巡回制御入力による空圧式除振台の３軸振動抑制制御

修士学位論文

巡回制御入力による
空圧式除振台の３軸振動抑制制御

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

銀屋　　　統

目次

第 1 章　序論

1.1　研究背景と目的

精密部品の測定や製造分野では，床から伝わる振動が精密さに大きな影響を及ぼす．そのため，除振台と呼ばれる装置を用いることで，床から伝わる振動の絶縁を行っている．特に，この振動絶縁性能が高いという理由から空圧式除振台が広く用いられている．
今回使用する空圧式除振台は，空気ばねと呼ばれる機器によって台を支えているタイプである，この空気ばねを仲介することによって床からの振動は台上に伝わりづらくなり，高い振動絶縁性能を実現している．
空圧式除振台は大きく分けてパッシブ型とアクティブ型の 2 つのタイプが存在する．パッシブ型は空気ばねと呼ばれるバネの上に台が載っているだけであり、ばね内の流量を操作するアクチュエータは取り付けられていない．メリットとして装置の製作コストを低くすることができる．しかし，台自体が振動すると振動を床に逃がすことが困難であるため，振動が持続してしまうという問題を抱えている．
この問題を解決するために，アクティブ型はアクチュエータによって，空気ばねの内圧を変化させることで振動抑制を目的としている．そしてこのタイプの除振台についての研究が多く存在している[1][2].
先行研究ではアクチュエータとしてサーボ弁を各空気ばねに取り付け，各空気ばね内の流量を自由に操作することで、台の鉛直方向、ロール回転方向、ピッチ回転方向の動きで振動を抑制する．しかし，サーボ弁は高価なアクチュエータのため空圧式除振台のコストが高くなるという問題点がある．そこで，サーボ弁の代わりに電磁弁を使用し 3 軸の振動抑制を行う研究がある[3].電磁弁のみを使用するとオフセットが残ってしまうというデメリットが存在する．そこで 1 個のサーボ弁と流路を切り替える電磁弁を組み合わせることにより従来の装置に比べてコストが低く，同等の性能を持った除振台を製作することが目的である．

1.2　本論文の構成

本論文では，以下の構成になっている．第 1 章では本研究の背景及び目的を述べる．第 2 章では空圧式除振台の装置構成について述べる．第 3 章では本装置の制御モデルについて述べる．第 4 章ではフィードバックゲインの決定に用いた解法とシミュレーションの結果について述べる．第 5 章では第 4 章で求めたフィードバックゲインを用いて実機実験を行う．第 6 章では結論を述べる．

第2章　空圧式除振台の概要

本章では空圧式除振台の装置構成とセンサについて説明する.

2.1　装置構成

本研究で扱う空圧式除振台（ヘルツ株式会社製，DT-4048M-A）を図 2.1 に示す．本装置の空圧回路図を図 2.2 に示す． 給気時にはコンプレッサから空気を放出し，空圧レギュレータが 0.4MPa に減圧し，一定の圧力になった空気をサーボ弁に送る． 排気時にはサーボ弁の排気ポートから排気を行う．使用するサーボ弁はスプール型（ピー・エス・シー株式会社製，AS310L-007 S/N 065）を使用する．流路を切り替えるための電磁弁は（クロダニューマティクス製 VA01HPSC24-1P）を使用する．応答時間は開閉ともに 2msである．

図 2.1　空圧式除振台

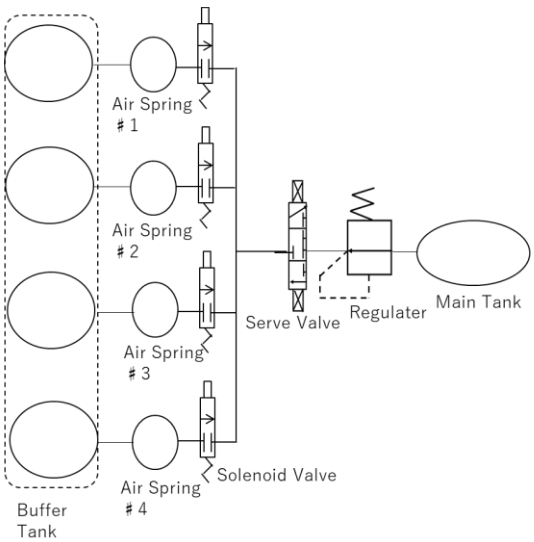

図 2.2　空圧回路

2.2　センサ

実験では，台の鉛直方向変位z[m]，台のロール角θ_1[rad]，台のピッチ角θ_2[rad]，空気ばね内圧pa[Pa]，バッファタンク内圧pb[Pa]の値が必要となる．台の鉛直方向の変位z[m]は，テーブル上方に設置した 2 つのレーザー変位計（株式会社キーエンス製，IA-030）[3]によって測定を行う．このセンサは対象物に照射されたレーザーの反射光を受光素子が読み取り距離を測定する三角測量の原理を用いて測定している．測定範囲は$\pm$10mm，分解能は 2μm，応答時間は 2msである．台のロール角θ_1[rad]は 2 つのレーザー変位センサの値から角度を算出している．センサの測定範囲は図 2.3 に示す，台のピッチ角θ_2[rad]は台の中心の変位とレーザー変位センサとの値から角度を算出する．空気ばね内圧及びバッファタンク内圧は圧力センサ（株式会社コガネイ製，GS610A）によって測定を行う．測定範囲は$\pm$100kPaである．

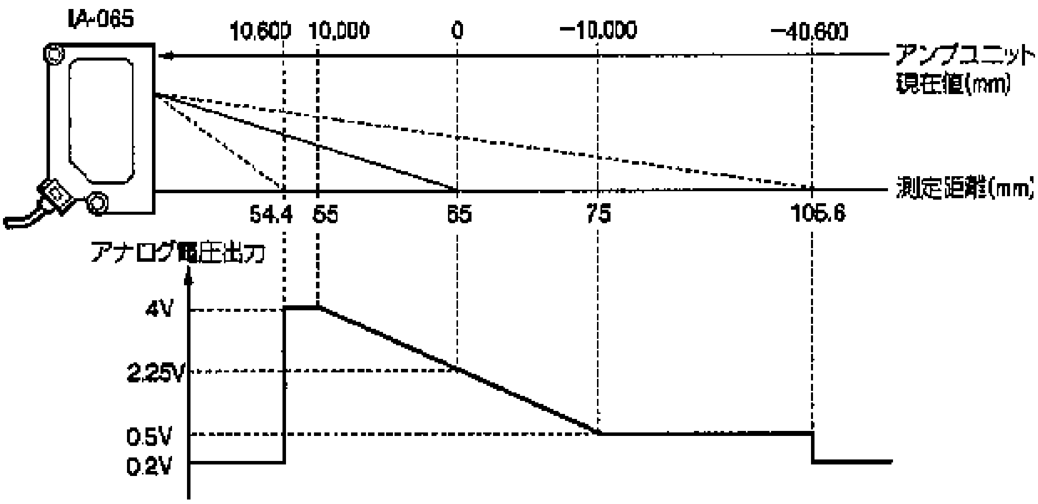

図 2.3 センサ測定範囲[3]

2.3　空圧機構

サーボ弁から空気ばねまで適切なタイミングで空気を送るために以下の 4 つ点に留意し，空圧機構の改良を行った．除振台では計算した流量通りにサーボ弁の給排気できるかが重要である．

①太さを可能な限り統一する
異なる太さでは圧力損失が発生し，流速が低下することが知られている．
例えば流路の一部が絞られていると，絞られている箇所より下流の圧力が減少する．これを『圧力損失』と呼ぶ．『圧力損失』は，『エネルギー損失』であり，下流側の圧力低下だけではなく，流量，流速も減少させる．
圧力計 A と圧力計 B の圧力差（図 2.4）が『圧力損失』である．[4]

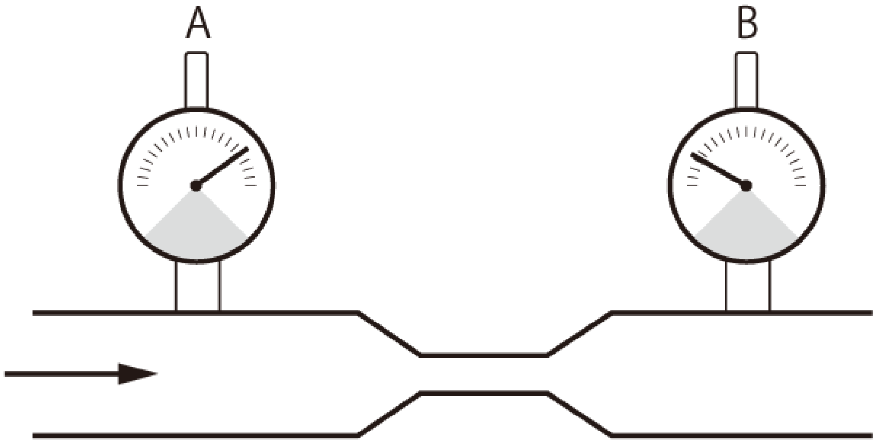

図 2.4 圧力損失のイメージ図

②配管をできるだけ曲げない
曲がる部分でも圧力損失が発生し，流速が低下する．

③細い管を使用する
下記の式より細い管を使用することで流速を上げることができる．[5]

$$v = \frac{Q}{60A} \qquad (1)$$

v: 流体の平均速度(m/s),

Q: 圧力 P における空気流量(m^3/min)

P: 流体の絶対圧力(MPa)

A: 配管の断面積(m^2)

④サーボ弁から on-off 弁までの距離を短くする

後に触れるが本研究では巡回制御入力を行っているため，できるだけサーボ弁で吐き出された空気を各空気ばねに独立して入れるようにしたい．よってサーボ弁から on-off 弁までの距離を可能な限り短くした．

第 3 章　制御モデル

3.1　モデル

本章では本装置のモデルについて説明する. モデルは先行研究である[6]を引用している. このモデルを状態方程式に表現したものが以下になる. サンプリングタイムは 2ms である.

$$x[k+1] = A_c x[k] + B_c u\,[k] \quad (2)$$
$$x = \left[\, z\ \ \theta_1\ \ \theta_2\ \ \dot{z}\ \ \dot{\theta}_1\ \ \dot{\theta}_2\ \ p_{a1}\ p_{b1}\ p_{a2}\ p_{b2}\ p_{a3}\ p_{b3}\ p_{a4}\ p_{b4} \,\right]^T \quad (3)$$
$$u = [\, u_1\ u_2\ u_3\ u_4 \,]^T \quad (4)$$

状態変数の要素は鉛直方向の変位z，速度を$\dot{z}$，ロール角θ_1，角速度を$\dot{\theta}_1$，ピッチ角θ_2，角速度を$\dot{\theta}_2$，空気ばね#1の内圧をpa_1，空気ばね#2の内圧をpa_2，空気ばね#3の内圧をpa_3，空気ばね#4の内圧をpa_4とする. 同様に バッファタンク＃1 の内圧をpb_1,バッファタンク#2の内圧をpb_2バッファタンク#3の内圧をpb_3,バッファタンク#4の内圧をpb_4とする. ばね内の空気の操作流量uは各空気ばねに振り分けており，空気ばね＃1～＃4の流量を$u_1 \sim u_4$とする.

この数値モデル妥当性を検証するため，インパルス外乱に対する変位，ロール角，ピッチ角の自由応答と実機実験におけるインパルス外乱に変位，ロール角，ピッチ角を比較した結果, 13μm，3.3×10^{-6}rad，3.2×10^{-4}radであった. 最大振幅に対する誤差の比率は 0.95%, 0.036%，2.8%であり，このモデルは妥当だといえる.

3.2　巡回制御入力

本研究の特徴である巡回制御入力について説明する．

本装置はアクチュエータの数が 1 つしかないという制限があるため各空気ばねの流量を同時に操作することができない．そのため各ステップに電磁弁を順番に切り替え 1 個の空気ばねの流量を操作する．式(2)の$\mathrm{B_c}, u$を次のように変形する．

$$B_c = [b_1\ b_2\ b_3\ b_4] \quad (6)$$

$$u[k] = \begin{bmatrix} u_1[k] \\ u_2[k] \\ u_3[k] \\ u_4[k] \end{bmatrix} \quad (7)$$

このときシステムは線形スイッチドシステム

$$x[k+1] = A_c x[k] + b_i u_i[k],\ \ i \in \{1,2,3,4\} \qquad （8）$$

と表すことができる．

さらに使用する電磁弁を開ける順番を

valve#1 → valve#2 → valve#3 → valve#4 →

とする．

このとき入力は

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \to \begin{bmatrix} 0 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \to \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_3 \\ 0 \end{bmatrix} \to \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_4 \end{bmatrix} \to \qquad （9）$$

とする．これを「巡回制御入力」と名付ける(図 3.1～図 3.4)．

各入力ポートに$u_i = f_i x$を用いた状態フィードバック制御を考える．

各空気ばねの入力$u_1[k]$から$u_4[k]$はフィードバックゲインf_1~f_4によって決定する．

f_1を空気ばね#1のフィードバックゲイン,f_2を空気ばね#2のゲイン,f_3を空気ばね#3のゲイン,f_4を空気ばね#4のゲインとする．

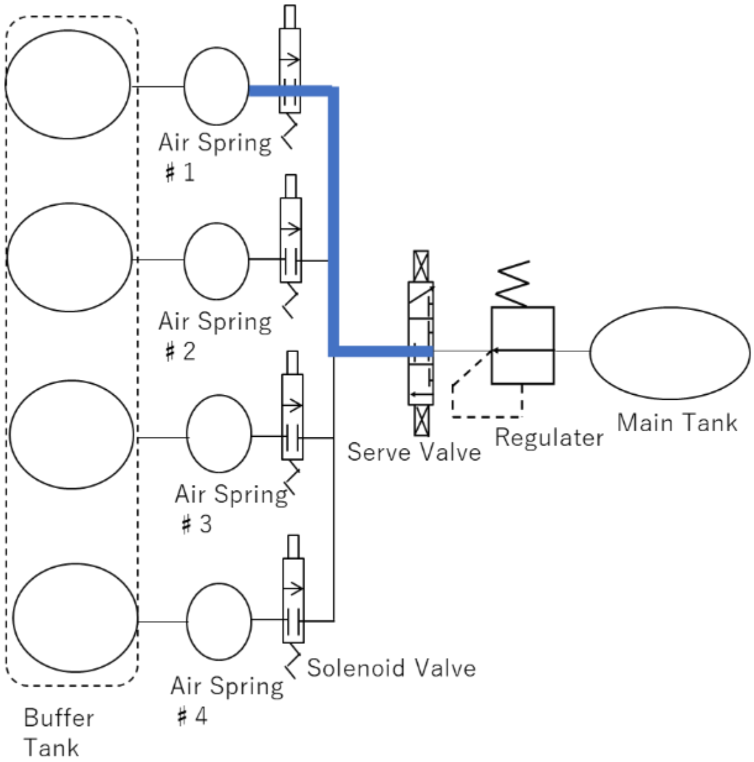

図 3.1　1 ステップ後の入力

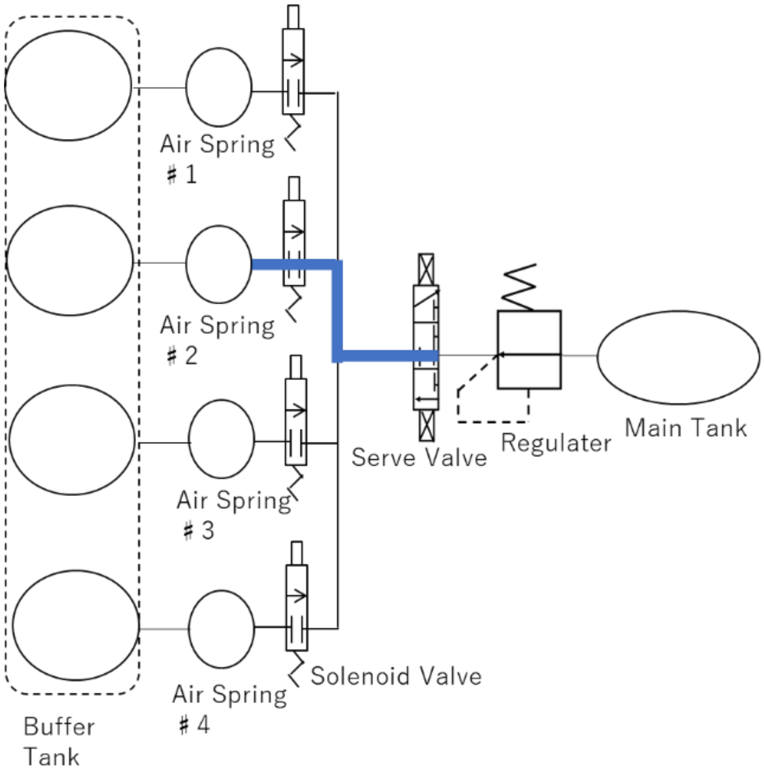

図 3.2　2 ステップ後の入力

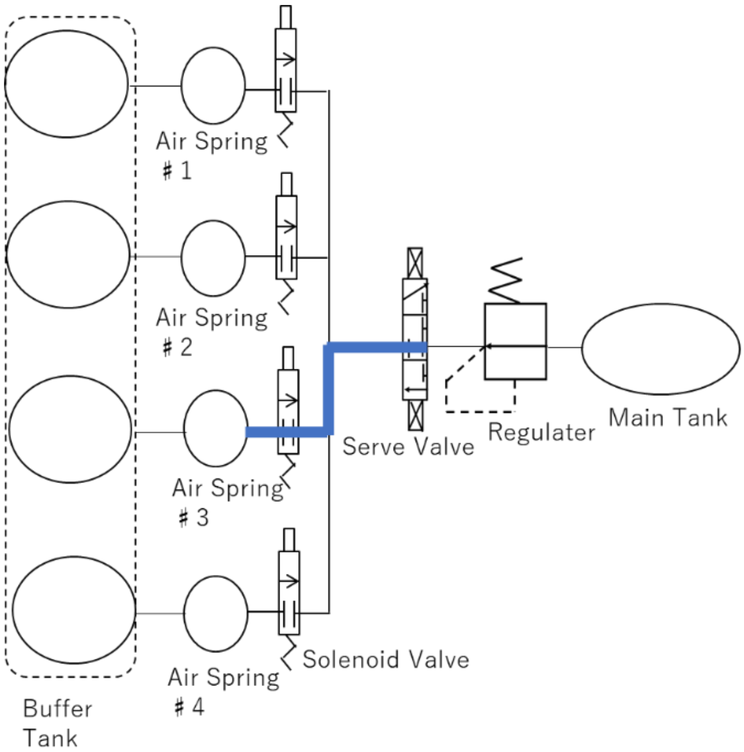

図 3.3　3 ステップ後の入力

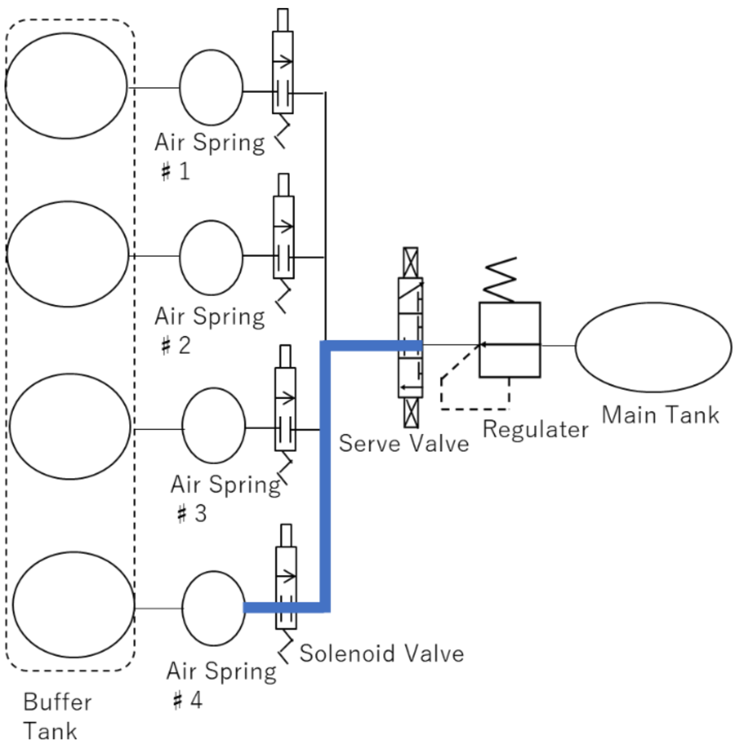

図 3.4　4 ステップ後の入力

3.3 安定性

4 ステップごとを 1 周期として議論すると，

$$x[k+1] = Ax[k] + bu[k]$$

$$= Ax[k] + [b_1\ b_2\ b_3 b_4]\begin{bmatrix} u_1[k] \\ u_2[k] \\ u_3[k] \\ u_4[k] \end{bmatrix} \qquad (10)$$

$$u_1[k] = -f_1 x[k] \qquad (11)$$

$$u_2[k] = -f_2 x[k] \qquad (12)$$

$$u_3[k] = -f_3 x[k] \qquad (13)$$

$$u_4[k] = -f_4 x[k] \qquad (14)$$

となり，4 ステップ後を考えると
式の右辺$(A - b_1 f_1)(A - b_2 f_2)(A - b_3 f_3)(A - b_4 f_4)$が安定行列であればシステムは安定することが確認できる．

$$x[k+4] = (A - b_1 f_1)(A - b_2 f_2)(A - b_3 f_3)(A - b_4 f_4)x[k] \qquad (15)$$

以下では上記の式の導出を示す．
1 ステップ後の状態方程式は次式で表現できる．

$$x[k+1] = Ax[k] + b_1 u_1[k] \qquad (16)$$

空気ばね#1 への入力$u_1[k]$は次式で表現できる．

$$u_1[k] = -f_1 x[k] \qquad (17)$$

u_1を代入すると状態方程式は次式となる．

$$x[k+1] = (A - b_1 f_1)x[k] \qquad (18)$$

2 ステップ後の状態方程式は次式で表現できる．

$$x[k+2] = Ax[k+1] + b_2 u_2[k+1] \qquad (19)$$

空気ばね#2 の入力$u_2[k]$は次式で表現できる．

$$u_2[k+1] = -f_2 x[k] \qquad (20)$$

u_2を代入すると状態方程式は次式となる．

$$x[k+2] = (A - b_2 f_2)(A - b_1 f_1)x[k] \qquad (21)$$

3 ステップ後の状態方程式は次式で表現できる．

$$x[k+3] = Ax[k+2] + b_3 u_3[k+2] \qquad (22)$$

空気ばね#3 の入力$u_3[k]$は次式で表現できる．

$$u_3[k+2] = -f_3 x[k] \qquad (23)$$

u_3を代入すると状態方程式は次式となる．

$$x[k+3] = (A - b_3 f_3)(A - b_2 f_2)(A - b_1 f_1)x[k] \qquad (24)$$

4 ステップ後の状態方程式は次式で表現できる．

$$x[k+4] = Ax[k+3] + b_4 u_4[k+3] \qquad (26)$$

空気ばね#4 の入力$u_4[k]$次式で表現できる．

$$u_4[k+3] = -f_4 x[k] \qquad (27)$$

u_4を代入すると状態方程式は次式となる．

$$x[k+4] = (A - b_4 u_4)(A - b_3 u_3)(A - b_2 u_2)(A - b_1 u_1)x[k] \qquad (28)$$

入力$u_i[k]$（$i \in \{1,2,3,4\}$）を決定するのはf_i($i \in \{1,2,3,4\}$)でありこの値が非常に重要な役割を持っている．そこで第 4 章ではフィードバックゲインの決定方法を 2 つ紹介する．

第４章　フィードバックゲインの決定

4.1　最適レギュレータ

　コントローラの設計法の代表的なものとして極配置法などが存在する．指定する極を複素平面で負側に大きなものを選ぶことで，状態変数の収束性を高めることができる．しかしその代償として操作量が大きくなる，状態変数の一部の振れ幅が大きくなるなどの問題がある．また，他入力システムにおいては指定した極となるようなコントローラのゲインが唯一ではなく度のゲインを用いればよいのかが不明瞭であるといった問題もある．
そこでこのような問題に対処するため“状態変数の収束をする”，“入力の大きさを抑える”といった様々な要求の達成度を定量的に表した以下の評価関数Jを最小化するようにコントローラ設計法を最適レギュレータと呼ぶ[7]．

$$\mathrm{J} = \int_0^\infty (x[t]^T Q x[t] + u[t]^T R u[t]) dt \qquad (30)$$

ゲインf_1~f_4の決定するためには、まず各空気ばねに１つずつサーボ弁が付いており,4 つ全て同時刻に独立かつ自由に動かすことができる理想的なシステムに対するフィードバックゲインF'を決定する．
F'の決定には最適レギュレータを使用し,以下の重み行列QとRを用いて設計する．

$$Q = diag[10^{12}\ \ 10^{8}\ \ 10^{12}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}] \qquad (31)$$

$$R = diag[1\ 1\ 1\ 1] \qquad (32)$$

その後設計したゲインF'を

$$F' = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \qquad (33)$$

と分解し，　各空気ばねのフィードバックゲインとして割り当てた．
さらに，フィードバックゲインf_1からf_4の各空気ばね内圧pa_1からpa_4の項，各バッファタンク内圧pb_1からpb_4の項を 0 にする．これにより各空気ばねとバッファタンクに取り付ける圧力センサが必要なくなる．
式(23)の重み行列で設計したフィードバックゲインを用いて数値シミュレーションをした結果が図 4.1 から図 4.3 である．ロール回転で制振性能が劣化しているが，鉛直方向の進度抑制を重く見ている点，実機に適応させやすい点を考慮し（23）のゲインを使用した．

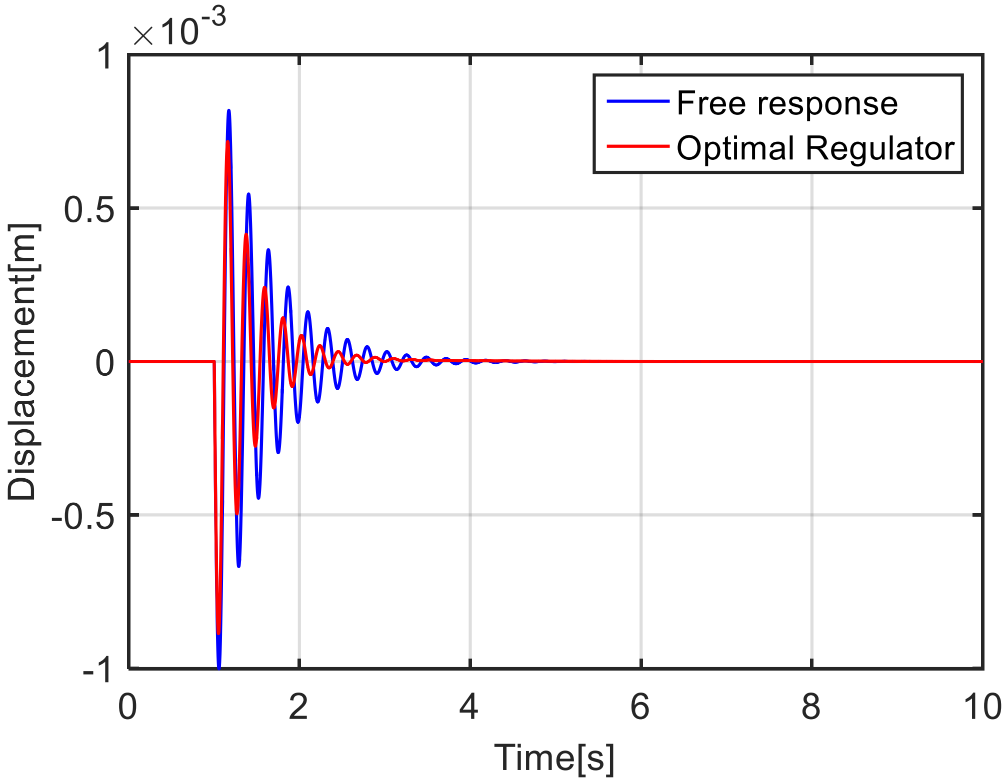

図 4.1 鉛直方向の変位

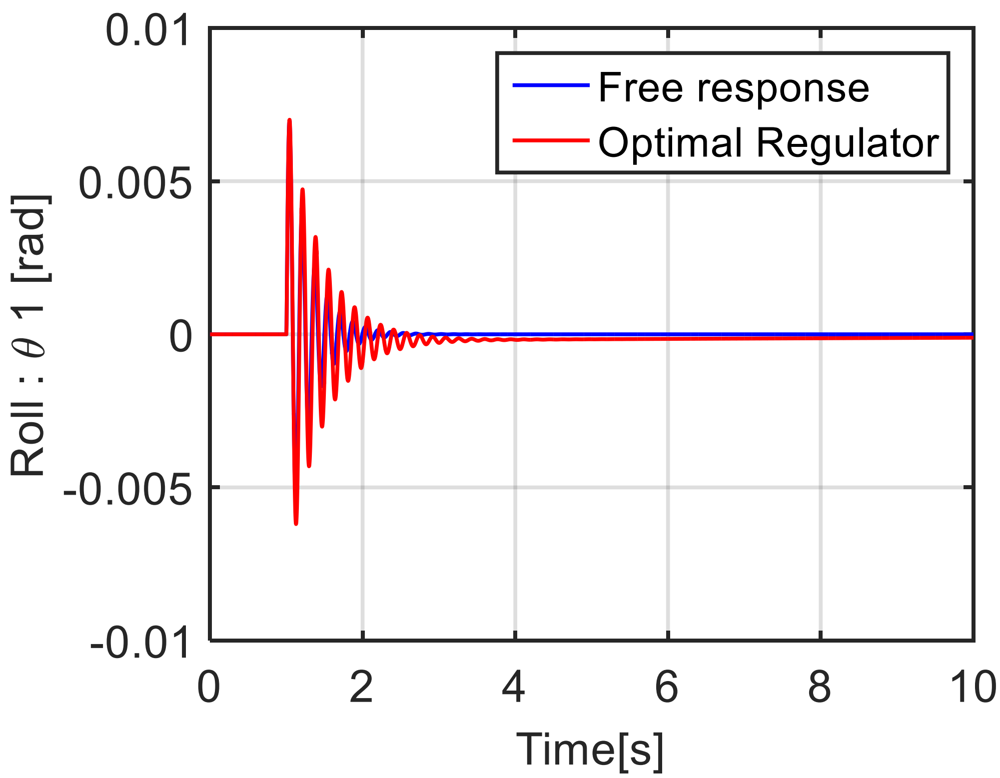

図 4.2 ロール回転方向の角度

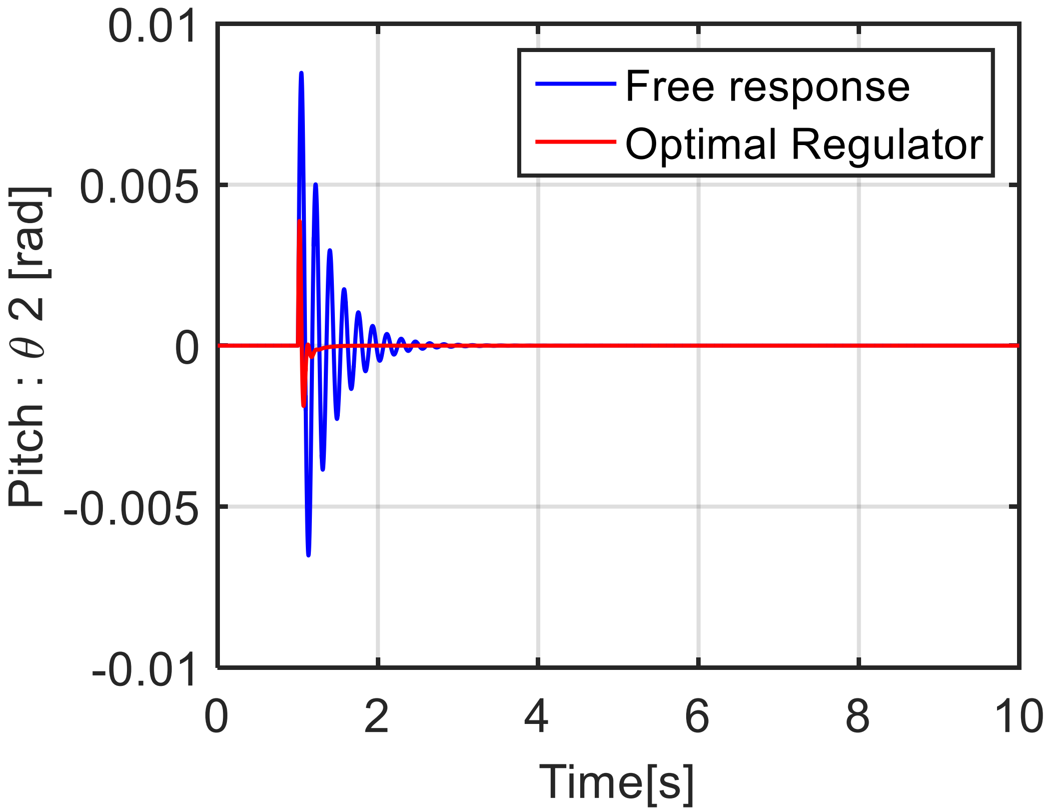

図 4.3 ピッチ回転方向の角度

4.2　LMI（Linear Matrix Inequality）

LMIは線形行列不等式と呼ばれ，近年リアプノフ方程式やリカッチ方程式といった行列方程式ではなく，リアプノフ不等式やリカッチ不等式のように行列が正定（あるいは負定）であるといった条件からコントローラの設計する手段がある．これには複数の設計仕様を同時に満足させるなど，状況に応じてゲインを変化させるなど実用的なコントローラ設計が容易であるといった利点がある．特に線形行列不等式（LMI）で設計仕様の可解条件を記述できる場合はMATLAB上のツールを利用することでLMIの数値解を効率的に求めることができる[8].

Step0　初期値として$f_1 = f_1^0, f_2 = f_2^0, f_3 = f_3^0$を適当に与える．

Step1　find $X \in \mathbb{R}^{14\times14}, M \in \mathbb{R}^{1\times14}$　s.t

$$\begin{bmatrix} X & * \\ \tilde{A}_4 X - b_4 M & X \end{bmatrix} > 0 \qquad (34)$$

$$X > 0 \qquad (35)$$

$$\tilde{A}_4 \coloneqq AG_4 \qquad (36)$$

$$G_4 \coloneqq (A - b_3 f_3^0)(A - b_2 f_2^0)(A - b_1 f_1^0) \qquad (37)$$

得られたX, MをX^*，M^*と表し

$$f_4^* = M^* X^{*-1} G_4^{-1} \qquad (38)$$

Step2　find $f_3 \in \mathbb{R}^{1\times14}\ s.t$

$$\begin{bmatrix} P + Q_3 & * \\ \tilde{A}_3 - \tilde{B}_3 f_3 G_3 & P^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \qquad (39)$$

$$\tilde{A}_3 \coloneqq (A - b_4 f_4^*) A G_3 \qquad (40)$$

$$G_3 \coloneqq (A - b_2 f_2^0)(A - b_1 f_1^0) \qquad (41)$$

$$\tilde{B}_3 \coloneqq (A - b_4 f_4^*) \mathrm{b}_3 \qquad (42)$$

$$\mathrm{Q}_3 \coloneqq (A_4^T - K_4^T b_4^T) P \left(\tilde{A} - b_4 K_4\right) - P \qquad (43)$$

Step3　find$f_2 \in \mathbb{R}^{1\times14}$ s.t.

$$\begin{bmatrix} P + Q_2 & * \\ \tilde{A}_2 - \tilde{B}_2 f_2 G_2 & P^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \qquad (44)$$

$$\tilde{A}_2 \coloneqq (A - b_4 f_4^*)(A - b_3 f_3^*) A G_2 \qquad (45)$$

$$G_2 \coloneqq A - b_1 f_1^0 \qquad (46)$$

$$\tilde{B}_2 \coloneqq (A - b_4 f_4^*)(A - b_3 f_3^*) b_2 \qquad (47)$$

$$Q_2 \coloneqq (A_3^T - G_3^T f_3^T B_3^T) P \big(\tilde{A}_3 - B_3 f_3 G_3\big) - P \qquad (48)$$

Step4 find $f_1 \in \mathbb{R}^{1\times 14}$ s.t

$$\begin{bmatrix} P + Q_1 & * \\ \tilde{A}_1 - \tilde{B}_1 f_1 & P^{-1} \end{bmatrix} \geq 0 \qquad (49)$$

$$\tilde{A}_1 \coloneqq (A - b_4 f_4^*)(A - b_3 f_3^*)(A - b_2 f_2^*) A \qquad (50)$$

$$\tilde{B}_1 \coloneqq (A - b_4 f_4^*)(A - b_3 f_3^*)(A - b_2 f_2^*) b_1 \qquad (51)$$

$$Q_1 \coloneqq \big(\tilde{A}_2^T - G_2^T f_2^T B_2^T\big) P \big(\tilde{A}_2 - B_2 b_2 G_2\big) - P \qquad (52)$$

例）Step1 で得られたf_4^*とX^*を用いてシステム

$$x[k+1] = (A - b_4 f_4^*)(A - b_3 f_3^0)(A - b_2 f_2^0)(A - b_1 f_1^0) x[k] \qquad (53)$$

が安定であることを示す.
これはゲイン$f_1^0, f_2^0, f_3^0, f_4^*$を用いた時のシステムに対応する.
リアプノフ関数の候補を$V_1 = x^T P x$とする. ただし, $P \coloneqq X^{*-1}$である.

$$\Delta V_1 = x^T \big[\big(A_4^T - G_4^T {f_4^*}^T b_4^T\big) P \big(\tilde{A}_4 - b_4 f_4^* G_4\big) - P\big] \mathrm{x} < 0 \qquad (54)$$

を示せばよい.

$$P - \big(A_4^T - G_4^T {f_4^*}^T b_4^T\big) P \big(\tilde{A}_4 - b_4 f_4^* G_4\big) > 0 \qquad (55)$$

と等価である.

Schur 補題を用い, 左右から正定行列

$$D = \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \qquad (56)$$

をかければ

$$\begin{bmatrix} P^{-1} & * \\ \tilde{A}_4 P^{-1} - b_4 f_4^* G_4 & P^{-1} \end{bmatrix} > 0 \qquad (57)$$

と等価であることがわかる.
一方f_4^*と$X^*=P$を用いると（38）式の関係から$M^*=f_4^*G_4X^*$を得る.
これらのX^*,M^*は(36)式の LMI を満たす．代入すると，(57)式と同じになり$\Delta V_1>0$を満たすことがわかる．よって(53)式のシステムは安定となる.
次に Step2 で得られたf_3^*を用いてシステム

$$x[k+1]=(A-b_4f_4^*)(A-b_3f_3^*)(A-b_2f_2^0)(A-b_1f_1^0)x[k] \quad (58)$$

が安定かつ(53)式のシステムより収束性能が同等以上であることを示す.
これはゲインf_1^0,f_2^0,f_3^*,f_4^*を用いた時のシステムに対応する．リアプノフ関数の候補は先と共通で$V_2=x^TPx$とする.

$$\Delta V_1>\Delta V_2 \quad (59)$$

であることを示せば十分である．(59)式は

$$x^T\left[\left(\tilde{A}_4-G_4^Tf_4^{*T}b_4^T\right)P\left(\tilde{A}_4-b_4f_4^*G_4\right)-P\right]x\geq x^T\left[\left(\tilde{A}_3^T-G_3^Tf_3^{*T}B_3^T\right)P\left(\tilde{A}_3-B_3f_3^*G_3\right)-P\right] \quad (60)$$

と等価であり.

$$P+Q_3-\left(\tilde{A}_3^T-G_3^Tf_3^{*T}B_3^T\right)P\left(\tilde{A}_3-\tilde{B}_3f_3^*G_3\right)\geq 0 \quad (61)$$

と等価である.
Schur 補題を用いれば(39)式の LMI のf_3をf_3^*に置き換えた式を得る．よってf_3^*を用いれば$\Delta V_1\geq\Delta V_2$が満たされる．よって(58)式のシステムは安定かつ(53)式のシステムより収束性能が同等以上である．同様の証明手順により，Step3 で得られたf_2^*はシステム

$$x[k+1]=(A-b_4f_4^*)(A-b_3f_3^*)(A-b_2f_2^*)(A-b_1f_1^0)x[k] \quad (55)$$

が安定かつ(58)式のシステムより収束性能が同等以上であることが示せる.
また，Step4 で得られたf_1^*はシステム

$$x[k+1]=(A-b_4f_4^*)(A-b_3f_3^*)(A-b_2f_2^*)(A-b_1f_1^*)x[k] \quad (56)$$

が安定かつ(56)式のシステムより収束性能が同等以上であることが示せる.
以上より求める結果に従う.
注意）
Step1 においてf_4^*を計算するためにはG_4^{-1}が存在しなければならない．しかし，G_4はフルランクでない場合が多い．この場合にはG_4^{-1}の代わりに疑似逆行列G_4^+を用いる．理論的な安定性は一般的に失われるが，$f_4^*G_4$がM^*X^{-1}に近い値であれば式(14)を満たす可能性が高いので安定性の保証も期待できる.

初期値としてf_1^0, f_2^0, f_3^0を与えるために最適レギュレータを用いて Fを設計し，

$$Q = diag[10^{10}\ \ 10^{10}\ \ 10^{10}\ 10^0\ 10^0\ 10^0\ 10^0\ 10^0\ 10^0\ 10^0\ 10^0\ 10^0\ 10^0\ 10^0] \qquad (57)$$

$$R = diag[1\ 1\ 1\ 1] \qquad (58)$$

求めた Fを

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \qquad (59)$$

と分解し，$f_1^0 = f_1, f_2^0 = f_2, f_3^0 = f_3$とする．
そして設計したゲインで数値シミュレーションをした結果を図 4.4 に示す．
図を見みると従来の空圧式除振台の応答と同等の制振性能を有していることが確認できる．

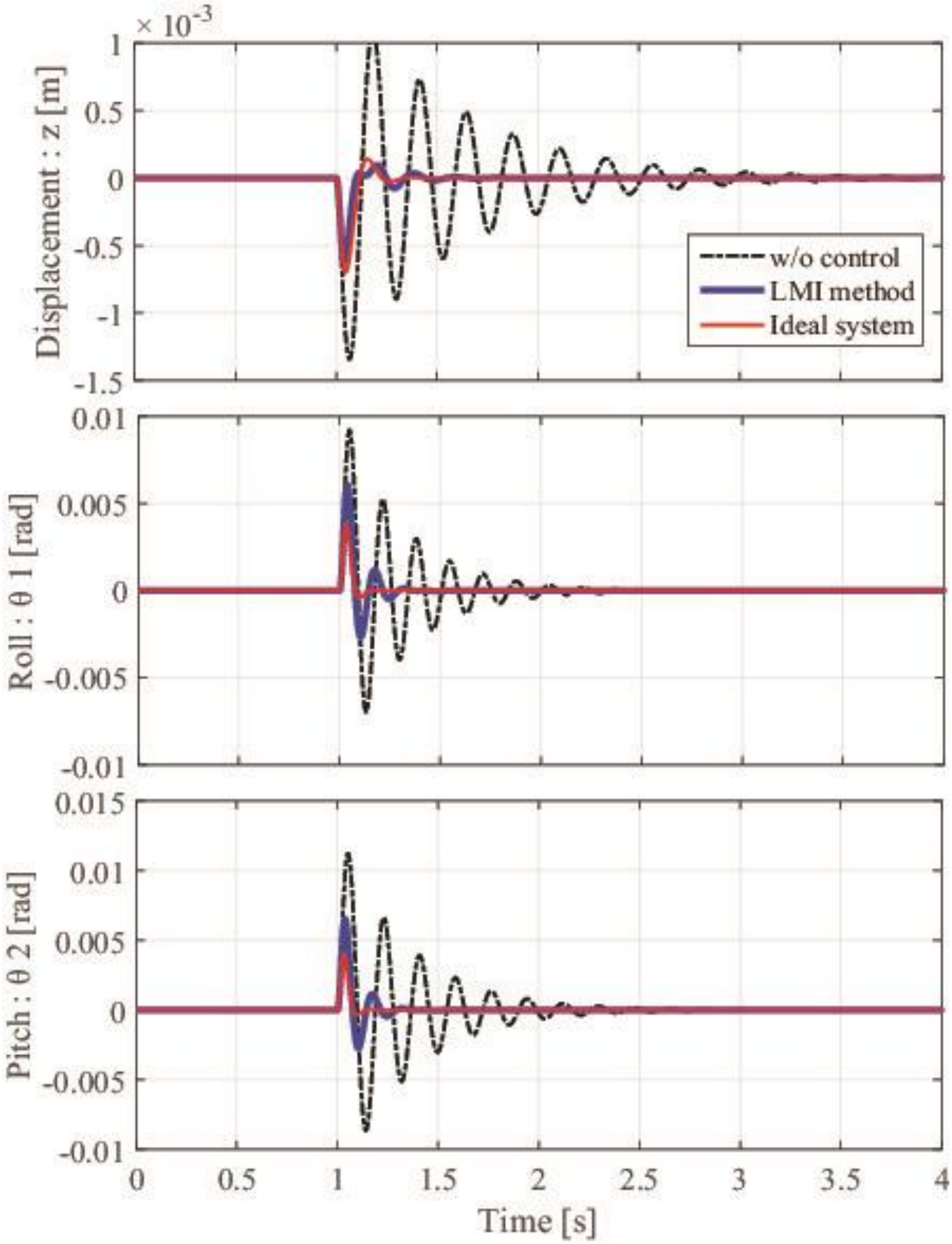

図 4.4 数値シミュレーション

第 5 章　実機実験

5.1　実験準備

5.1.1　変換式の導入

実機に適応させる際に指令入力u(kg/s)は指令電圧y(V)に変換しなければならない．
変換式 K を作成するため，on-off 弁の前段のサーボ弁にかかる電圧とそこで給排気される空気の流量のデータを計測した．

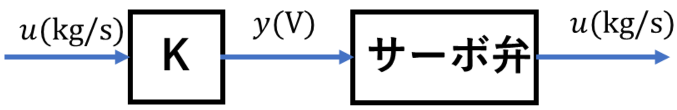

図 5.1 変換式

給気側の計測方法は 0.1 秒間サーボ弁に電圧を加え，そのとき給気される流量を計測する．電圧は 0.1V～1.5V まで調べた．そして流量に対する電圧のグラフに書き替えたものが図 5.2 である．この範囲を計測した理由は 0.1V より低い電圧では給気されず，1.5V より高い電圧では給気される流量が同じであるため計測していない．

排気側の測定方法は最初に 4 つの空気ばねを膨らませ，台を平衡点にする．その後サーボ弁に電圧をかけ，0.5 秒間排気を行う．流量はサーボ弁の排気口近くに取り付けられている流量計で計測し記録した．給気側と同様に書き換えたグラフが図 5.3 である．電圧は－2V～-0.1V の範囲を 0.1V ずつ調べた．この範囲を測定した理由は給気側と同様の理由である．

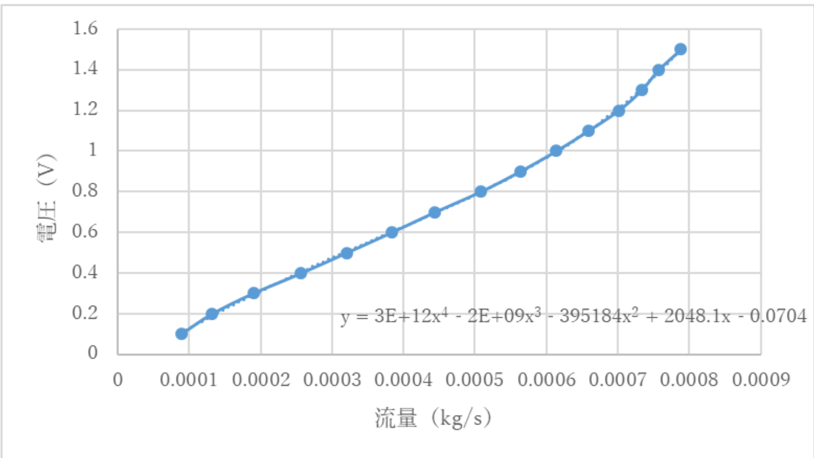

図 5.2 給気のグラフ．

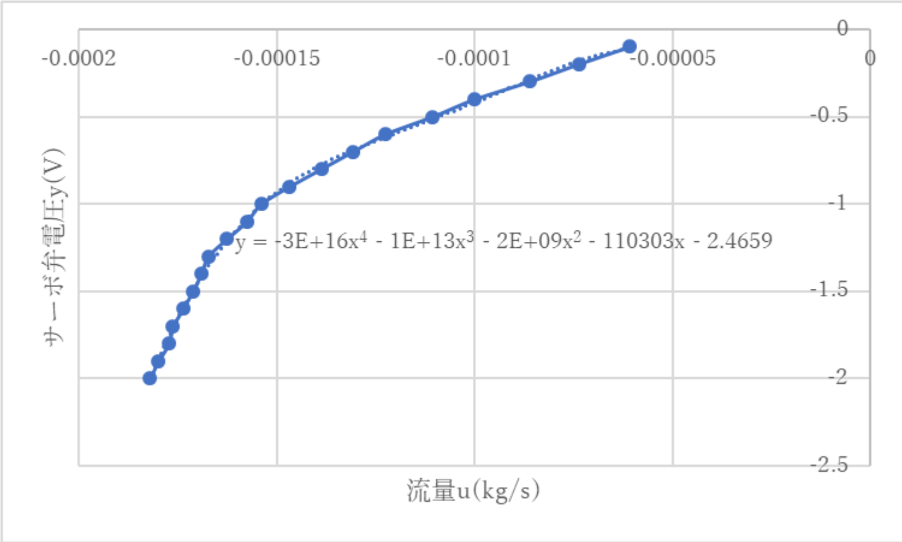

図 5.3 排気のグラフ

給気，排気時の電圧(y)と流量(u)についての関係を多項式近似した結果

給気 $$y = 3 \times 10^{12}u^4 - 2 \times 10^9 u^3 - 395184u^2 + 2048.1u - 0.0704 \qquad (60)$$

排気 $$y = -3 \times 10^{16}u^4 - 10^{13}u^3 - 2 \times 10^9 u^2 - 110303u - 2.4659 \qquad (61)$$

となった．

5.1.2 圧力の制御へ切り替え

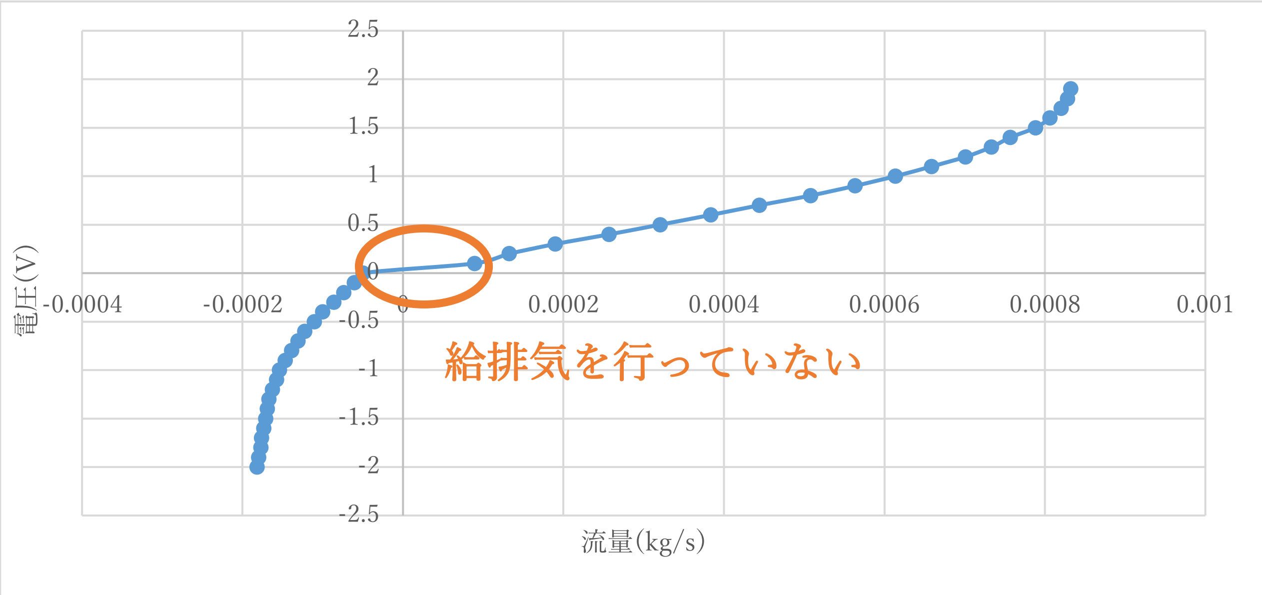

図 5.4 給気と排気のグラフを連結

図 5.4 を見みると電圧が-0.1V から 0.1V の間ではサーボ弁は閉じ給排気を行わないことがわかる．そのため微小な流量を操作することができずオフセットが残ってしまうという問題が存在する．

そこで流量がこの間に示すとき，4 つの弁を開け，平衡点圧力と空気ばね＃1 の偏差を電圧に変換しサーボ弁に印加しオフセットを除去する．空気ばね＃1 の圧力を使用するのは情報を取得できる圧力センサが空気ばね＃1 に隣接したもの 1 個のみのためである．しかし，圧力による制御を行っている場合は 4 つの on-off 弁が開いている空気管内の圧力が全て同じであり，問題ないといえる．

圧力センサはこれによりサーボ弁が不感帯に入ったときに使用するのが式(60)である．

$$y = 1000 \times \left(0.040 - \frac{p}{10^6}\right) \qquad (62)$$

y：サーボ弁電圧[V]

p：圧力[Pa]

図では通常のフィードバック制御のブロック線図(図 5.5)を示す．F は設計したフィードバックゲインである．図 5.6 ではサーボ弁の不感帯に入った時の処理をブロック線図で示す．K は空気ばね＃1 の圧力の情報を取得するために入っている．

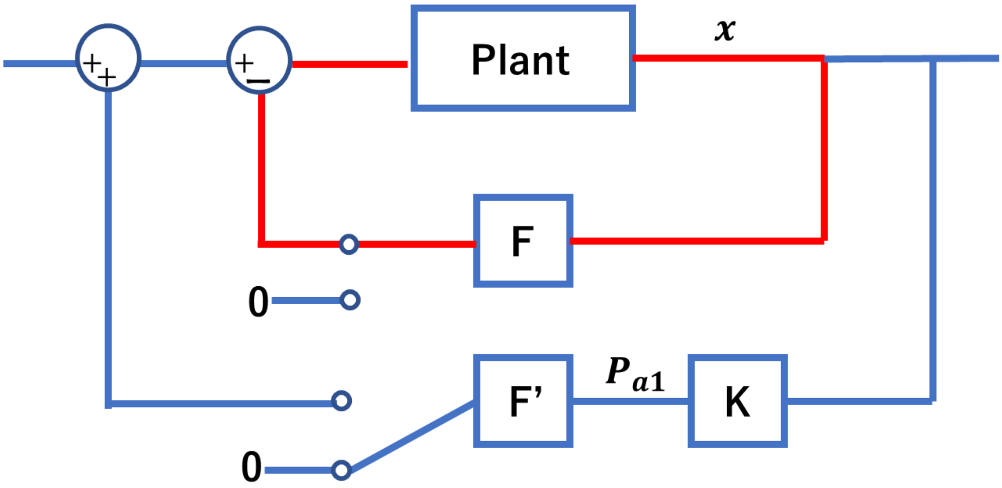

図 5.5 通常の処理

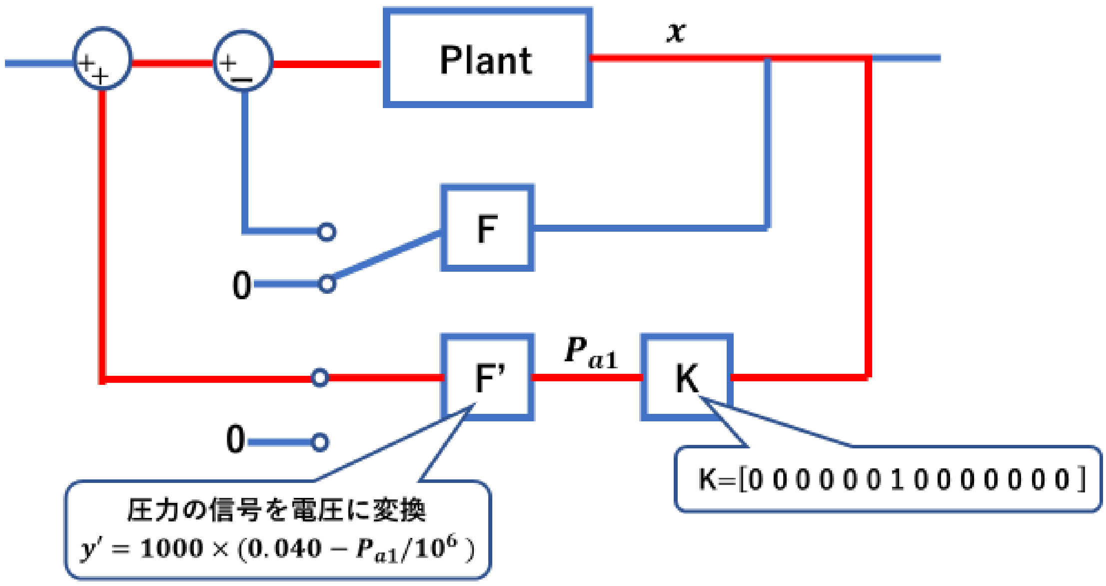

図 5.6 圧力制御に切り替えた時の処理

5.1.3 平衡点圧力の調査

サーボ弁は給気時より排気時の方が能力が低いことが実験の中で判明した．そのため，可能な限り排気の能力を上げるために平衡点時の圧力をレギュレータからの供給圧力と近い値にした．
図は台にインパルス外乱を加え，振動抑制した時の図である．入力を決めるフィードバックゲインは最適レギュレータによって設計した．この実験では後に触れる圧力の切り替え制御を行っていない．レギュレータから供給される圧力は 0.040MPa である．
図を見ると，どの色の線もオフセットが残っている．これはサーボ弁による排気が不十分であるために起きている現象である．各線は平衡点の圧力である．
線を比較すると，平衡点時の圧力をレギュレータからの供給圧力に近づけるほどオフセットが小さくなっていることが分かる．平衡点圧力をレギュレータから供給される圧力に近づけると排気の能力が上がる．この結果を得て，平衡点圧力は 0.040MPa に設定した．

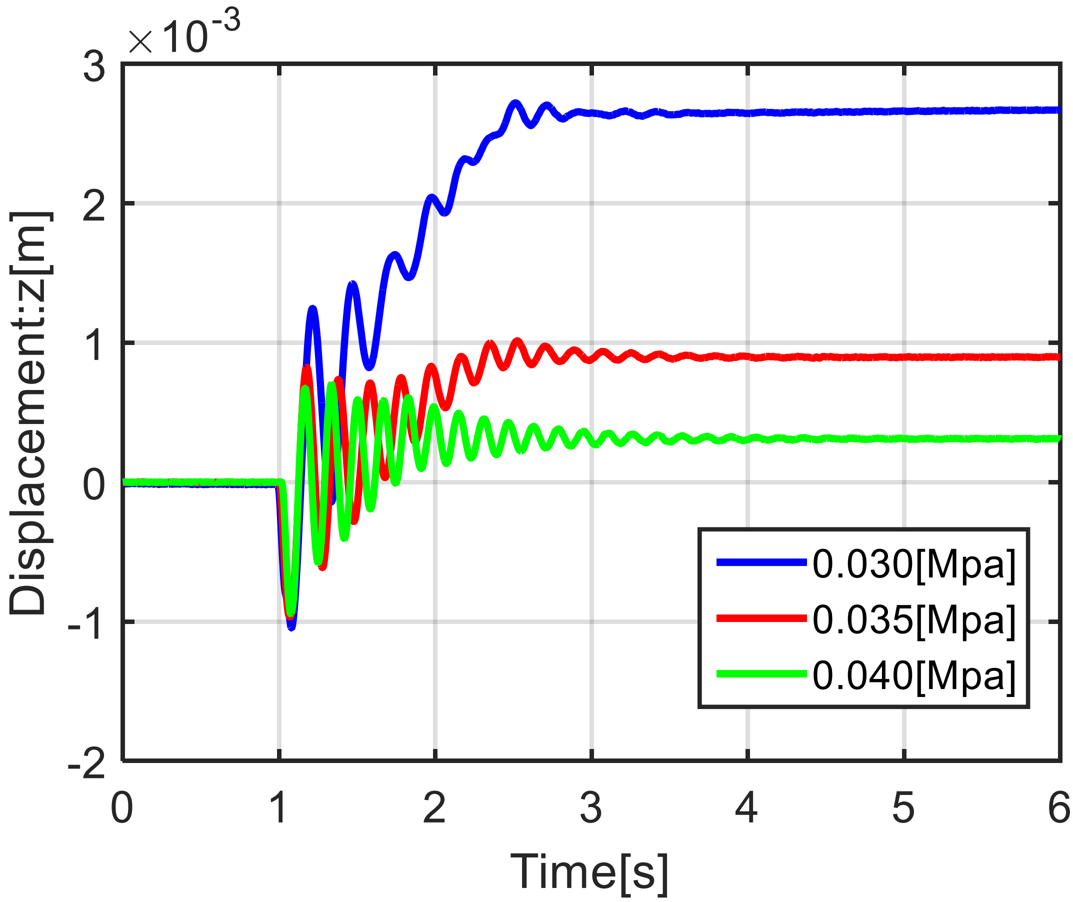

図 5.7 各平衡点圧力におけるオフセット

5.2　実験方法

実験では台にインパルス外乱を加えてその応答で制振性能を評価する．インパルス外乱は台の左手前から高さ 28cm のところから重さ 300g の野球ボールを落とすことで作られる（図 5.7）．このとき台は鉛直方向に 1 ｍｍ変位する．

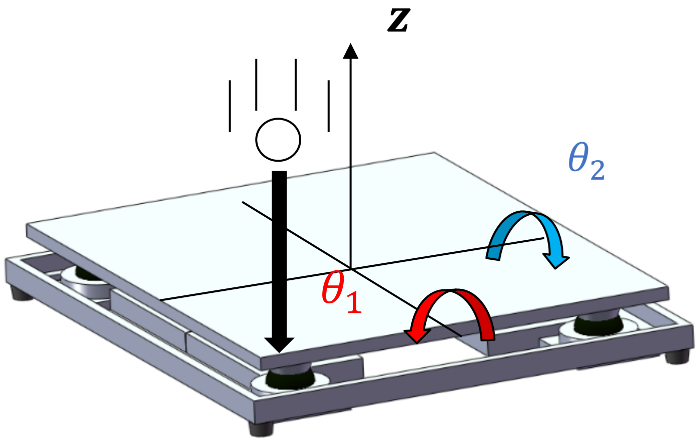

図 5.7 台にボールを落とした時のイメージ図

5.3　実験結果

最適レギュレータの実験結果が以下である

重み行列は

$$Q = diag[10^{12}\ \ 10^{8}\ \ 10^{12}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}\ 10^{0}] \qquad (63)$$

$$R = diag[1\ 1\ 1\ 1] \qquad (64)$$

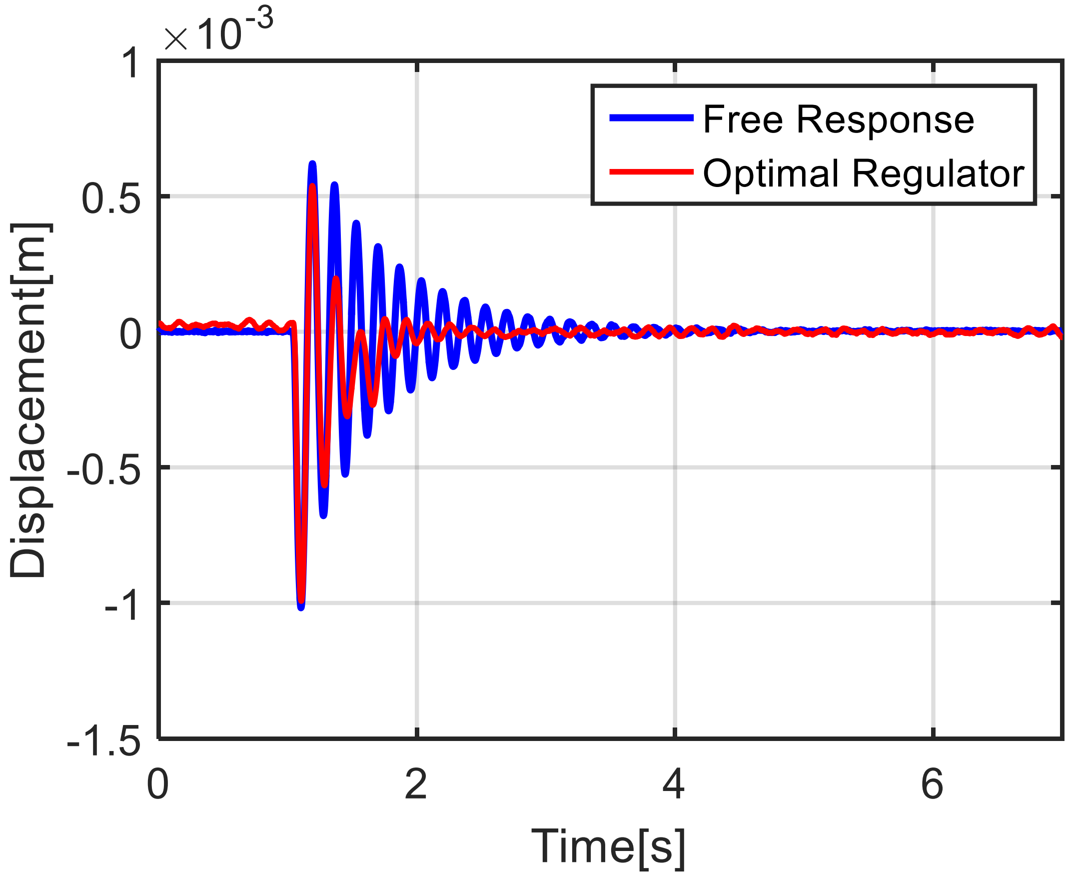

図 5.8 鉛直方向の変位

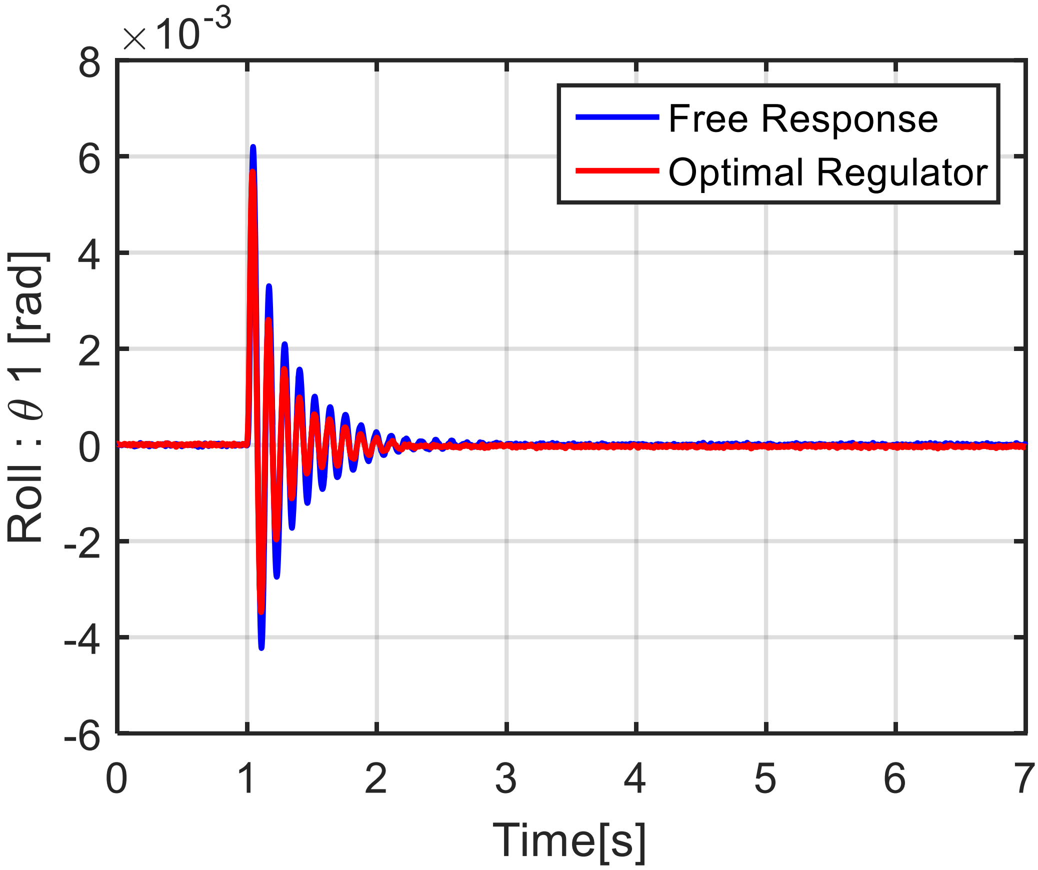

図 5.9 ロール回転方向の角度

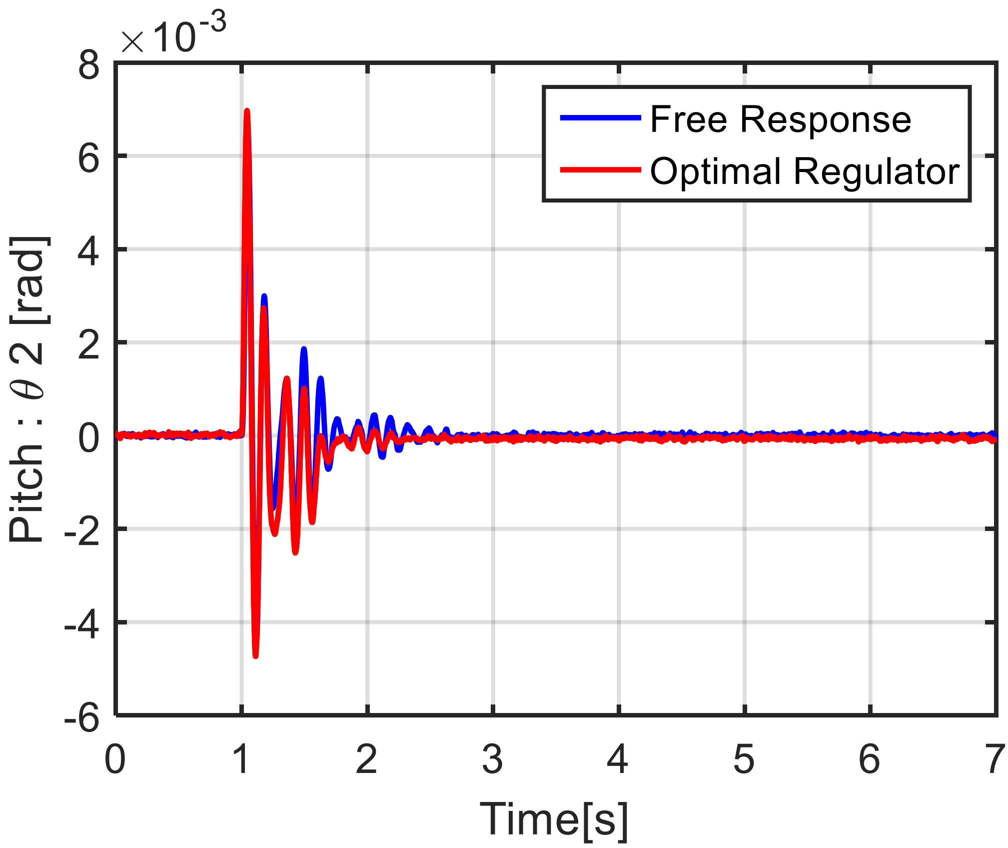

図 5.10 ピッチ回転方向の角度

鉛直方向の変位が$\pm 2.0\times 10^{-5}$mに収まった時，振動が収束したと判断する．
図 5.8 では振動が発生してから，1.5s で収束している．自由応答に比べて短い時間で制振できている．さらに振動を抑制した後は圧力による制御を行うことでオフセットの除去に成功している．図 5.9，図 5.10 では収束していることから，台は水平に近い状態に戻っていることがわかる．しかし，切り替え時の安定性について保障できていない．今回は試験的に実機に適応した結果，問題はなかった．理論的な安定性の保証は今後の課題である．
さらに実機の結果を図 5.11 のシミュレーションを比較する．

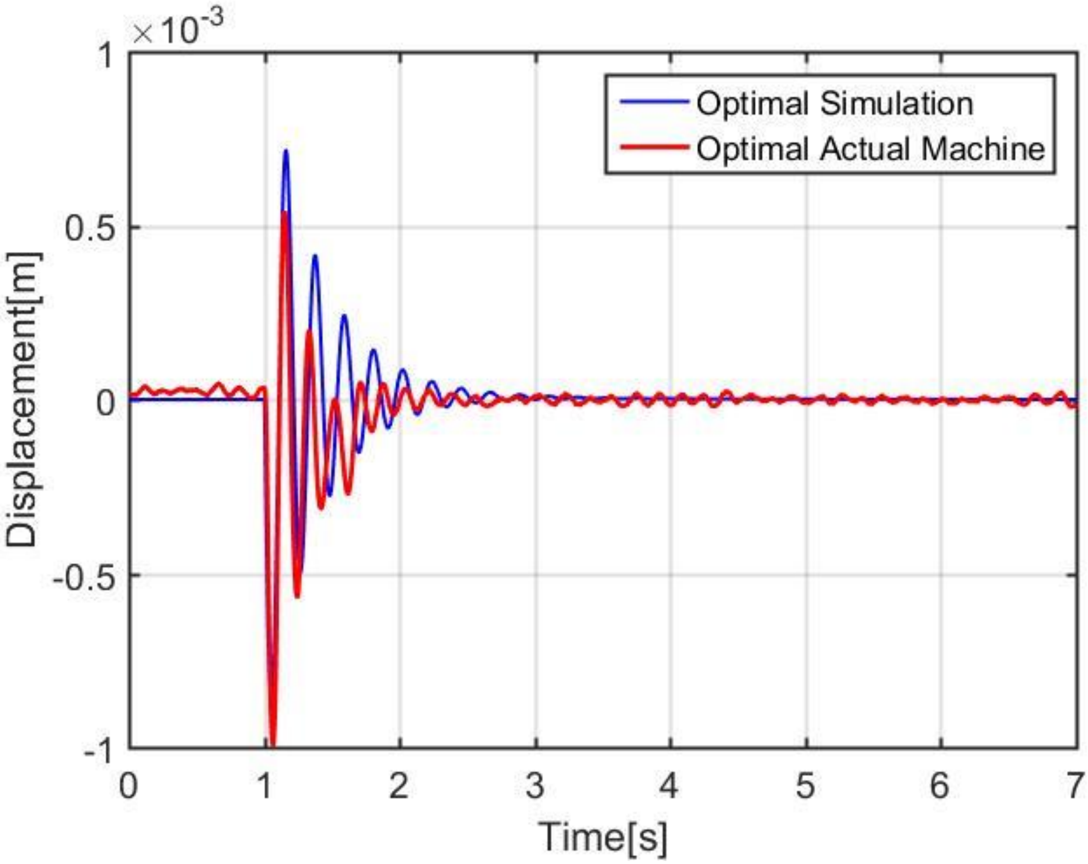

図 5.11 シミュレーションと実機実験の比較（鉛直方向）

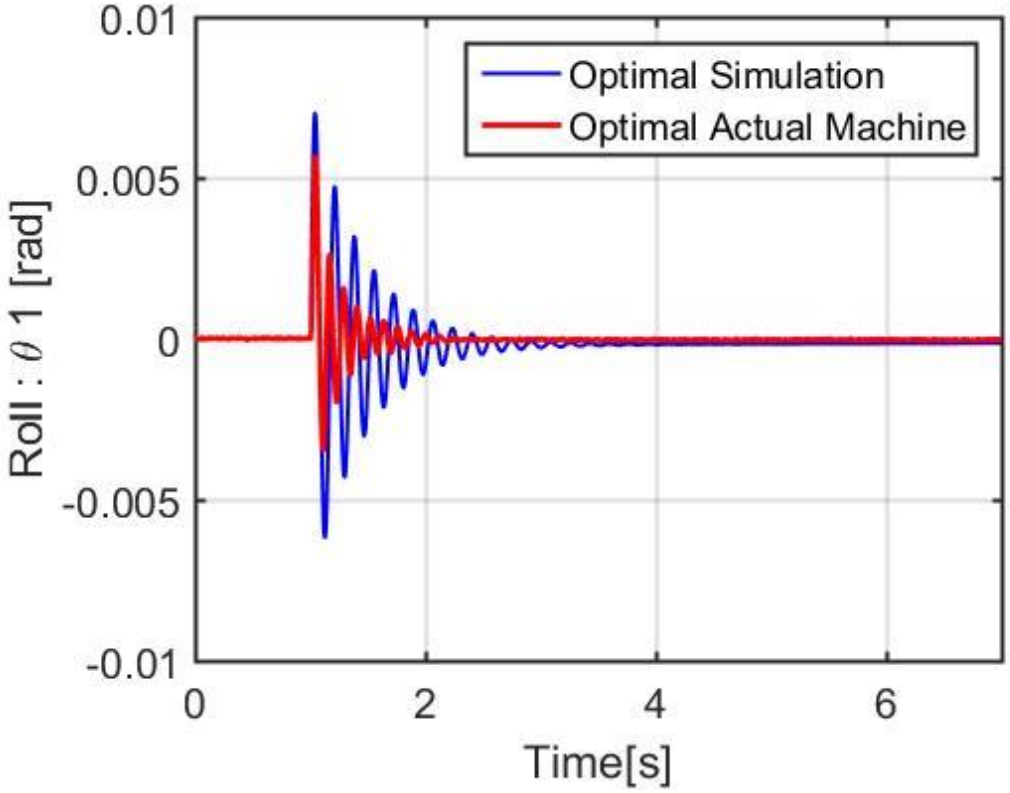

図 5.12 シミュレーションと実機実験の比較（ロール回転方向）

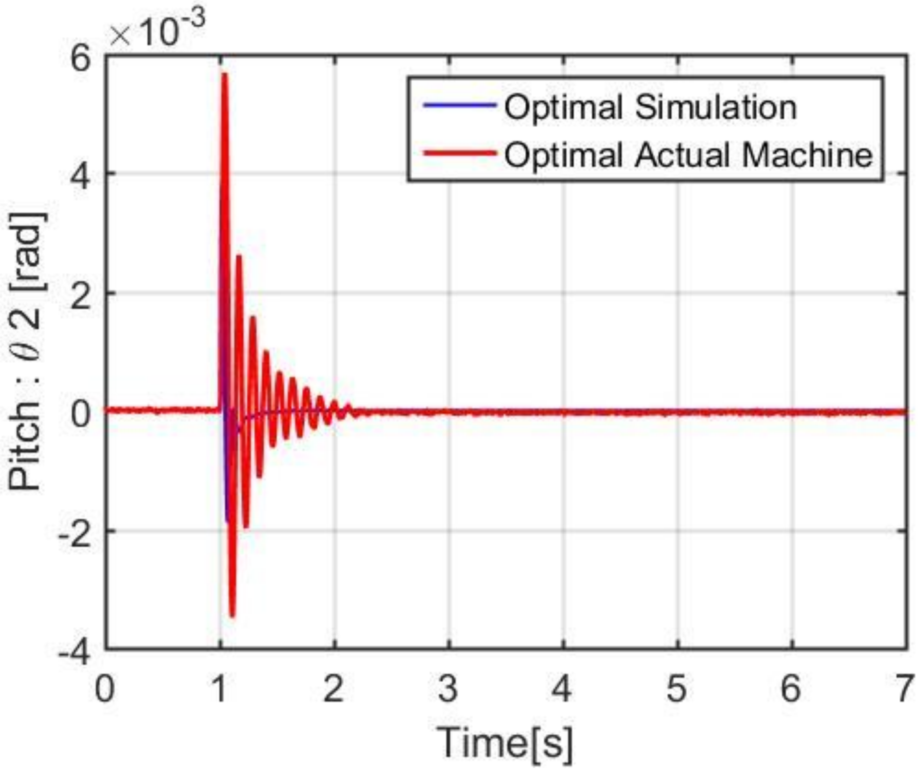

図 5.13 シミュレーションと実機実験の比較（ピッチ回転方向）

図 5.11 を見ると概ねシミュレーションと同じ動きをしていることがわかる．実機の方が振動が収束するまでの時間が短いのは，圧力制御の切り替えを行っているためと考えられる．今回シミュレーションでは圧力制御への切り替えを含めていないため，今後の課題として圧力制御を加味したシミュレーションを行う必要がある．
図 5.12，図 5.13 を見るとシミュレーションと異なる収束の仕方をしている．これは圧力制御の影響なのか，モデルの誤差による影響で早く収束しているのか，現時点では判断できないので調査が必要である．

第６章　結論

本研究ではアクチュエータの数を減らすことで，従来の空圧式除振台に比べて安価かつ同等の性能を持つ装置の開発を行った．アクチュエータの数が少ないという制約があるため，巡回制御入力を前提としてフィードバックゲインの２つ決定した．
最適レギュレータでは実機に適応させるために保守性の高いゲインを使用し，数値シミュレーションよって収束することを確認した．さらに実機実験に移る際，適応させるための除振台のハード面の改良を行った．流量をサーボ弁の指令電圧に変換する式を導入することで適切に変換することが可能になった．入力が微小な場合には圧力による制御に切り替えることで，オフセットを除去することに成功した．さらに平衡点圧力をレギュレータからの供給圧力に近づけることにより可能な限りサーボ弁の排気の能力を上げることが可能になった．
さらなる改良次第では，より制振性能の良いゲインでも実機に適応できる可能性がある．
しかし圧力による制御は実機に試験的に導入したものであるため，切り替える際に安定性についての保証ができていない．これは今後の課題として解決していく必要がある．
ＬＭＩは最適レギュレータではできなかった，ゲインを設計する段階で安定性を保証することができる．そして従来の空圧式除振台に比べて同等の制振性能を有するゲインを設計し，数値シミュレーションにより性能を確認した．
最適レギュレータで設計した保守性の高いゲインでは実機に適応させることができたが，ＬＭＩで設計したものはハイゲインであり適応させることができなかった．
そのため実機において LMI で設計されたゲインを使用するには空圧回路の改良など，ハード面の工夫が必要であり今後の課題である．

参考文献

[1]川島健嗣，加藤友規，金恩敬，新井豪，只野耕太郎，香川利春，「圧力微分計を用いた空気ばね式除振台の外乱補償制御」　日本機械学会論文集 C 編,Vol.76,No.764, pp.861-868 ,2010.

[2]涌井伸二，渡辺智仁，高橋正人「空圧式除振装置に使用するノズルフラッパー形サーボバルブの振動抑制」日本機械学会論文集　C 編, Vol.75,No.751,pp.591-599,2009.

[3]KEYENCE CMOS　レーザアナログセンサ　IA シリーズ取扱説明書

[4]KEYENCE 流量知識.com
https://www.keyence.co.jp/ss/products/process/flowmeter/technique/pressureloss.jsp

[5]株式会社小西エアーサービス エアー配管の圧力損失計算
http://www.konishi-as.co.jp/topix/yomimono/sonshitsu.html

[6] 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」p13-p14,30-p41,2013.

[7]川田昌克「MATLAB/Simulink による現代制御入門」p155

[8]川田昌克「MATLAB/Simulink による現代制御入門」p182

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導を頂いた章ふぇいふぇい教授，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心より厚く御礼を申し上げます．

付録

$$
\mathrm{A_c} = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} & 0 & a_{49} & 0 & a_{4,11} & 0 & a_{4,13} & 0 \\
a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} & 0 & a_{59} & 0 & a_{5,11} & 0 & a_{5,13} & 0 \\
a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} & 0 & a_{69} & 0 & a_{6,11} & 0 & a_{6,13} & 0 \\
0 & 0 & 0 & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} & a_{78} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{87} & a_{88} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & a_{94} & a_{95} & a_{96} & 0 & 0 & a_{99} & a_{9,10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{10,9} & a_{10,10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & a_{11,4} & a_{11,5} & a_{11,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{11,11} & a_{11,12} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{12,11} & a_{12,12} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & a_{13,4} & a_{13,5} & a_{13,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{13,13} & a_{13,14} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{14,13} & a_{14,14}
\end{bmatrix}
$$

$$
\mathrm{B_c} = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
b_{71} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & b_{92} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & b_{11,3} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & b_{13,4} \\
0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
$$

$$a_{41} = \frac{-k_1 - k_2 - k_3 - k_4}{M},\quad a_{42} = \frac{k_1 l_1 - k_2 l_2 + k_3 l_1 - k_4 l_2}{M}$$

$$a_{43} = \frac{k_1 l_3 + k_2 l_3 - k_3 l_4 - k_4 l_4}{M},\quad a_{44} = \frac{-c_1 - c_2 - c_3 - c_4}{M}$$

$$a_{45} = \frac{c_1 l_1 - c_2 l_2 + c_3 l_1 - c_4 l_2}{M},\quad a_{46} = \frac{(c_1 l_3 + c_2 l_3 - c_3 l_4 - c_4 l_4)}{M}$$

$$a_{47} = \frac{S_1}{M},\quad a_{49} = \frac{S_2}{M},\quad a_{4,11} = \frac{S_3}{M},\quad a_{4,13} = \frac{S_4}{M}$$

$$a_{51} = \frac{l_1 k_1 + l_1 k_3 - l_2 k_2 - l_2 k_4}{J_1},\quad a_{52} = \frac{-l_1^2 k_1 - l_1^2 k_3 - l_2^2 k_2 - l_2^2 k_4}{J_1}$$

$$a_{53} = \frac{-l_1 l_3 k_1 + l_1 l_4 k_3 + l_2 l_3 k_2 - l_2 l_4 k_4}{J_1},\quad a_{54} = \frac{l_1 c_1 + l_1 c_3 - l_2 c_2 - l_2 c_4}{J_1}$$

$$a_{55} = \frac{-l_1^2 c_1 - l_1^2 c_3 - l_2^2 c_2 - l_2^2 c_4}{J_1},\quad a_{56} = \frac{-l_1 l_3 c_1 + l_1 l_4 c_3 + l_2 l_3 c_2 - l_2 l_4 c_4}{J_1}$$

$$a_{57} = \frac{-l_1 S_1}{J_1}, \quad a_{59} = \frac{l_2 S_2}{J_1}, \quad a_{5,11} = \frac{-l_1 S_3}{J_1}, \quad a_{5,13} = \frac{l_2 S_4}{J_1}$$

$$a_{61} = \frac{l_3 k_1 + l_3 k_2 - l_4 k_3 - l_4 k_4}{J_2}, \quad a_{62} = \frac{-l_3 l_1 k_1 + l_3 l_2 k_2 + l_4 l_1 k_3 - l_4 l_2 k_4}{J_2}$$

$$a_{63} = \frac{-l_3^2 k_1 - l_3^2 k_2 - l_4^2 k_3 - l_4^2 k_4}{J_2}, \quad a_{64} = \frac{l_3 c_1 + l_3 c_2 - l_4 c_3 - l_4 c_4}{J_2}$$

$$a_{65} = \frac{(-l_3 l_1 c_1 + l_3 l_2 c_2 + l_4 l_1 c_3 - l_4 l_2 c_4)}{J_2}, \quad a_{66} = \frac{-l_3^2 c_1 - l_3^2 c_2 - l_4^2 c_3 - l_4^2 c_4}{J_2}$$

$$a_{67} = -\frac{l_3 S_1}{J_2}, \quad a_{69} = -\frac{l_3 S_2}{J_2}, \quad a_{6,11} = \frac{l_4 S_3}{J_2}, \quad a_{6,13} = \frac{l_4 S_4}{J_2}$$

$$a_{74} = \frac{-\kappa p_{01} h_1}{z_{a1}}, \qquad a_{75} = \frac{\kappa p_{01} l_1 h_1}{z_{a1}}, \qquad a_{76} = \frac{\kappa p_{01} l_3 h_1}{z_{a1}}, \qquad a_{77} = \frac{-\kappa R_s T_1 \mu_1}{z_{a1} S_1}$$

$$a_{78} = -a_{77}, \qquad a_{87} = \frac{\kappa R_s T_1 \mu_1}{z_{b1} S_1}, \qquad a_{88} = -a_{87}, \qquad a_{94} = \frac{-\kappa p_{02} h_2}{z_{a2}}$$

$$a_{99} = \frac{-\kappa R_s T_2 \mu_2}{z_{a2} S_2}, \qquad a_{9,10} = -a_{99}, \qquad a_{10,9} = \frac{\kappa R_s T_2 \mu_2}{z_{b2} S_2}, \qquad a_{10,10} = -a_{10,9}$$

$$a_{11,4} = \frac{-\kappa p_{03} h_3}{z_{a3}}, \qquad a_{11,5} = \frac{\kappa p_{03} l_1 h_3}{z_{a3}}, \qquad a_{11,6} = \frac{-\kappa p_{03} l_4 h_3}{z_{a3}}, \qquad a_{11,11} = \frac{-\kappa R_s T_1 \mu_3}{z_{a3} S_3}$$

$$a_{11,12} = -a_{11,11}, \qquad a_{12,11} = \frac{\kappa R_s T_3 \mu_3}{z_{b3} S_3}, \qquad a_{12,12} = -a_{12,11}, \qquad a_{13,4} = \frac{-\kappa p_{04} h_4}{z_{a4}}$$

$$a_{13,5} = \frac{-\kappa p_{04} l_2 h_4}{z_{a4}}, \qquad a_{13,6} = \frac{-\kappa p_{04} l_4 h_4}{z_{a4}}, \qquad a_{13,13} = \frac{-\kappa R_s T_4 \mu_4}{z_{a4} S_4}, \qquad a_{13,14} = -a_{13,13}$$

$$a_{14,13} = \frac{\kappa R_s T_4 \mu_4}{z_{b4} S_4}, \qquad a_{14,14} = -a_{14,13}, \qquad b_{71} = \frac{\kappa R_s T_1}{z_{a1} S_1}, \qquad b_{92} = \frac{\kappa R_s T_2}{z_{a2} S_2}$$

$$b_{71} = \frac{\kappa R_s T_1}{z_{a1} S_1}, \quad b_{92} = \frac{\kappa R_s T_2}{z_{a2} S_2}, \qquad b_{11,3} = \frac{\kappa R_s T_3}{z_{a3} S_3}, \qquad b_{13,4} = \frac{\kappa R_s T_4}{z_{a4} S_4}$$

Table1 Plant parameter values of system

Displacement of isolation table	z	[m]
Roll angle of isolation table	θ_1	[rad]
Pitch angle of isolation table	θ_2	[rad]
#1 air spring pressure deviation	p_{a1}	[Pa]
#1 buffer tank pressure deviation	p_{b1}	[Pa]
#2 air spring pressure deviation	p_{a2}	[Pa]
#2 buffer tank pressure deviation	p_{b2}	[Pa]
#3 air spring pressure deviation	p_{a3}	[Pa]
#3 buffer tank pressure deviation	p_{b3}	[Pa]
#4 air spring pressure deviation	p_{a4}	[Pa]
#4 buffer tank pressure deviation	p_{b4}	[Pa]
#1 control input (mass flow rate)	u_1	[kg/s]
#2 control input (mass flow rate)	u_2	[kg/s]
#3 control input (mass flow rate)	u_3	[kg/s]
#4 control input (mass flow rate)	u_4	[kg/s]
#1 primary pressure	p_{a01}	0.040[MPa]
#2 primary pressure	p_{a02}	0.040[MPa]
#3 primary pressure	p_{a03}	0.040[MPa]
#4 primary pressure	p_{a04}	0.040[MPa]
Mass of table	M	13.6[kg]
Roll direction Inertia of table	J_1	2.63×10^{-1}[kg · m^2]
Pitch direction Inertia of table	J_2	1.81×10^{-1}[kg · m^2]
Distance	l_1	1.94×10^{-1}[m]
Distance	l_2	1.94×10^{-1}[m]
Distance	l_3	1.50×10^{-1}[m]
Distance	l_4	1.50×10^{-1}[m]
Distance	l_b	1.33×10^{-1}[m]
#1 spring constant	k_1	2.34×10^{3}[N/m]
#2 spring constant	k_2	2.34×10^{3}[N/m]
#3 spring constant	k_3	2.34×10^{3}[N/m]
#4 spring constant	k_4	2.34×10^{3}[N/m]
#1 damping coefficient	c_1	6.39[Ns/m]
#2 damping coefficient	c_2	6.39[Ns/m]
#3 damping coefficient	c_3	6.39[Ns/m]
#4 damping coefficient	c_4	6.39[Ns/m]
#1 contact area of air spring	S_1	7.04×10^{-4}[m^2]

#2 contact area of air spring	S_2	$7.04 \times 10^{-4}[\mathrm{m}^2]$
#3 contact area of air spring	S_3	$7.04 \times 10^{-4}[\mathrm{m}^2]$
#4 contact area of air spring	S_4	$7.04 \times 10^{-4}[\mathrm{m}^2]$
Gas constant	R_s	$287[\mathrm{J}/(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K})]$
Ratio of specific heat	κ	$1.4[-]$
Gas temperature in #1 spring	T_1	$293[\mathrm{K}]$
Gas temperature in #2 spring	T_2	$293[\mathrm{K}]$
Gas temperature in #3 spring	T_3	$293[\mathrm{K}]$
Gas temperature in #4 spring	T_4	$293[\mathrm{K}]$
#1 valve coefficient	μ_1	$5.86 \times 10^{-8}[\mathrm{kg}/(\mathrm{s} \cdot \mathrm{Pa})]$
#2 valve coefficient	μ_2	$5.86 \times 10^{-8}[\mathrm{kg}/(\mathrm{s} \cdot \mathrm{Pa})]$
#3 valve coefficient	μ_3	$5.86 \times 10^{-8}[\mathrm{kg}/(\mathrm{s} \cdot \mathrm{Pa})]$
#4 valve coefficient	μ_4	$5.86 \times 10^{-8}[\mathrm{kg}/(\mathrm{s} \cdot \mathrm{Pa})]$
#1 equiv. air spring height	z_{a1}	$0.050[\mathrm{m}]$
#1 equiv. buffer tank height	z_{b1}	$0.365[\mathrm{m}]$
#2 equiv. air spring height	z_{a2}	$0.050[\mathrm{m}]$
#2 equiv. buffer tank height	z_{b2}	$0.365[\mathrm{m}]$
#3 equiv. air spring height	z_{a3}	$0.050[\mathrm{m}]$
#3 equiv. buffer tank height	z_{b3}	$0.365[\mathrm{m}]$
#4 equiv. air spring height	z_{a4}	$0.050[\mathrm{m}]$
#4 equiv. buffer tank height	z_{b4}	$0.365[\mathrm{m}]$
#1 volume conversion coefficient	h_1	$2[-]$
#2 volume conversion coefficient	h_2	$2[-]$
#3 volume conversion coefficient	h_3	$2[-]$
#4 volume conversion coefficient	h_4	$2[-]$