

# センサレスセミアクティブダンパの研究 (加速度成分で切り替わる場合)

4年7組2番 秋山 竣将

明治大学 理工学部 機械情報工学科 機械力学研究室

指導教員 松岡 太一

## 1. はじめに

セミアクティブダンパはセンサやコンピュータを用いて、粘性減衰係数などの受動要素を制御することでパッシブダンパよりも高い制振効果が得られる。しかし、外部電源を必要とするため停電時には制御が行えず不安定になるという問題がある。電磁抵抗型のダンパは振動エネルギーを電気エネルギーに変換し負荷抵抗で電氣的にエネルギーを消散することで減衰力が得られる。負荷抵抗の大きさを、コンピュータを用いて制御することで非制御時に比べ、高い制振効果を示した<sup>1)</sup>。これまでに、発電機端子間に、負荷抵抗、整流器、リレー、キャパシタを組み合わせた電気回路を繋げることで、ある速度以上になると発電機からの電圧が上昇し、リレーが閉になって減衰力が自動的に最大値へと切り替わる減衰力切替型のセミアクティブダンパが開発された<sup>2)</sup>。そこで本研究では、速度成分と加速度成分の2点を含んだしきい値で自動的に減衰力が切り替わることを目的とし、電磁抵抗型ダンパの電気回路を改良した。提案手法を確かめるために抵抗力特性の理論と実験によって確かめた。

## 2. 原理と理論式

### 2.1 ダンパの構造と原理

研究で使用するダンパの概要図を図1に示す。本装置はボールねじ、ベアリング、DCモータによって構成されており、ボールねじとモータの回転軸はつながっている。ピストンとシリンダ間に与えられた並進運動を、ボールねじ機構を介して回転運動に変換し、モータ回転軸を回転させることで発電を行う。そしてモータ端子間に電流が流れ、モータ回転軸にトルクが生じ、減衰力が得られる。また、ピストンの運動方向は正負を交互に繰り返すので、モータの誘導起電力も正負交番になりモータは交流電源のようなふるまいをする。モータ端子間には、ソリッドステートリレーが取り付けられており、リレーの入力端子には極性があるため、モータ端子からダイオードによる全波整流回路を介してリレーの入力端子につないである。モータの誘導起電力が大きくなり、リレーの入力端子間にかかる電圧がリレーの動作電圧を上回るとリレーの出力端子間は短絡となる。そしてモータ端子とリレーの出力端子をつないだ負荷回路の抵抗に電流が流れることで、自動的に減衰力が切り替わる仕組みである。

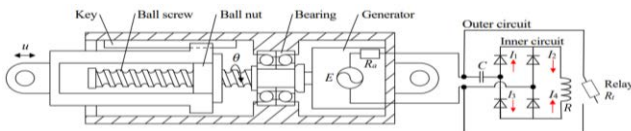


Fig. 1 Concept of the damper

先行研究<sup>2)</sup>の速度のみによる切替から、速度成分と加速度成分を含む切替をするために、リレーの入力端子間の電圧の位相を進める必要があると考えた。よって本研究では、リレーに対しキャパシタを直列接続させたRC直列回路を使用した。キルヒホッフの法則より、回路全体に流れる電流 $I$ 、リレーの入力端子間 $V_R$ を求めると式(1)(2)になり、その際の位相差 $\phi$ は式(3)のようになる。

$$I = \frac{E}{\sqrt{(R_a + R)^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \angle \phi \quad (1)$$

$$V_R = \frac{R}{\sqrt{(R_a + R)^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \left(\frac{2\pi}{L}\right) K_E \left\{ \dot{u} \cos \phi + \ddot{u} \frac{\sin \phi}{\omega} \right\} \quad (2)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{1}{(R_a + R)\omega C} \quad (3)$$

ここで、電源電圧を $E$ とし、リレーの入力端子間の電気抵抗を $R$ 、モータの内部抵抗を $R_a$ 、キャパシタを $C$ 、振動数を $\omega$ 、ボールねじのリード長さを $L$ 、モータの起電力定数を $K_E$ 、ピストンの速度 $\dot{u}$ と加速度 $\ddot{u}$ とする。式(2)のリレーの入力端子間抵抗にかかる電圧には、中括弧部分の割合で速度、加速度が含まれていると考えられる。式の中でキャパシタの電気容量 $C$ は、可変であり、それを調節することによって式(3)の位相角が変わり、加速度に比例する項に重みをつけることができる。しかし、加速度成分の割合が大きくなるために、キャパシタの静電容量 $C$ をより小さくすると、リレーの入力端子間電圧 $V_R$ も小さくなる。そして、リレーの入力端子間電圧 $V_R$ が動作電圧より低くなってしまうと、抵抗力の切替が行われなくなる。

### 2.2 減衰力切替条件式

リレーの入力端子間電圧 $V_R$ がリレーの動作電圧に達すると、リレーの負荷側の端子が閉、すなわち外周回路が短絡する。その際の減衰力の切替条件式を算出する。リレーの入力端子間電圧がリレーの動作電圧を上回るのので、式(4)のように考えられる。式(2)を絶対値にして減衰力切替条件式として整理すると式(5)が得られる。ここでリレーの動作電圧を $E_{on}$ とする。

$$V_R \geq E_{on} \quad (4)$$

$$\left| \dot{u}(R_a + R_s)\omega C + \frac{1}{\omega} \ddot{u} \right| \geq \left(\frac{L}{2\pi}\right) \frac{(R_a + R_s)^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}{K_E R_s} E_{on} \quad (5)$$

式(5)から、ダンパのピストンの速度 $\dot{u}$ と加速度 $\ddot{u}$ に依存して、リレーが動作し、減衰力の切替が行われることが分かる。

### 2.3 抵抗力特性の理論式

リレーの動作電圧を上回り、外周回路のスイッチが閉になり発電機端子間が短絡するときの回路全体のインピーダンスは式(6)のようになる。

$$Z = \frac{(R_t + jRR_t\omega C)(1 - j(R_t + R)\omega C)}{1 + (R_t + R)^2(\omega C)^2} + R_a \quad (6)$$

さらに、式(6)から発電機端子間の電流 $I_{on}$ を式(7)のように考えられる。

$$I_{on} = \frac{E}{Z} \quad (7)$$

既報<sup>2)</sup>の式より、抵抗力の理論式は式(8)のようになる。

$$F = \frac{1}{\eta} \left( \frac{2\pi}{L} \right) K_T I_{on} \quad (8)$$

ここで、負荷回路の電気抵抗 $R_t$ 、回転効率を $\eta$ 、発電機のトルク定数を $K_T$ とし、 $j$ は虚数単位を表す。

## 3. 抵抗力特性実験

### 3.1 抵抗力特性

振幅 50 mm、振動数 0.1~0.4 Hz で加振した時の抵抗力と変位の実験結果と、式(8)の理論式を用いて計算した抵抗力特性図を図2に示す。本装置で使用しているリレーの動作電圧はおよそ 1.72 V である。リレーのみを接続した場合を(a)、静電容量 6600  $\mu$ Fのキャパシタを接続した場合を(b)に示す。赤色の線で示される 0.15 Hz において、(a)では、およそ 26 mm 付近で立ち上がり確認できるのに対し、(b)の場合では、31 mm 付近で切り替わっていて、切り替えタイミングに大きく差が確認できた。また緑色の線で示される 0.2 Hz において、(a)の場合ではおよそ 38 mm 付近で立ち上がり確認できるのに対し、(b)の場合では 40 mm 付近で切り替わっていることが確認できる。これらはキャパシタを直列接続したことによる位相進みが主な原因であると考えられる。実験結果と理論式の比較から式(8)の理論式の妥当性が確認できる。

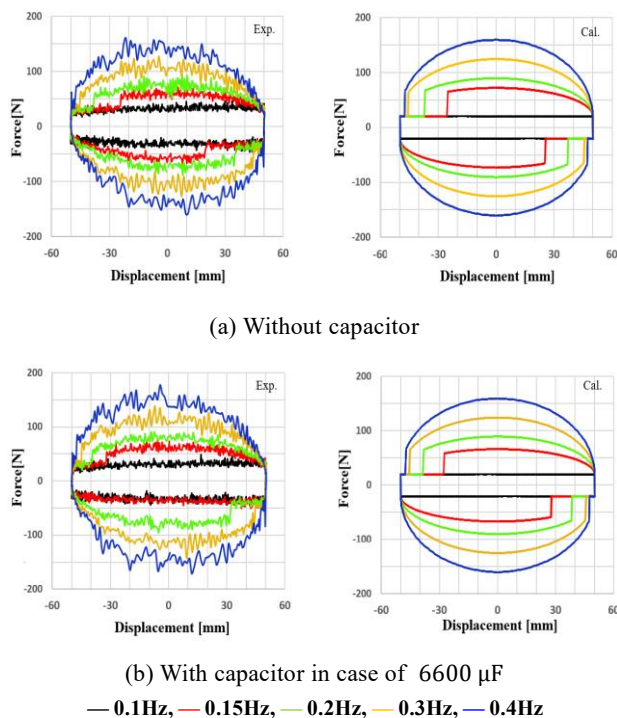


Fig. 2 Force - displacement curves

### 3.2 減衰力切替条件式の妥当性

図3は、静電容量 2200  $\mu$ Fのキャパシタを取り付け、振動数 0.17 Hz で加振した際の実験結果から、横軸に時間と取り、縦軸に荷重を赤い線示し、式(5)で示した条件式の速度と加速度の和を黒い線、式(5)の加速度成分部分を黄緑色線、速度成分部分を黄色線の波形で示す。速度と加速度は変位の実測値から差分による微分から算出し、青の破線が、しきい値である。青い破線と黒い線が交わるタイミングで赤い線の荷重が、急激に立ち上がっていることから条件式の妥当性が確認できる。加速度成分の黄緑色線よりわずかながら、加速度成分を含む切替が行われていることが確認できる。また、加速度成分の黄緑色線、速度成分の黄色線の比較よりかなり速度成分が大きくなっていることがわかる。

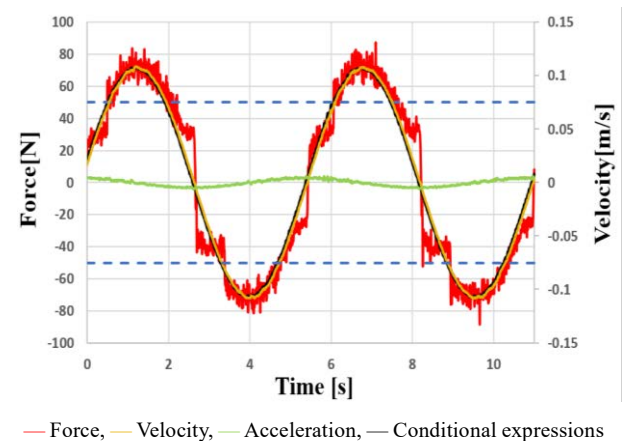
## 4. まとめ

本研究では、速度成分と加速度成分の2点を含んだしきい値で切り替わる場合のセンサレスセミアクティブダンパの研究を行い、抵抗力特性実験を行った主な結果以下に示す。

1. 抵抗力の切り替えタイミングについて、キャパシタを取り付けた方が大きい変位で切り替わっていることが確認できた。
2. 抵抗力の理論式について、抵抗力特性実験の結果より妥当性が確認できた。
3. 抵抗力特性実験結果より減衰力切替条件式の妥当性が確認できた。
4. 減衰力の切替が加速度成分を含み行われていることが確認できた。

## 文献

- 1) 松岡 太一, 砂子田 勝昭, 平元 和彦, 大竹 隆文, 発電式振動抑制装置に関する研究, 日本機械学会論文集(C 編), 73 巻, 735 号 (2007), pp.2926-2931.
- 2) 松岡太一, 中澤太一, リレーとキャパシタを用いた減衰力切替型電磁抵抗ダンパ, 日本機械学会論文集, 88 巻, 909 号 (2020), pp.22-00016.



— Force, — Velocity, — Acceleration, — Conditional expressions

Fig. 3 Time history wave forms of velocity and force

# 強化学習を用いた慣性質量の切替による地震応答制御

4年8組38番 張 儒逸

明治大学 理工学部 機械情報工学科 機械力学研究室

指導教員 松岡 太一

## 1. 研究背景

本研究で用いた可変慣性モーメント型振動抑制装置<sup>[1]</sup>では、慣性モーメントを変化させることで可変慣性力を発生させ、振動低減効果を図る装置である。慣性力は、相対加速度に比例し、その大きさは慣性質量と振動数の二乗に依存する。この慣性質量をもつ振動抑制装置を一自由度振動系に取り付けた場合、固有角振動数を変化させるという効果があり、主系における反共振点の周波数が増減し、任意の振動数で反共振させ振動遮断することが可能である。ただし、地震波が入力された場合は、振動数を同定することが極めて困難であるため、慣性質量を調整しにくいという問題がある。先行研究では、強化学習による制御は振動低減の効果があると判明された。そこで本研究では、エージェントにおける可視域拡張と適応型報酬関数を適用し、地震波加振実験を行った。

## 2. 慣性質量切替方法

### 2.1 深層強化学習を用いた切替方法

深層強化学習では、従来強化学習の表型など離散化された方策関数をニューラルネットワークに置き換えたものであり、方策関数を連続化することで近似精度を向上する強化学習モデルである。現在主流な強化学習モデルでは、主に DQN を代表とした Q 学習及び DDPG のような Actor-Critic という二つの学習方法に分類される。本研究では、慣性質量を二値で切り替えるため、離散的な制御に有効なアルゴリズムである DQN を用いた。

### 2.2 可視領域の拡張

観測状態とは、エージェントの目とも呼ばれ、強化学習にとって非常に重要なパラメータである。先行研究では、センサーにより各一時点における状態をエージェントに入力したが、本研究で取り扱う波形は時系列のデータであり、一つの点に対応する波形は無数種類ある。そこで、可視領域拡張という現時点のデータだけでなく、過去の状態と組み合わせて新たな観測状態を作成する手法を提案した。過去の状態を導入することにより、観測状態と実際の状態との差を小さくすることができる。

### 2.3 適応型報酬関数

報酬関数は、エージェントの行動を定量的に評価する学習において重要な関数である。先行研究では、線形的な報酬関数を使用した。しかし、地震波の大きさが異なるため、線形的に評価できない。そこで、報酬確率分布の平均値（以下ベースラインと呼ぶ）に基づいた適応型報酬関数を提案した。適応型報酬関数では、任意な地震波におい

て、ランダム制御で数千回シミュレーションをし、様々な行動に対して報酬の確率分布を得る。報酬確率分布の平均値をベースライン報酬とし、それを用いてエージェントの行動を評価する。ベースラインを用いることで波形の大きさによる影響を取り除くことができ、より正確に報酬を算出することができる。

## 3. 学習方法

ばね質点からなる一自由度振動系に慣性質量を切り替えることのできる振動抑制装置を取り付けて、地側にじしんが入力されたときにおいてエージェントを学習させた。式(1)に示すように、 $x$ と $z$ は質点及び振動台の絶対変位、 $u$ は質点と振動台との相対変位( $=x - z$ )、主質量  $m = 48$  kg、慣性質量  $m_e = 50$  kg または  $68$  kg、減衰係数  $c = 200$  Ns/m、ばね定数  $k = 8900$  N/m の解析モデルを使用した。異なる観測点で記録された 29 種類の地震波、計 832 波に加えて、加速度の大きさを変更した波形、伸縮させた波形を作成し、学習波形として用いた。

$$(m + m_e)\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{z} \quad (1)$$

## 4. 地震波加振実験

### 4.1 実験方法

学習させたエージェントを用いて、地震波加振実験を行った。図 1 に示すように振動台上にコイルばねと剛体板の質点からなる一自由度系を設置し、本装置を取り付けて単軸方向に加振した。振動系のばね定数  $k (= 8900$  N/m)、質量  $m (= 40.8$ kg)を設定し、サーボ型加速度計、レーザー変位計を用いて測定した。センサーから、入力加速度、応答加速度、応答相対変位の値を、AD/DA 変換ボードを使用して、エージェントの方策に従い電流の値を出力することで、本装置の慣性質量が切り替わる。地震波は、兵庫県南部地震 (1995) 神戸海洋気象台の南北成分を最大加速度  $3.0$  m/s<sup>2</sup> に基準化したものの波形を用いた。実験結果を表 1、応答波形は図 2, 3 に示す。

### 4.2 実験結果

表 1 の実験結果より、装置が取り付けしていない場合と取り付けした場合を比較して、最大応答加速度が約 1/2 ~ 4/5、最大応答変位が約 1/3 ~ 4/5、加速度の RMS 値が約 1/2 ~ 1/3、変位の RMS 値が約 2/5 ~ 4/5 に低減したことが分かった。Passive 時( $m_e = 50$ kg または  $68$ kg)と比べて、エージェントによる制御の最大応答加速度、最大応答変位及び加速度の RMS 値はさほど変化しないが、変位の RMS 値は最大で約 1/6 低減したことが確認された。

図2, 図3の応答波形より, Passiveにおける数値計算結果と実験結果では, 一致している所が多く, シミュレーションの妥当性が確認された。

## 5. まとめ

振動抑止装置を深層強化学習を用いて, 地震波加振実験の結果より以下のことが分かった。

- (1) エージェントによる制御では, 最大応答加速度, 最大応答変位及び加速度のRMS値がPassiveと近い結果となったが, 変位のRMS値が全ての地震波において低下した. その理由は報酬関数が最大値ではなく, RMS値に基づいて学習をしたからだと考えられる.
- (2) 地震波の最大応答変位において, 実験結果はシミュレーション結果と比べて全般的に小さくなっていることが分かった. その理由はシミュレーションと実験環境の差及び既報<sup>[2]</sup>からMR流体が凝固して, 慣性力となる時間遅れや演算の伝送による変換時間を考慮していないため, 生じたものだと考えられる.

## 参考文献:

- [1] 松岡太一, 相澤隆登, “磁気粘性流体を用いた可変慣性モーメント型振動抑制装置”, 日本機械学会論文集, Vol. 86, No. 886 (2020), DOI: 10.1299/transjsme.19-00405.
- [2] 相澤隆登, 松岡太一, “慣性モーメント切替型制振装置の応答性能に関する研究”, 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会, No. 109 (2020).

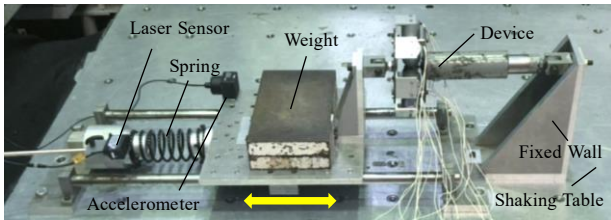
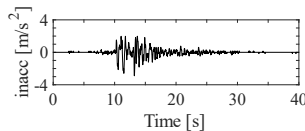
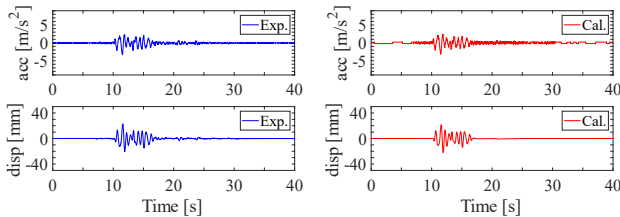


Fig. 1 Test setup

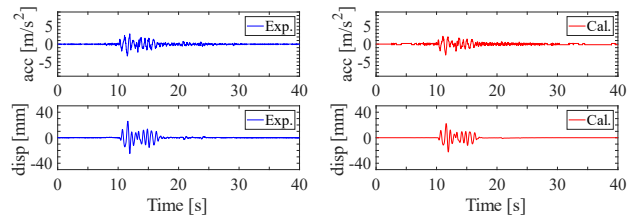


(a) Input Acceleration

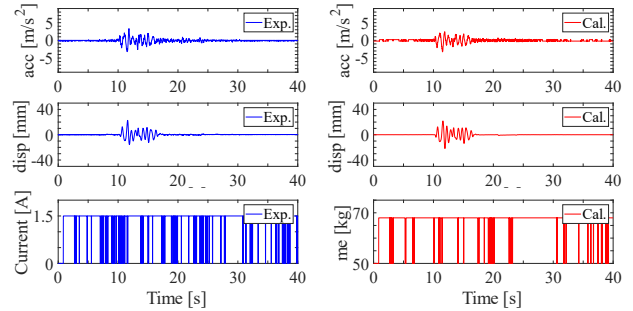


(b) Passive  $m_e = 50\text{kg}$

Fig.2 Seismic response waveforms for Kobe



(a) Passive  $m_e = 68\text{kg}$



(b) Agent control

Fig.3 Seismic response waveforms for Kobe

Table 1 Experimental and simulated results

Kobe		Max.		RMS		
		Acc. [m/s <sup>2</sup> ]	Disp. [mm]	Acc. [m/s <sup>2</sup> ]	Disp. [mm]	
Without VSD	Exp.	8.38	42.1	1.36	7.31	
	Cal.	6.94	37.4	1.24	6.67	
With VSD	Passive 50kg	Exp.	3.35	22.6	0.494	3.44
		Cal.	3.21	22.1	0.492	3.34
	Passive 68kg	Exp.	3.35	25.8	0.478	3.74
		Cal.	3.07	22.3	0.444	3.26
	Agent Control	Exp.	3.35	22.7	0.484	2.94
		Cal.	3.24	21.9	0.492	3.36
El Centro		Max.		RMS		
		Acc. [m/s <sup>2</sup> ]	Disp. [mm]	Acc. [m/s <sup>2</sup> ]	Disp. [mm]	
Without VSD	Exp.	14.9	73.7	3.13	17.0	
	Cal.	12.2	65.5	2.68	14.5	
With VSD	Passive 50kg	Exp.	5.79	39.1	0.904	5.99
		Cal.	3.68	38.8	0.847	6.22
	Passive 68kg	Exp.	7.16	38.2	0.890	5.90
		Cal.	4.48	34.3	0.780	5.99
	Agent Control	Exp.	7.01	41.8	0.954	5.69
		Cal.	4.45	38.2	0.845	6.21
Niigata		Max.		RMS		
		Acc. [m/s <sup>2</sup> ]	Disp. [mm]	Acc. [m/s <sup>2</sup> ]	Disp. [mm]	
Without VSD	Exp.	5.94	35.4	0.836	4.61	
	Cal.	6.40	34.4	0.834	4.49	
With VSD	Passive 50kg	Exp.	3.05	23.4	0.358	2.16
		Cal.	2.88	19.3	0.357	1.69
	Passive 68kg	Exp.	2.89	25.7	0.353	2.27
		Cal.	2.67	19.4	0.338	1.69
	Agent Control	Exp.	2.74	22.3	0.365	1.99
		Cal.	2.87	19.4	0.361	1.70

# アクティブ制御を用いた慣性ダンパの実験的検討

4年8組22番 行田 拓哉

明治大学 理工学部 機械情報工学科 機械力学研究室

指導教員 松岡 太一

## 1. まえがき

振動を低減させるために慣性力が使われることがある。慣性力は静止しているものは静止させようとする力であり、ダンパに伝わる力に反発し、動きを妨げる力を発生させるものが慣性ダンパである。慣性ダンパはフライホイールを使用するのが基本だが、反転増幅回路を用いてモータ端子間の負性抵抗によって電流を調整し、慣性力を発生させる方法などがある。

本研究では、Zhu氏らが提案したモータに流れる電流に対してアクティブ制御手法を用いることで、メカトロダンパで慣性力を直接生み出す手法<sup>1)</sup>を参考にし、MATLAB/Simulinkを用いてプログラムを作成し、既存の電磁抵抗型セミアクティブダンパ<sup>2)</sup>に接続する。PID制御を用いたアクティブ制御により、ダンパのDCモータに流れる電流の量と向きを調整し、実験における慣性力を発生させること、慣性力を変化させることを目的としている。

## 2. 慣性ダンパの数値計算

図1にZhu氏らのブロック線図を参考にし、MATLAB/Simulinkを用いて作成したプログラムを示す。端子1から入力される荷重を用いて、PID制御を行い、ダンパのDCモータに流れる電流の量と向きを制御するため指令電圧信号を端子2から出力する。本研究で使用する電磁抵抗型セミアクティブダンパの緒元を表1に示す。図1における慣性モーメント $J$ はボールねじの慣性モーメント $J_s$ とモータの慣性モーメント $J_m$ を足した値である。PIDブロックの役割として入力された荷重に対して、比例ゲイン $K_p$ 、積分ゲイン $K_i$ 、微分ゲイン $K_d$ をそれぞれ調整することで、荷重に比例した加速度を出力することにある。PIDの変換機能は $K_p + K_i/s + K_d s$ であり、ゲインを調整した結果それぞれの数値は $K_p = 8$ 、 $K_i = 20000$ 、 $K_d = 0.02$ となった。また、サンプリング時間は1msである。

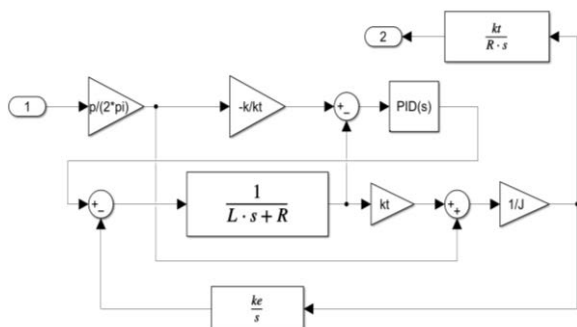


Fig.1 Block diagram

Table 1 Design parameters of the damper

Ball screw		
$p$	Lead	8 mm
$k$	Rotary efficiency	0.95
$J_s$	Moment of inertia	$6.90 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$
Motor		
$k_t$	Torque Sensitivity	0.074 Nm/A
$k_e$	Motor constant	0.074 Vs/rad
$L$	Motor reactance	3.25 mH
$R$	Motor resistance	2.94 $\Omega$
$J_m$	Moment of inertia	$0.53 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$

る。図1において入力される荷重 $F$ は、ダンパを振幅 $A$ 、振動数 $\omega$ で加振したときの変位 $x$ は、時間を $t$ とすると

$$x = A \sin(\omega t) \quad (1)$$

となる。モータの角速度 $\omega$ と直線方向の速度 $\dot{x}$ は式(1)より

$$\omega = \frac{2\pi}{p} \dot{x} = \frac{2\pi}{p} A \omega \cos(\omega t) \quad (2)$$

という関係がある。ダンパが加振されることでモータに発生する電流 $I_1$ はこの角速度に比例するため、式(2)より

$$I_1 = \frac{K_e}{R} \omega = \frac{K_e 2\pi}{R p} A \omega \cos(\omega t) \quad (3)$$

と導かれる。よって、高速電源からモータへと出力される電流を $I_2$ としたとき、モータに流れる電流 $I = I_1 + I_2$ であるため、入力される荷重 $F$ は

$$F = \frac{2\pi k_t}{p} I = \frac{2\pi k_t}{p} (I_1 + I_2) \quad (4)$$

と求めることができる。振幅10 mm、振動数1 Hzの条件で正弦波を与えたとき、式(3)の $I_1$ の振幅は0.6 Aとなる。MATLAB/Simulinkを用いてシミュレーションを行った時の抵抗力特性図を図2(a)~(c)の橙線に示す。縦軸は荷重、横軸は変位であり、それぞれ $I_1$ の振幅を0.6 A、1.8 A、3.0 Aと1倍、3倍、5倍にしたときの抵抗力特性図である。図2から左肩上がりの直線となっているため、慣性力が発生していることがわかる。また、 $I_1$ を大きくすることで慣性力が大きくなっていることがわかるため、慣性力の大きさは $I_1$ の大きさに依存していることがわかる。それぞれの慣性質量は79 kg、238 kg、397 kgであった。



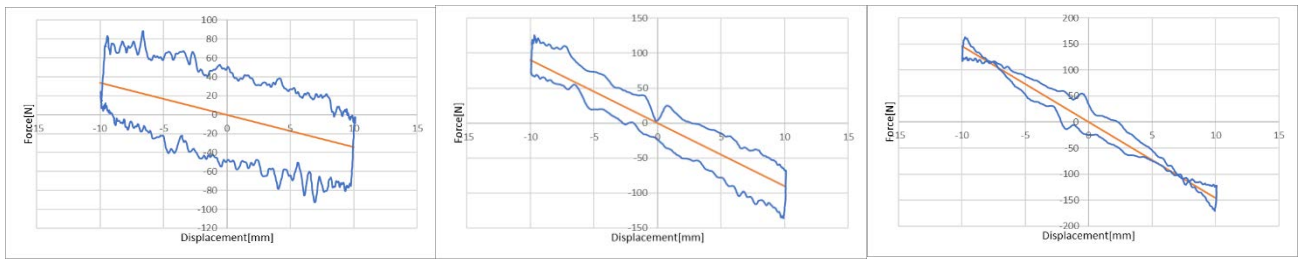
(a)  $I_1 = 0.6 A$ (b)  $I_1 = 1.8 A$ (c)  $I_1 = 3.0 A$ 

Fig.2 Force-Displacement curves

— Simulation — Experiment

### 3. 抵抗力特性実験

#### 3.1 実験方法

シミュレーションの結果が実験でも得られるのか確かめる。実験ではシミュレーションと同様に振幅 10 mm、振動数 1 Hz でダンパを加振する。実験の概略図を図 3 に示す。電気サーボ疲労試験機により電磁抵抗型ダンパを加振することでモータに電流が流れ、荷重が発生する。ロードセルから読み込まれた荷重値は DSP により、AD 変換し、電圧信号としてプログラムに取り込まれる。ロードセルで読み込まれる荷重の単位は kN であり、荷重を電圧信号に変換する際に 1/2 倍、DSP を介す際に 1/10 倍のゲインがそれぞれ与えられる。そのため、荷重の単位を N にして、実際の荷重値に変換するためには、入力された荷重の電圧信号に 20000 倍のゲインを与える必要がある。入力された荷重を用いて、DC モータに流れる電流の量と向きを図 1 のプログラムを用いて調整する。プログラムから出力された指令電圧信号は DSP により、DA 変換し、高速電源に入力され、高速電源から DC モータへ電流を出力する。指令電圧信号は DSP と高速電源でそれぞれ 10 倍のゲインが与えられるため、電流  $I_2$  をモータに流したいとき、 $I_2$  に 1/100 倍のゲインを与えた値を指令電圧信号としてプログラムから出力する必要がある。 $I_2$  をモータに出力することで  $I_1$  と足し合わされ、電流  $I$  が流れる。モータに流れる電流  $I$  から式(4)によって求められる抵抗力を発生させる。この時の荷重と変位の値を使用し、抵抗力特性図を描き慣性力が発生しているかを確認する。

また、シミュレーションから、 $I_1$  が大きくなれば慣性力が大きくなることも分かった。しかし、実際の実験では  $I_1$  は振幅と振動数によって決定されるため、同条件下では  $I_1$  を大きくすることはできない。そこで、 $I_1$  を大きくするために実験ではトリガープログラムを使用して疑似的に  $I_1$  を大きくする。トリガープログラムでは変位が

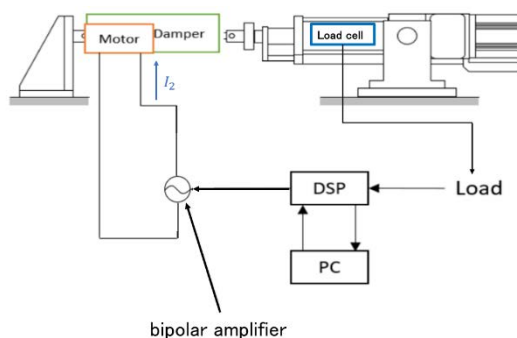


Fig.3 schematic of the experiment

最大になったときにトリガーがオンになり、式(1), (3)より変位と  $\pi/2$  位相がずれた  $I_1$  と同位相の電流を出力し始めるとともに、図 1 のプログラムの制御を開始し、それぞれの出力された電流を足し合わせたものをモータへと出力する。

#### 3.2 実験結果

得られた荷重と変位をもとに作成した抵抗力特性を図 2(a)~(c)の青線に示す。図 2 はトリガープログラムを用いてプログラムの出力にそれぞれ振幅 0A, 1.2 A, 2.4 A の正弦波を足し合わせることで、疑似的に  $I_1$  の振幅を 0.6 A, 1.8 A, 3.0 A にしたときの実験結果である。図 2 から左肩上がりの直線になっていることがわかるため、実験でも慣性力が発生していることがわかる。また、 $I_1$  を大きくすることで慣性力も大きくなっていることがわかる。それぞれの慣性質量は 80 kg, 241 kg, 358 kg となった。シミュレーション結果との値のずれの原因としてトリガープログラムの立ち上がり時間のずれによるものであると考えられる。ノイズの原因として、サンプリング時間が 1 ms と小さいため、荷重の電圧信号をプログラムに入力する際に発生したものだと考えられる。

### 4. まとめ

電磁抵抗型ダンパにアクティブ制御を適用し、慣性力を生む実験的検討を行い、以下のことがわかった。

- 1) Zhu氏らのブロック線図を参考にし、PID制御を用いたアクティブ制御を行い、モータに流れる電流を制御することで、実験における慣性力を確認することができた。
- 2) トリガープログラムを用いて、ダンパが加振されることで発生する電流を疑似的に変化させることで、慣性力を変化させることができた。

### 参考文献

- 1) Dingxiao, Zhu, Yaozong, Liu, and Jianlog, Wen, "A Simulation Research of the Mechatronic Inerter Based on Active Control", IEEE International Conference on Information and Automation (2015), pp. 1269-1272.
- 2) 松岡太一, 中澤太一, リレーとキャパシタを用いた減衰力切替型電磁抵抗ダンパ, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.909 (2022), DOI:10.1299/transjsme.22-00016