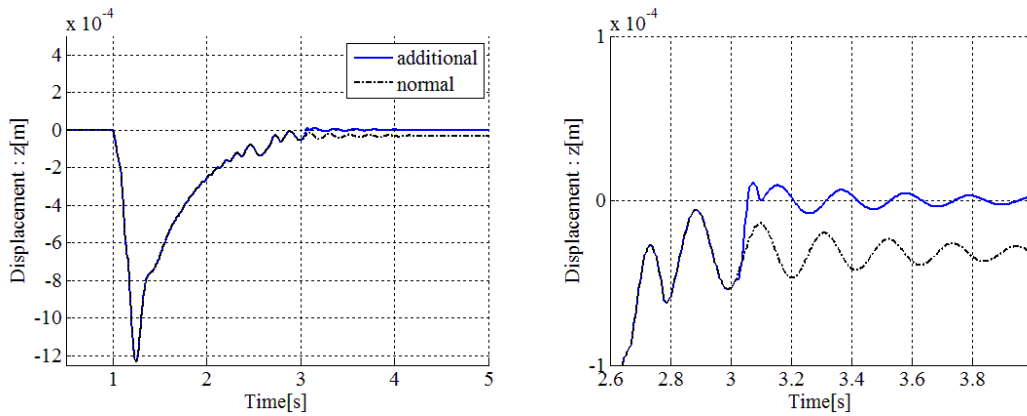


Fig.18 除振台の応答(3.02s)

Fig.15～Fig.18 は全て移動量が $3.196 \times 10^{-5}$ [m]の入力列をフィードフォワードで加えたときの除振台の時間応答を示している。Fig.15 は 2.83[s], Fig.16 は 2.88[s], Fig.17 は 2.92[s], Fig.18 は 3.02[s]の点で入力が増加されている。

これらは全て同じように定常偏差を小さくすることが出来ていた。しかし、入力の加わる際の状態で制振性能に影響が出ている。

この中で、元のフィードバック制御のみの応答と比べ制振性能がほぼ劣化していなかったような Fig.15 の応答と Fig.18 の応答をさらに見ていく。まず、Fig.15 の応答と Fig.13 の応答を比べる。

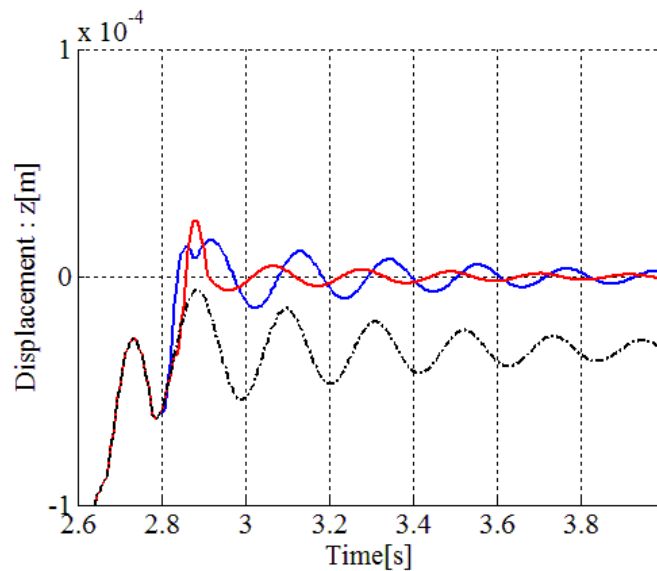


Fig.19 除振台の応答の比較

Fig.19 がその比較を示しており、黒の点線がフィードバックのみ、青線が追加の入力列が 2.8[s]で加わったもの、赤線は入力列が 2.83[s]で加わったものの除振台の変位を表している。

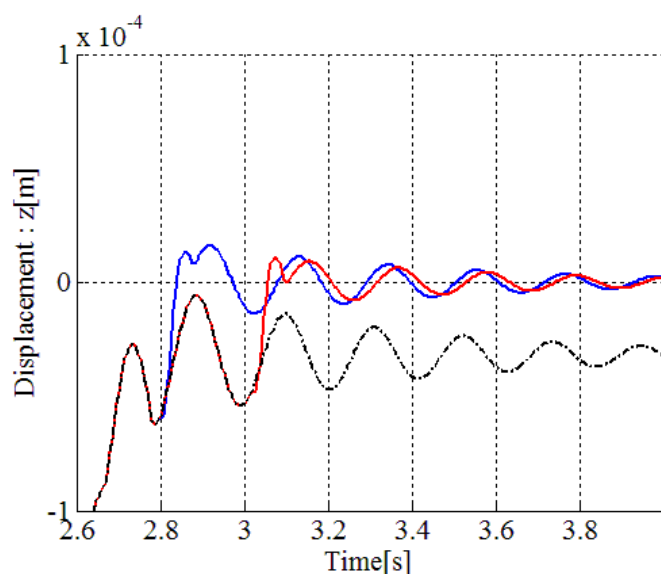


Fig.20 除振台の応答の比較 2

Fig.20 は、黒の点線がフィードバックのみ、青線が追加の入力列が 2.8[s]で加わったもの、赤線は入力列が 3.02[s]で加わったものの除振台の変位を表している。

### 3.5 追加シミュレーションの考察

Fig.15～Fig.18 より、追加の入力列が加わる際の状態の速度成分が正である方が制振性能に関して及ぼす影響が少なく、ほぼ劣化がないと言える。つまり、追加入力を用いた場合の除振台の速度と、ステップ外乱に対してフィードバックしていき入力列を加えるときの速度の符号が逆となり打ち消しあっている場合、制振性能が劣化しないと考えられる。また Fig.20 より変位が違っていても同じ速度の点で入力列を加えると、ほぼ同じような応答が得られると考えられる。

Fig.19 では、赤線の応答ではオーバーシュートが大きくなっているが、その後の振動の幅が小さくなっている。制振性能に関して目視での判断は難しいため、最大となる変位の大きさ、変位が一定の範囲に収まるまでの時間などに重みを付けて評価する方が必要だと考えられる。

## まとめ

適切に追加入力列を作成し、フィードバック制御と、取得した入力列を用いたフィードフォワード制御を組み合わせることで、on-off 弁を用いた空圧式除振台の定常偏差を取り除くことが出来た。また、制振性能に関して追加の入力列を加える際の状態として、速度が重要となっていることが分かり、適切な状態で追加の入力を加えることで制振性能を劣化させず、定常偏差を小さくできることが数値シミュレーションで分かった。

しかし、今回実機では上手くフィードバックとフィードフォワードを切り替えることが出来ずシミュレーションでのみの結果となった。その理由として実機とシミュレーションでのモデルの誤差が大きかったと考えており、入力が外乱の大きさや、圧力によって少し変わってきていたり、実機からシミュレーションのモデルに落とし込めていない部分があったように思える。今後の課題として、実機とシミュレーションの誤差を小さくし、実機で適応できるような制御方法を考える必要がある。

また、境界  $\delta$  を設定する際、今回は不感帯と同じ値で設定していたが、その設定方法も考える必要がある。移動量  $e_+$ 、 $e_-$  の大きさによって、除振台が目標値から+側にある場合と-側にある場合のどちらがより細かく定常偏差を取り除く調整ができるのかが変わってくる。このことや、入力列の長さなどを考慮して境界  $\delta$  を設定する必要がある。

## 参考文献

- [1] 加藤友規, 川嶋健嗣, 澤本晃一, 船木達也, and 香川利春: “スプール型サーボ弁と層流型高速流量計を用いた空圧式アクティブ除振台の制御,” 精密工学会誌論文集, vol.72,no.6,pp.772-777,2006.
- [2] 涌井伸二 and 多田遼太郎: “圧力フィードバック制御と直列補償を備えた空圧系の位置決め制御,” 精密工学会誌, vol.74, no.7, pp.769-774, 2008.
- [3] 甲斐孝志 and 涌井伸二: “絶対変位センサを用いた2自由度空圧式除振装置の制御: ボイスコイルモータを用いた制振(機械力学, 計測, 自動制御),” 日本機械学会論文集, vol.76, no.766, pp.1489-1495, 2010.
- [4] 小池雅和: 非線形量子化器を含むシステムに対する制御手法の構築と空圧式除振台への応用に関する研究,” 信州大学審査学位論文, pp.13-14, 2013.
- [5] 石川将人, 丸田一郎 and 杉江俊治: “フィードバック変調器を用いた離散値入力制御系の設計,” 計測自動制御学会論文集, vol.43, no.1, pp.31-36, 2007.

## 謝辞

本研究をすすめるにあたり, ご指導を頂いた章ふえいふえい教授, 小池雅和助教, また, 多くのご指摘を頂いたオートマティクス研究室の皆様にご心より厚く御礼を申し上げます.

## 付録

シミュレーションで用いたプログラムでの値など

```
ts=0.004;%[s]
hosei=4;
gp_lmin=4.7624*hosei;
gm_lmin=-4.5156*hosei;
gp_si=gp_lmin/4.6671e+004;%si単位系で最大流量
gm_si=gm_lmin/4.6671e+004;

L=0.01;%無駄時間
k0=9.3429e3*1*1.2;
c0=1.2791e2*0.2;
m=13.6;%[kg]
Ar=0.015^2*pi*4;%[m^2]ここで4個分の面積考慮
hi=2;%固定V01に依存
V01=150e-3*100e-3*20e-3*4*0.86;%固定hiに依存4個分
V02=14E-5;
z01=V01/Ar;
z02=V02/Ar;
beta2=1;
mu=5.2052e-007*0.45;
P0=0.035e6;
R=287;
kapa=1.40;
T_s=293;
T_a=293;
Ts=293;

Kgp=kapa*R*Ts/(z02*Ar);
Kzp=kapa*P0*hi/z02;
Kn=kapa*R*Ts/(z02*Ar)*mu;
Km=kapa*R*Ts/(z01*Ar)*mu;

ApI4=[0 1 0 0;
```

```

    -k0/m -c0/m Ar/m 0;
    0 -Kzp -Kn Kn;
    0 0 Km -Km];
Bp14=[0;0;Kgp;0];
Cp14=[1 0 0 0];
Dp14=0;

rank(ctrb(Ap14, Bp14));

%連続時間系から離散時間系へ
sysP=ss(Ap14, Bp14, Cp14, Dp14);
sysP_d=c2d(sysP, ts);
[Ap1d_, Bp1d_, Cp1d_, Dp1d_]=ssdata(sysP_d);

rank(ctrb(Ap1d_, Bp1d_));

%サーボ系に拡張
M=13.6;
bc2_=[0;-1/M;0;0];
[Ap1d_, bd2]=c2d(Ap14, bc2_, ts);
Ap1d_2=[transpose(Ap1d_);0 0 0 0];
Ap1d=[transpose(Ap1d_2);-ts 0 0 0 1];
Bp1d=[Bp1d_;0];
Cp1d=[Cp1d_ 0];
bc2=[bc2_;0];

%外乱
gain=[0 -1.35 0 0];
gairan=0.0001*1.4;%補正項 1.3→1.4
ryuryou=0;

%最適レギュレータ
%Q=diag([1e1 1e9*3 1e0 1e-4 1e14]);%20170911
Q=diag([1e13 1e9*3 1e0 1e-4 1e14]);%20190519
% Q=diag([1e6 1e10 1e0 1e-4 1e14]);%20191002_1

```



```
% Q=diag([1e1 1e10*8 1e0 1e-3 1e14]);%20191002_2
R=1e1;
Fa=dlqr (Apld, Bpld, Q, R);

%初期値設定
x0=zeros (5, 1);
x=x0;
MM=0.1;%ステップ外乱[kg]
d=MM*9.8/13.6;
u_Max=4.08e-4;
u_min=-4.45e-4;
T_end=10;%シミュレーション終了時間
```