ER ブレーキを用いたキャストワゴンの地震応答抑制*

鎌田 崇義^{*1}, 松本 拓也^{*2}

Seismic Response Suppression of Caster Wagon by ER Brake

Takayoshi KAMADA^{*1} and Takuya MATSUMOTO^{*1} Tokyo University of Agriculture and Technology, Dept. of Mechanical Systems Engineering
Nakacho 2-24-16, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

Generally, many types of medical equipments, especially heavy equipments, have casters for their easy treatment or movement. However, in the case of earthquakes, if casters are free, large movement is happened and causes a disconnection of the connecting point or collision to the other equipments. On the contrary, if casters are locked, displacement of the equipment becomes small but large response acceleration causes turnover or falling of the installed equipments. In this paper, seismic response mitigation strategies of the wagon with casters were investigated. Instantaneous Optimal Control with ER brake was proposed for controller design. And the effectiveness was confirmed in simulation and shaking experiment. Torque limiting control and gain scheduling were investigated to keep response displacement short under the condition that response acceleration was also restricted.

Key Words : Vibration Control, Optimal Control, Analytical Model, Caster Wagon, ER Brake, Seismic Response

1. 緒 言

日本は世界有数の地震大国であることから、特に建築物における被害を低減するための様々な耐震・免震技術や制振技術が研究され、その技術が実用化されてきた。また、建築物だけでなく災害時の医療活動に必要となる医療機器についても、振動台を用いた振動実験を通して地震時挙動や耐震性の調査・研究が行われている。しかし医療機器自体の地震対策に関する研究は、これまで十分に行われていない。

一般的に医療機器には利便性のためにキャストが取り付けられていることが多い。しかし地震時には、キャストが固定されていると重心の高い機器などは転倒し、キャストが固定されていなければ機器が大きく動いてしまい、他の機器や壁との衝突によって損傷してしまったという被害が報告されている⁽¹⁾。医療機器には高価なものも多く、キャストに制御を加えて機器の応答を低減させる手法が確立されれば、十分な需要があると思われる。

著者らは、地震時にキャスト機器の応答加速度を抑えながら応答変位をできるだけ低減させることを目的として、まず、安価なキャストワゴンの制御について検討を行った。具体的には可変ブレーキの一種である ER ブレーキを用いた地震応答制御を提案し、瞬時最適制御を用いることで最大応答加速度と最大変位を効果的に低減できることを確認した⁽²⁾。しかし、入力地震波の種類や大きさによって制御器を変更する必要があったため、未知の地震波に対しては効果的な制御が行えなかった。また、ER ブレーキの基底トルク（電圧非印加時のトルク）が大きく、小さい外乱入力に対して有効な制御が行えなかった。

本報では地震に対するキャストワゴンの応答の低減を目的として改良を行った。まず、制御効果の向上のためキャストワゴンの ER ブレーキをより基底トルクが小さいものに変更し、解析モデルの再検討を行ってシミュレーション精度の向上を図った。制御に適用した瞬時最適制御に関しては、制御器設計のための重み係数の設定についてシミュレーション解析を行って検討した。さらに、制御の切り替えによりワゴン加速度を設定値以下に抑

* 原稿受付 2012 年 8 月 31 日

^{*1} 正員, 東京農工大学 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)^{*2} 元東京農工大学 大学院

E-mail: kama@cc.tuat.ac.jp

Fig. 1 Caster wagon

Fig. 2 Shaking table

Fig. 3 ER brake caster

Fig. 4 Brake torque of ER brake

える方法、ワゴンを原点復帰させる方法を検討し、小型振動台を用いた制御実験を行って、提案した制御の有効性について実験的にも検証した。

2. 基礎実験

2・1 実験装置

本研究で使用したキャスタワゴンと小型振動台の外観を図 1, 2 に示す。ワゴンはアルミ製で外形寸法は 400mm × 300mm × 750mm, キャスタ部を含めた総重量は約 15kg である。小型振動台は一方方向のみの加振が可能であり、最大加振加速度 3.00m/s^2 , 最大積載荷重 70kg, 最大加振変位 50mm, テーブル寸法は 700mm × 400mm である。ワゴンの変位は振動台に取り付けたレーザ変位計により振動台との相対変位を計測し、ワゴンの応答加速度はワゴンの上板と下板のそれぞれの中心点に取り付けた加速度計により絶対加速度を計測する。

キャスタにはブレーキ機構として ER ブレーキを用いている。ER ブレーキとは、機能性流体の一種である ER 流体を利用し、電圧による制動トルクの連続かつ可逆的な制御が可能なブレーキである⁽³⁾。本研究ではワゴンの後部キャスタ二輪にこの ER ブレーキを組み込んでおり、前方二輪には首振りができない固定キャスタを使用している。なお、ER ブレーキキャスタの車輪径は 160mm, 固定キャスタの車輪径は 150mm であり車輪径が異なるため、ワゴン下板が床に対して平行となるよう取り付け高さを調節している。ER ブレーキキャスタの外観を図 3 に、ER ブレーキ単体の各印加電圧時におけるブレーキトルクの測定結果を図 4 に示す。本研究で用いる ER ブレーキの基底トルクは 0.08Nm である。以前の研究で用いていた ER ブレーキの基底トルクは 0.24Nm であり、外乱入力が小さい場合に制御性能が悪化するという欠点があったため、作動 ER 流体を液晶均一系のものから粒子分散系⁽⁴⁾のものへ変更し、改良したブレーキを使用することで基底トルクを下げている。

2・2 実験条件

ER ブレーキの制動トルクを一定とした場合の応答低減効果を確認するため、エルセントロ NS 波を入力として、ブレーキトルクを 0.08Nm（基底トルク）、1.5Nm、2.5Nm（最大トルク）の 3 通りに変更して加振実験を行った。さらに、入力波による振動低減効果の違いを確認するため、ブレーキトルク 0.08Nm、2.5Nm については JMA 神戸 NS 波を用いた加振実験も行った。ただし、加振入力に用いている地震波の大きさは、振動台の仕様の限界のためスケールダウンしたものをを用いている。

2・3 実験結果

制動トルク一定時におけるワゴンの応答加速度、応答変位の実験結果を図 5 に、入力波を変更した場合の実験結果を図 6 に示す。また、各実験における最大応答加速度、最大変位の値をまとめたものを表 1 に示す。まず、制動トルクの増加に伴って、ワゴンの応答加速度が増加するのに対し、応答変位は低減されていることが分かる。また、制動トルクを基底トルクに設定した場合、JMA 神戸 NS 波入力時にはエルセントロ NS 波入力時に比べ、応答変位、応答加速度共に大きくなっているが、最大トルクに設定した場合は、逆に応答加速度は小さくなっている等、入力波によってワゴンの地震応答が異なっていることが確認できる。このため、5 章において制御効果を実験で検証するに際には、入力波の種類を変えて地震応答の低減効果を検証している。また、どの条件においても、ワゴンの構造上の特性により下板に比べて上板では応答加速度が約 2 倍程度に増幅されており、ワゴンの地震応答を制御するにあたり、機器自体の伝達特性を考慮する必要があることが分かる。

Fig. 5 Experimental results (El-Centro NS)

Fig. 6 Experimental results (JMA Kobe NS)

Table 1 Maximum response acc. and disp. for constant brake torque

Input wave	Brake Torque	Upper plate acc.	Lower plate acc.	Disp.
El-Centro	T=0.08Nm	1.03 m/s ²	0.40 m/s ²	100 mm
	T=1.5Nm	2.41 m/s ²	1.30 m/s ²	17 mm
	T=2.5Nm	3.81 m/s ²	1.88 m/s ²	15 mm
JMA Kobe	T=0.08Nm	1.66 m/s ²	0.73 m/s ²	180 mm
	T=2.5Nm	3.59 m/s ²	1.56 m/s ²	20 mm

3. キャスタワゴンのモデル化

3・1 解析モデル

キャスタワゴンの地震応答をより精度良くシミュレーションするため、解析モデルについても以前用いていた一自由度系モデルから、ワゴンの上板を支える L 字アングルのたわみをばね要素と減衰要素で模擬する二自由度系モデル（図 7）へと改良を行った。解析モデルの運動方程式を式(1),(2)に示す。キャスタの地面と設置する部

分はゴムとなっており、ワゴン停止時にはこのゴムの特性による除振効果が働くため、この特性をばね要素と減衰要素として式(3)の形でモデル化している。ワゴン運動時にはキャスタが転がっている状態であるため、式(4)に示すブレーキトルクに応じた力が加わる。このワゴン停止時とワゴン運動時をそれぞれ Phase1 と Phase2 とし、式(5)、式(6)の条件で切り替える。

$$\begin{cases} M_1 \ddot{x}_{\text{under}} = -M_1 \ddot{z} - F - K_l(x_{\text{under}} - x_{\text{upper}}) - C_l(\dot{x}_{\text{under}} - \dot{x}_{\text{upper}}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} M_2 \ddot{x}_{\text{upper}} = -M_2 \ddot{z} - K_l(x_{\text{upper}} - x_{\text{under}}) - C_l(\dot{x}_{\text{upper}} - \dot{x}_{\text{under}}) \end{cases} \quad (2)$$

(Phase 1) ワゴンが停止している状態

$$F = K_g(x_{\text{under}} - x_0) + C_g \dot{x}_{\text{under}} \quad (3)$$

(Phase 2) ワゴンが運動している状態

$$F = \frac{T}{r} \cdot \text{sign}(\dot{x}_{\text{under}}) \left(= \frac{T_0 + T_E + c|\dot{x}_{\text{under}}|}{r} \cdot \text{sign}(\dot{x}_{\text{under}}) \right) \quad (4)$$

① (Phase 1) から (Phase 2) への切り替え条件

$$|M_1 \ddot{z}| \geq 2 \cdot \frac{T}{r} \quad (5)$$

② (Phase 2) から (Phase 1) への切り替え条件

$$\dot{x}_{\text{under}} = 0 \quad \text{かつ} \quad |M_1 \ddot{x}_{\text{under}}| < 2 \cdot \frac{T}{r} \quad (6)$$

ここで、 x_{under} ：ワゴン下板相対変位、 x_{upper} ：ワゴン上板相対変位、 M_1 ：ワゴン下板及び車輪重量、 M_2 ：ワゴン上板重量、 $\ddot{z}$ ：地震入力加速度、 x_0 ：ワゴン停止時の基準位置、 K_l ：L字アングルのばね定数、 C_l ：L字アングルの減衰係数、 K_g ：ゴムタイヤのばね係数、 C_g ：ゴムタイヤの減衰係数、 sign ：符号関数、 T ：ER ブレーキの制動トルク、 T_0 ：基底ブレーキトルク、 T_E ：付加ブレーキトルク、 r ：ER ブレーキ半径である。また、ER ブレーキの回転速度がブレーキトルクへ与える影響を考慮するため、ワゴン速度に関する係数 c を導入している。

Fig. 7 Analytical model of caster wagon

3・2 妥当性の検証

解析モデルの妥当性を検証するため、ブレーキトルクを 0.08Nm とし、入力にエルセントロ NS 波、JMA 神戸 NS 波を用いたシミュレーションを行って実験結果と比較した。なお、 K_l は上板の固有振動数より決定し ($K_l=9913\text{N/m}$)、 C_l 、 K_g 、 C_g 、 c については、実験結果と合うよう試行錯誤的に決定した ($C_l=21\text{Ns/m}$ 、 $K_g=1879\text{N/m}$ 、 $C_g=257\text{Ns/m}$ 、 $c=1.5\text{Ns}$)。各加振入力時におけるワゴンの応答加速度、応答変位の比較を図 8 に示す。

応答変位を見ると、シミュレーションでは実験結果に見られる一方向（負方向）への偏りが再現できていない。これは、入力によらず同じ傾向が見られることから、モデルには考慮されていない ER ブレーキキャスタの回転方向による特性の違いによるものと考えられる。しかし、応答加速度については上板、下板共にどちらの加振入力においても非常に良く模擬できていることが分かる。

Fig. 8 Verification of analytical model

4. 瞬時最適制御^{(5), (6)}による制御シミュレーション

4・1 制御器の設計

前章で作成したモデルを利用し、瞬時最適制御を用いた制御系の設計を行った。使用する高圧電源の遅れを 1 次遅れとし、制御電圧の印加によって発生するブレーキトルク T_E を式(7)のように表す。

$$T_L \dot{T}_E + T_E = K_E E \quad (7)$$

ここで、 T_L は時定数、 K_E はゲイン、 E は ER ブレーキへの印加電圧である。次に、 $n, n-1$ ステップのワゴン相対変位、相対速度を線形加速度法により求め、運動方程式を差分化すると、

$$\mathbf{X}_n = \mathbf{A}\mathbf{X}_{n-1} + \mathbf{B}E_n + \mathbf{Z} \quad (8)$$

と表せる。ここで状態ベクトルは、

$$\mathbf{X}_n = [x_n \quad \dot{x}_n \quad \ddot{x}_n + \ddot{z}_n \quad T_{En}]^T \quad (9)$$

であり、行列 $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{Z}$ は以下のように表せる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{-\Delta t^2}{6} & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{T_L \times \text{sign}(\dot{x}_{n-1})}{Mr\Delta t} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_L}{T_L + \Delta t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{3} & 0 \\ 0 & 1 & \frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{T_L \times \text{sign}(\dot{x}_{n-1})}{Mr\Delta t} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_L}{T_L} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{-\Delta t^2}{6} & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{T_L \times \text{sign}(\dot{x}_{n-1})}{Mr\Delta t} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{T_L}{T_L + \Delta t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{\text{sign}(\dot{x}_{n-1})}{Mr} \\ \frac{\Delta t}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{\Delta t^2}{6} & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{\Delta t}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{T_L \times \text{sign}(\dot{x}_{n-1})}{T_L + \Delta t} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{Mr\Delta t}{T_L + \Delta t} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t^2}{6} \ddot{z}_n - \frac{\Delta t^2}{3} \ddot{z}_{n-1} \\ -\frac{\Delta t}{2} \ddot{z}_n - \frac{\Delta t}{2} \ddot{z}_{n-1} \\ \{T_0 + c|\dot{x}|\} \text{sign}(\dot{x}_{n-1}) \\ \frac{Mr}{0} \end{bmatrix} \quad (12)$$

次に、評価関数 J_n を以下のように設定する。

$$J_n = \mathbf{X}_n^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_n + R E_n^2 \quad (13)$$

ここで $\mathbf{Q}$ は、各状態量に対応する重み係数を用いて、

$$\mathbf{Q} = \text{diag} [q_d \quad q_v \quad q_a \quad q_t] \quad (14)$$

と表せる準正定値正方行列であり、 R はスカラーである。

瞬時最適制御は、式(8)の制約条件下で評価関数(13)を最小にする最適化問題として考えられる。各ステップのラグランジュ乗数を λ_n とおくと、ハミルトニアン L_n は、

$$L_n = \mathbf{X}_n^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_n + R E_n^2 + \lambda_n (\mathbf{X}_n - \mathbf{A} \mathbf{X}_{n-1} - \mathbf{B} E_n - \mathbf{Z}) \quad (15)$$

となる。式(15)にラグランジュの未定係数法を適用し E_n について解くと、最適制御電圧 E_n^* の計算式は、

$$E_n^* = (\mathbf{R} + \mathbf{B}^T \mathbf{Q} \mathbf{B})^{-1} \{ -\mathbf{B}^T \mathbf{Q} (\mathbf{A} \mathbf{X}_{n-1} + \mathbf{Z}) \} \quad (16)$$

となる。

4・2 最適な重み係数の探索

式(14)の各パラメータのうち、ワゴンの応答変位の抑制のためには相対速度に対応する q_v を、ワゴンの応答加速度の抑制のためにはワゴンの絶対加速度に対応する q_a を大きくすればよい。本研究では、地震時にワゴンの転倒や物の落下を避けると同時に、ワゴンの他の機器への衝突も防ぐためにワゴンの最大上板加速度と、最大変位の双方を、いかに効率的に低減できるかということに着目して制御に用いる重み係数を検討する。

各重み係数でのキャスタワゴンの地震応答を調べるため、加振入力エルセントロ NS 波、JMA 神戸 NS 波として各パラメータを $q_a = 10^{-6} \sim 10^6$ 、 $q_v = 10^{-2} \sim 10^{10}$ 、 $q_d = q_t = 0$ 、 $R = 1$ の範囲でサーベイした。なお、制御に用いる高圧電源の仕様より、時定数 T_L は $20\text{ms} \times 63.2\% = 0.0126\text{s}$ である。表 2 に示す最大トルク (2.5Nm) 出力時の最大上板加速度と基底トルク (0.08Nm) 出力時の最大変位を基準とし、各重み係数での地震応答低減効果を表 3 に示す形で比較する。各重み係数の組み合わせのうち上のセルが最大変位、下のセルが最大上板加速度の割合である。

表 3 を見ると異なる加振入力であるが、左下の範囲の重み係数の組み合わせであれば最大上板加速度が効果的に低減でき、右上の範囲の組み合わせであれば最大変位が低減できるという傾向が見られる。そしてこのような傾向の中で、その境界にあたる重み係数の組み合わせでは、最大上板加速度、最大変位共に効果的に低減できていることが分かる。つまり、これらの境界部分の重み係数の組み合わせを用いることで、複数の地震波に対して有効な制御が行える可能性があることから、本研究では最大上板加速度を重点的に低減できる $q_a = 10^0$ 、 $q_v = 10^3$ を弱ブレーキ重み係数、最大上板加速度、最大変位を共に低減できる $q_a = 10^1$ 、 $q_v = 10^4$ を中ブレーキ重み係数、最大変位を重点的に低減できる $q_a = 10^0$ 、 $q_v = 10^4$ を強ブレーキ重み係数として抽出し、これらの重み係数を用いて異なる地震波に対する制御効果を検証する。

Table 2 Maximum upper plate acc. and disp. (W/O control)

	El-Centro		JMA Kobe	
T=0.08Nm	1.36 m/s ²	60 mm	1.94 m/s ²	64 mm
T=2.5Nm	4.21 m/s ²	15 mm	4.68 m/s ²	15 mm

Table 3 Vibration suppression performances

El-Centro(NS)													
Max. disp.	El-Centro NS												
Max. acc.	T=0.08Nm 100 32 T=2.5Nm 25 100												
qd=0, R=1	qv_deg												
qa_deg	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	100	100	100	100	92	52	10	11	11	11	18	18	18
	32	32	32	32	33	40	97	104	105	103	115	115	115
	100	100	100	100	92	52	10	11	11	11	18	18	18
	32	32	32	32	33	40	97	104	105	103	115	115	115
	100	100	100	100	92	52	10	11	11	11	18	18	18
	32	32	32	32	33	40	97	104	105	103	115	115	115
	100	100	100	100	92	52	10	11	11	11	18	18	18
	32	32	32	32	33	40	97	104	105	103	115	115	115
	100	100	100	100	92	52	10	11	11	11	18	18	18
	32	32	32	32	33	40	97	104	105	103	115	115	115
	100	100	100	100	93	53	11	11	11	11	18	18	18
	32	32	32	32	33	40	97	104	105	103	115	115	115
0	100	100	100	100	100	64	15	12	9	11	18	18	18
32	32	32	32	32	32	38	93	104	103	103	115	115	115
1	100	100	100	100	100	100	33	11	13	11	18	18	18
32	32	32	32	32	32	32	56	101	106	103	115	115	115
2	100	100	100	100	100	100	100	30	11	11	18	18	18
32	32	32	32	32	32	32	66	104	104	103	115	115	115
3	100	100	100	100	100	100	100	30	11	11	18	18	18
32	32	32	32	32	32	32	32	68	105	104	103	115	115
4	100	100	100	100	100	100	100	30	11	11	18	18	18
32	32	32	32	32	32	32	32	32	68	104	104	103	103
5	100	100	100	100	100	100	100	100	30	11	11	11	11
32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	68	104	104	104
6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	30	11	11	11
32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	68	104	104

JMA Kobe(NS)														
Max. disp.	JMA Kobe NS													
Max. acc.	T=0.08Nm 100 41 T=2.5Nm 23 100													
qd=0, R=1	qv_deg													
qa_deg	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	99	99	99	98	90	51	14	16	19	17	16	16	16	
	41	41	41	41	42	47	98	105	105	103	103	103	103	
	99	99	99	98	90	51	14	16	19	17	16	16	16	
	41	41	41	41	42	47	98	105	105	103	103	103	103	
	99	99	99	98	90	51	14	16	19	17	16	16	16	
	41	41	41	41	42	47	98	105	105	103	103	103	103	
	99	99	99	98	90	51	14	16	19	17	16	16	16	
	41	41	41	41	42	47	98	105	105	103	103	103	103	
	99	99	99	99	91	52	14	16	19	17	16	16	16	
	41	41	41	41	42	46	98	105	105	103	103	103	103	
	0	99	99	99	99	99	60	14	12	19	17	16	16	16
	41	41	41	41	41	45	97	98	105	103	103	103	103	
	1	99	99	99	99	99	29	14	14	17	16	16	16	16
	41	41	41	41	41	42	69	99	104	103	103	103	103	
	2	99	99	99	99	99	99	23	13	17	17	16	16	16
	41	41	41	41	41	41	42	79	99	104	103	103	103	
	3	99	99	99	99	99	99	99	22	14	18	17	16	16
	41	41	41	41	41	41	41	42	81	99	104	103	103	
	4	99	99	99	99	99	99	99	99	22	14	18	17	16
	41	41	41	41	41	41	41	41	42	81	99	104	103	
	5	99	99	99	99	99	99	99	99	99	22	14	18	18
	41	41	41	41	41	41	41	41	41	42	81	99	104	
	6	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	22	14	14
	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	42	81	99	99

4・3 シミュレーション結果

3通りの重み係数を用いて、瞬時最適制御による制御効果を検証する。エルセントロ NS 波, JMA 神戸 NS 波を入力として、それぞれの重み係数を用いて行ったシミュレーション結果を図 9, 各シミュレーション時の最大応答加速度と最大変位を表 4 に示す。

同じ重み係数を用いてどちらの加振入力に対しても効果的な制御が行えており、また抽出した 3通りの重み係数のいずれかを選択することで、加速度や変位を低減する制御が行えることが分かる。また、強ブレーキ重み係数を用いた場合、最大トルク一定時よりも地震応答を共に低減できており、制御の有効性が確認できる。

Fig. 9 Simulation results

Table 4 Maximum acc. and disp. for selected gains (simulation results)

Input acc.		Upper acc. [m/s ²]	Lower acc. [m/s ²]	Disp. [mm]
El-Centro	[10 ⁰ , 10 ³]	1.60	0.68	38
	[10 ¹ , 10 ⁴]	2.35	1.37	20
	[10 ⁰ , 10 ⁴]	3.93	2.43	9
JMA Kobe	[10 ⁰ , 10 ³]	2.11	0.88	38
	[10 ¹ , 10 ⁴]	3.25	1.33	19
	[10 ⁰ , 10 ⁴]	4.56	2.44	9

また、制御トルクが大きくなるととき応答加速度も増加していることがわかる。このことから、式(4)における制御トルクを制限することで、応答加速度を設定値以下に抑える制御が行えると考えられる。

4・4 制御の切り替え

式(1), (4)より下板の絶対加速度と制御トルクの間には運動時、L 字アングルのたわみによる影響が小さく無視できる程度であると仮定すると式(17)の関係が成り立つ。

$$M_1(\ddot{x}_{under} + \ddot{z}) = -\frac{T}{r} \cdot \text{sign}(\dot{x}_{under}) \quad (17)$$

また、基礎実験より本研究で用いているキャスタ機器では、下板から上板へ応答加速度が2倍程度増幅されることが分かっている。これらより、トルクを制限することによって上板加速度を設定値以下に抑えることができると考えられる。

また、ワゴンを原点（初期位置）に戻すための手法として、応答変位の低減率の異なる二つの重み係数を以下の条件で切り替え、ワゴンを原点復帰させる制御方法を提案する。

ワゴン変位の絶対値>0.001m のとき

- (i) ワゴン速度×sgn（ワゴン変位）>0.02m/s であれば 強ブレーキ重み係数
- (ii) ワゴン速度×sgn（ワゴン変位）<-0.02m/s であれば 中ブレーキ重み係数

これより、ワゴンが原点から遠ざかる場合にのみ強いブレーキトルクを出力して変位を抑制し、ワゴンが原点に戻りやすくなるような制御が行えると考えられる。

提案した手法の有効性を検証するため、まず上板加速度を 3m/s^2 以下に抑えることを目的として、下板加速度が 1.5m/s^2 以下になるように制御トルクを制限するシミュレーションを行った。このとき、重み係数は最も応答変位を低減できる強ブレーキ重み係数一種類とした。さらに、同様に制御トルクを制限し、切り替え条件により二つの重み係数を切り替えるシミュレーションを行った。なお、加振入力にはエルセントロ NS 波を用いる。トルク制限なしでの通常制御、トルク制限のみ行った制御、トルク制限に加えゲインを切替えた制御についてのシミュレーション結果を図 10 に、各シミュレーション時の最大応答加速度、最大変位をまとめたものを表 5 に示す。

図より制御トルクのみを制限した場合は、加速度を完全に設定値以下に抑えられてはいない。これは、下板に対して上板の加速度を2倍で近似したこと等が原因と思われる。しかし、通常制御時と比較すると、応答変位はほぼ同程度で、応答加速度をより低減することができている。さらに重み係数を切り替えた場合、ワゴンの応答変位は原点を中心に振動するような挙動となっており、導入した切り替え条件の有効性が確認できる上に、最大応答加速度についても、単一ゲインで制御トルクだけを制限した時の結果よりも上板、下板加速度共に小さくなっていることが分かる。これは、強ブレーキ重み係数一定時に比べワゴンが遠ざかる場合以外には出力される制御トルクは小さくなり、これにより下板加速度に対する上板加速度への増幅の度合いが抑えられたためであると考えられる。

Fig. 10 Simulation results (limiting torque & switching qa,qv)

Table 5 Max. acc. & Max. disp. (simulation results)

Input acc.		Upper acc. [m/s ²]	Lower acc. [m/s ²]	Disp. [mm]
El-Centro	Normal	3.93	2.43	9
	Torque limit	3.01	1.83	9
	Torque limit + Gain switch	2.40	1.62	12

5. 実験による検証

5・1 実験概要

実験を行って制御効果を検証した。実験は、3通りの重み係数それぞれを用いた制御、上板加速度を 3m/s^2 以下に抑えるよう制御トルクを制限する制御、二つの重み係数を切り替える制御である。加振入力にはシミュレーションと同様、通常制御時にはエルセントロ NS 波、JMA 神戸 NS 波、制御トルク制限時、重み係数切り替え時にはエルセントロ NS 波を用いた。制御のための計測は振動台加速度と下板加速度とし、制御器のサンプリング時間は 20ms とした。

5・2 実験結果

3通りの重み係数を用いた通常制御時の実験結果を図 11 に、制御トルク制限時、重み係数切り替え時の実験結果を図 12 に、それぞれの実験結果の最大応答加速度と最大応答変位をまとめたものを表 6 に示す。通常制御時の結果を見ると、実験においてもシミュレーションと同様に重み係数を適切に選ぶことで、加振入力の種類によらず効果的な制御が行えていることが確認できる。また、3通りの重み係数を選択することで、応答加速度、最大応答変位を目的に応じて低減する制御が行えることが分かる。制御トルク制限実験の結果を見ると、トルクを制限することでワゴンの下板加速度を目標としている 1.5m/s^2 以下に抑えることができおり、これにより上板加速度も設定値である 3m/s^2 よりも大幅に抑えることができている。応答変位についても制御トルクを制限しない場合と比較してほぼ変わらない値となっており、提案している制御方法の有効性が確認できた。

重み係数切り替え時の結果であるが、図 12 ではワゴンを初期位置に戻すような挙動が見られていない。これは切り替え条件に必要なワゴンの変位、速度を加速度から算出しているため、精度が不十分であることが原因であると考えられる。そこで、重み係数のためのワゴン変位・速度の計測を、振動台に取り付けたレーザ変位計で行うこととして同じ実験を行った。ワゴン速度はワゴン変位を微分している。加速度のみを計測して制御した結果と、ワゴン変位・速度に関してはレーザ変位計を用いて制御した結果の比較を図 13 に示す。図より変位を計測したことで、シミュレーションと同様にワゴンが原点を中心に振動するような挙動となっており、制御方法の有効性が確認できる。また、速度の算出精度が上がったことで、地震応答の低減効果も他の制御結果よりも若干向上している。ただし、変位を計測するにあたってレーザ変位計を用いる方法は実用的ではないため、実用化を考える際には、車輪自体に組み込むことが可能で、回転速度を計測できるホール IC を用いる方がより現実的であると考えられる。

6. 結言

本研究では未知の地震波に対するキャスタワゴンの地震応答を低減するため、ER ブレーキを用いた制御について

Fig. 11 Experiment results by single gain
(EL-Centro(NS))

Fig. 12 Experiment results (torque limit and gain switch)
(EL-Centro(NS))

Table 6 Control performances (Experimental results)

Input acc.		Upper acc. [m/s ²]	Under acc. [m/s ²]	Disp. [mm]
El-Centro	[10 ⁰ ,10 ³]	1.40	0.67	72
	[10 ¹ ,10 ⁴]	1.73	1.26	61
	[10 ⁰ ,10 ⁴]	3.17	1.84	32
	limiting torque	2.16	1.05	31
	switching qa,qv	1.72	0.91	27
JMA Kobe	[10 ⁰ ,10 ³]	1.87	0.86	131
	[10 ¹ ,10 ⁴]	2.02	1.02	84
	[10 ⁰ ,10 ⁴]	3.21	1.91	31

Fig.13 Experiment results (laser displacement sensor)

検討し、瞬時最適制御を用いた制御器の設計を行った。そして、その有効性をシミュレーションと加振実験を通して検証した。以下に、本研究で得られた知見を示す。

- ・基底トルクの小さい ER ブレーキを用いることによって、ブレーキトルクの増加に伴い応答変位は低減し応答加速度は増加すること、入力波によってワゴンの挙動が変化することを確認した。

- ・解析モデルはシミュレーション精度向上のため 2 自由度系モデルを用い、シミュレーション結果と実験結果との比較により、改良したモデルが妥当であることを示した。ただし、加速度の制限をトルク制限で行うことについては計算の簡略化のため、下板に対して上板の応答加速度が 2 倍であるとして行った。

- ・瞬時最適制御に用いる重み係数について調査を行い、特定の重み係数を用いることで、異なる地震波に対して効果的な制御が行えることを、シミュレーションと実験の両方において示した。

- ・ワゴンの応答加速度を設定値以下に抑える方法、ワゴンを原点復帰させる方法として、制御トルクを制限する方法、二つの重み係数を切り替える方法を提案し、その有効性をシミュレーションと実験の両方において示した。

今後は、より厳密に加速度制限を行うためのゲイン切り替えや、切り替え条件の検討、切り替えに適した制御手法の検討が必要である。

謝 辞

本論文は文部科学省委託研究「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト 都市施設の耐震性評価・機能保持に関する研究」での研究を發展させたものである。研究においてお世話になった、(独) 防災科学技術研究所、国立保健医療科学院の方々に深く感謝する。

文 献

- (1) 中山茂樹, “病院建築・設備と医療機器等の耐震性”, 臨床外科, Vol.51, No.13, (1996), pp.1545-1549
- (2) T. Kamada, Y. Ogata, E. Sato and A. Kakehi, “Seismic Response Mitigation of Medical Wagon with Casters by ER Brake”, *The 10th International Conference on Motion and Vibration Control*, CD-ROM (2010), Paper No.2C35
- (3) 井上昭夫, 笠潮, 宮部洋介, 中川昭夫 “高分子液晶系 ER 流体の特性と福祉機器への応用”, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集, Vol.4 (2000), pp.281-282
- (4) 井上昭夫, “ER アクチュエータ”, 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 第 12 回例会, (2008), pp.1-4
- (5) Yang, J.N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P., “New Optimal Control Algorithms for Structural Control”, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.113, No.9 (1987), pp.1369-1386
- (6) 佐藤栄児, 藤田隆史, “MR 流体を用いた可変粘性ダンパによる建築構造物のセミアクティブ免震”, 日本機械学会 論文集 C 編, Vol.72, No.717 (2006), pp.1428-1434