

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

著者	中田 拓海
学位名	修士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2019
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001897/

on-off 弁駆動型空圧式除振台の定常性能向上へのアプローチ

中田 拓海（海洋システム工学専攻、指導教員：章ふえいふえい）

1. 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。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。しかし、非常に安価で導入しやすい on-off 弁を用いている場合には、振動抑制性能は高いが、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。

2. システムの構成

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 に示すものである。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。

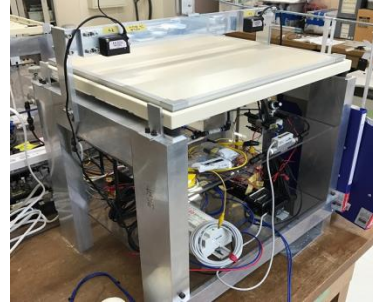


Fig. 1 空圧式除振台

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

$$M\ddot{z} + c_p\dot{z} + k_p z = S p_a - d \quad (1)$$

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

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

となる。文字の定義と値は Table1 に示す。

そして、状態変数を $x = [z, \dot{z}, p_a, p_b, e]^T$ (z, p_a, p_b, e , は除振台の変位[m], 速度[m/s], 空気ばねの圧力[Pa], バッファタンクの圧力[Pa], 目標値 y_{ref} [m] と変位の偏差[m]) とし、制御入力を u として線形近似したシステム Σ_c は

$$\dot{x}(t) = A_c x(t) + b_c u(t-L) + \hat{b}_c d + C y_{ref} \quad (4)$$

と表される。ただし、

$$K_{gpp} = \frac{\kappa R_s T_s}{z_a S}, \quad K_{zpp} = \frac{\kappa p_0 h_p}{z_a}, \quad K_a = K_{gpp} \mu, \quad K_b = \frac{\kappa R_s T_s}{z_b S} \mu$$

であり A_c, b_c, \hat{b}_c, C_c は

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_p}{M} & -\frac{c_p}{M} & \frac{S}{M} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{zpp} & -K_a & K_a & 0 \\ 0 & 0 & K_b & -K_b & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{gp} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \hat{b}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -\frac{M}{0} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

である.

空圧式除振台の操作量は空気ばねへ流入出する流量であり, on-off 弁の開閉は Table 2 の組み合わせのみとし, 流量は近似的に離散値入力となる.

$H_+ = 5.14 \times 10^{-4}$ [kg/s], $H_- = -3.21 \times 10^{-4}$ [kg/s], はそれぞれ流量の値である. これにより, 線形入力 (連続信号) σ を離散値入力 (離散値信号) u に変換する量子化器 $\phi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

$$u = \phi(\sigma) = \begin{cases} H_+, & \text{if } \frac{H_+}{2} \leq \sigma \\ H_-, & \text{if } \sigma \leq \frac{H_-}{2} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

がシステムに内蔵されていると考えることができる. 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.

以降では, (4) 式の係数行列 A_c, b_c, \hat{b}_c, C_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. Σ :

$$x[k+1] = A_c x[k] + b u[k] + \hat{b} d[k] + C y_{ref} \quad (8)$$

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.

Table.1 モデルのパラメータ

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	9.34×10^3 [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	2.83×10^{-3} [m ²]
気体定数	R_s	287 [J/(kg·K)]
比熱比	κ	1.4 [-]
機体温度	T_s	293 [K]
バルブ係数	μ	2.34×10^{-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]

Table.2 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

3. 制御設計

1) サーボ系を用いた設計

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に続く. 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. 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, ぴったり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, その時点で振動が起きてしまうことがある. そこで, そのデメリットを解消するために不感帯を用いる. 不感帯を用いた場合, 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, 時間が経ち入ってほしくないような入力加わることがなくなる. 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. そこで, フィードフォワード的な方法を用いて定常性能を向上させていく.

2) フィードフォワードを用いた制御

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_- の入力値は互いに素であるため, 任意の α に対して $i H_+ + j H_- = \alpha$ を満たすような整数 i, j が必ず存在する. また H_+ , H_- の符号は逆となっているため H_+ , H_- を印加する回数の組み合わせによって得られる入力の量はごく小さいものに

調整することも出来る。

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入力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定常偏差の大きさに応じて印加することで定常性能を向上させることを目指す。

次の節では、どのように入力列を作っていくかを説明していく。

3) 入力列の作成

まず、各入力(0 入力を除いた)1 ステップ分に対する除振台の変位を調べる。入力 H_+ , H_- に対応する除振台の移動量を e_+ , e_- [m]とする。この二つを組み合わせると不感帯より小さな移動量となるような入力 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、最適レギュレータによって得られるゲインを用いて制振性能の高い入力列を取得していく。不感帯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、同じゲインでは時間が経たなければ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、違うゲイン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。

4. 実験

1) 実験方法

(1) フィードバック制御

まず、(8)式のシステムに対してフィードバック制御を行う。重み行列

$$Q = \text{diag}(1 \times 10^{13} \ 3 \times 10^9 \ 1 \ 1 \times 10^{-4} \ 1 \times 10^{14})$$

$$R = 1 \times 10^1$$

として、最適レギュレータによりゲイン F を設計し

$$F = [-4.12 \times 10^{-3} \ 4.67 \times 10^{-2} \ 2.20 \times 10^{-7} \ 2.22 \times 10^{-7}$$

$$-4.04 \times 10^2]$$

を得る。次に、量子化器を含むシステム(8)式にフィードバック制御を施したシステムに対して、0.1[kg]の重りを1秒時点から台にのせるようなステップ外乱を加えて、除振台の時間応答を数値シミュレーションで計算する。不感帯の大きさは

$-5.0 \times 10^{-5} \sim +5.0 \times 10^{-5}$ [m]とし、変位がこの中に納まっている間入力が0となる。

(2) 追加入力の作成

前項と同じ(8)式のシステムに Table.3 の変位を目標値 y_{ref} に設定しフィードバック制御を行う。この際、前項で設定した不感帯より大きな変化量となる入力の組み合わせは使用しない。

Table.3 入力のステップ数と除振台の移動量

$H_- \backslash H_+$	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 $\times 10^{-5}$ [m])

重み行列は入力の組み合わせのパターンによって調整し

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

などを使い最適レギュレータによってゲイン F' を得る。 R は全て同じく $R = 1 \times 10^1$ を用いる。

2) 実験結果

(8)式のシステムに対してフィードバック制御を行い、Fig.2 の応答を得た。

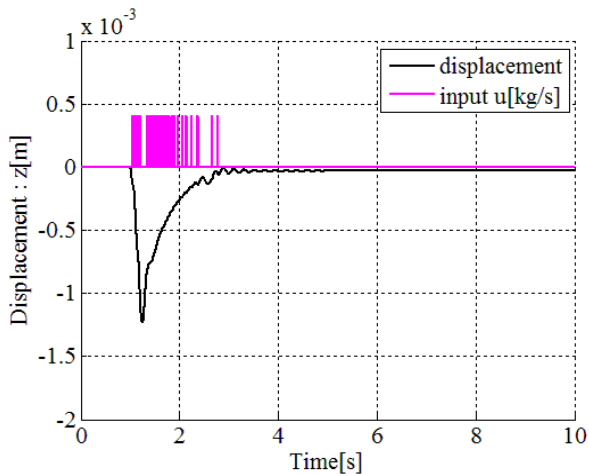


Fig.2 除振台の時間応答

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 $-3.2 \times 10^{-5}[\text{m}]$ 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。今回は 9 つの入力パターンを作成した。Fig.3 は除振台の変位の変化量が $3.196 \times 10^{-5}[\text{m}]$ となる入力パターンである。

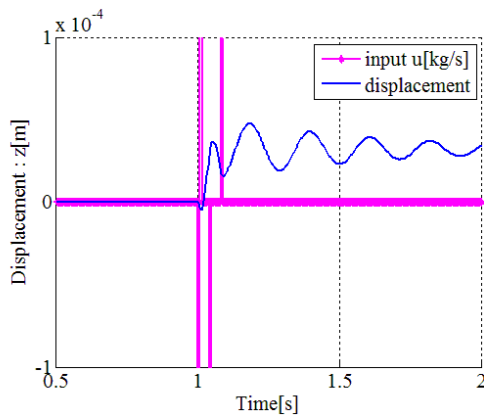


Fig.3 追加入力とその応答

Fig.4 は追加入力を加えた場合の除振台の応答である。追加入力の 9 パターンの中から定常偏差に応じた追加入力パターンが適切な点で印加されることによって制振性能は保ったまま、除振台の定常偏差の部分が適切に取り除かれている。

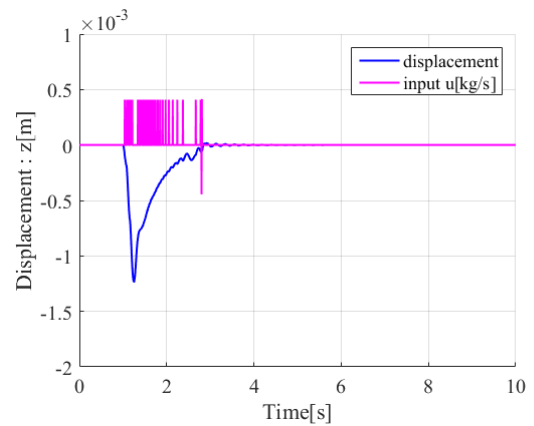


Fig.4 追加入力を加えた場合の除振台の時間応答

Fig.5 は追加入力の入っていない場合との比較となっており、もともとの応答から制振性能がほぼ劣化せず、定常偏差が取り除かれていることがわかる。

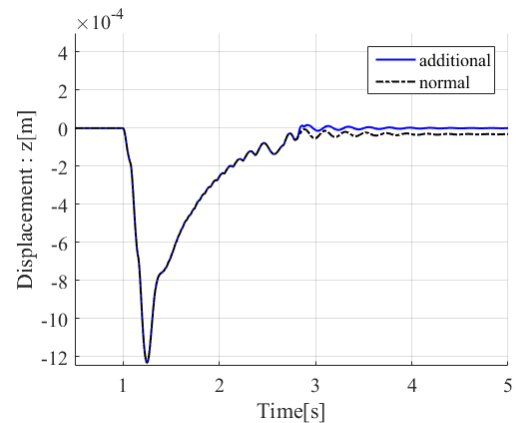


Fig.5 除振台の応答の比較

3) まとめ

適切に追加入力を作成し、作成した入力列と不感帯を用いて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けることが分かった。