

Hybrid Mass Driver(HMD)の実用化に関する研究 (その4)

可変ゲインを用いたAMDのストロークと速度の同時サチュレーション制御

奥田 浩文 蔭山 満

Practical Development of Hybrid Mass Driver (Part 4)

Stroke and Velocity Saturation Control of AMD with Variable Gain

Hirofumi Okuda Mitsuru Kageyama

Abstract

A Hybrid Mass Driver (HMD) has been developed that consists of an Active Mass Driver (AMD) installed on a Tuned Mass Damper supported by four Multi-Staged-Rubber-Bearings. This paper presents an optimum vibration control method of an AMD with a constrained stroke and limited velocity. Analytical results and experimental results of shaking table test, are substantially consistent, and the proposed control method is effective for appropriately constraining an AMD's stroke and velocity.

概要

本報告は、多段積層ゴムで支持されたTMD上に、ACサーボモータとボールねじで駆動するAMDを搭載する形で構成される一連のHMD開発技術の内、AMDのストロークと速度の構造制約を同時に満たし、且つ装置能力を最大限活用した制御手法を提案するものである。AMDストロークのみをその容量内で最大限活用する制御手法は同名論文(その1)で既に報告している。しかし、複数の制御対象モードを一つの可変ゲインで制御する従来法には、建物の高次振動が卓越した場合にAMDの速度が飽和するという懸念があった。本報告では、この課題を解決するために、従来法を拡張、改良する形で構成される制御手法を提案し、その有効性を解析的および実験的に確認した結果について報告する。

1. はじめに

著者等は、これまでにACサーボモータとボールねじで駆動するAMDを対象として、装置ストロークを最大限活用する制御手法を提案し¹⁾、解析と実験によって検証してきた^{2),3)}。この制御法(以下、従来法と呼称)は、可変ゲイン(スカラーゲイン)を用いて変位制御型特性に変換された装置に対する制御手法を提案するものであり、最大の特長は、装置ストロークを指令演算段階で直接管理できる点にあった。しかし、複数の制御対象モードを一つの可変ゲインで制御する従来法には、建物の高次振動が卓越した場合に装置速度が飽和するという懸念があった。そこで本報では、スカラーゲインを基本とした従来法を拡張、改良する形で、装置のストロークと速度に課せられた構造制約を同時に満たし、且つ装置能力を最大限引き出す制御手法を開発したので報告する。

本報では、まず、以上のことを目的とした装置特性の変換法とモード分離を目的としたフィルタの設定法について、次に、それらのシステム構成および可変ゲインの設定

法について報告し、さらに、これら提案制御手法の妥当性を検証するために実施した振動台実験の結果についても報告する。

2. 提案制御手法の概念

制御対象を建物2次までとし、装置能力の速度にも飽和のない振動数領域を対象とした場合の本制御法の概念をFig.1に示す。二つの制御対象モードに対応する制御ゲイン(以下、LQゲインと略記)を一つの可変ゲインで一律に変更する従来法^{2),3)}では、建物2次に対しても装置速度が飽和しないモータ選定が前提条件となっていた。それに対して本制御法の特長は、建物2次に対応する装置特性が速度飽和状態になった場合でも装置を停止させない制御法を構築する点にある。すなわち、建物1次近傍では操作電圧に対して、装置ストロークが追従し、同2次近傍では装置速度が追従するモータ特性を構築することによって、指令段階で装置ストロークと装置速度の管理を可能とするモード毎の個別制御を考える。

3. 装置の特性変換

3.1 特性変換法の構築

本報で提案する装置特性変換のためのブロック線図を Fig.2 に示す。同図に示す AC サーボモータ本来の特性は速度制御型特性(印加電圧 v に対して装置速度 \dot{x}_a が追従)であり、同特性は印加電圧 v と装置速度 \dot{x}_a を用いて、

$$\frac{\dot{x}_a}{v} = \frac{\beta}{s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0} \quad (1)$$

ただし, $\alpha_1, \alpha_0, \beta$: AC サーボモータの動特性係数
 s : ラプラス変数

で近似される。

従来法^{2),3)}では,マイナーループに周波数特性を持たせないとして,マイナーゲイン g_d, g_v を用いてモータ特性を変位制御型に変換してきた。本報では,エイリアシング防止用のアナログローパスフィルタ(LPF)とAD変換器の存在を考慮して,センサーの入力回路特性も含めた形の特性変換法を構築する。これは,比較的高い振動数までを対象とした恣意的な装置特性を達成するためには,センサー入力回路の微小な位相回りも大きくその結果に影響するためである。

式(1)の印加電圧 v は,操作電圧 u とマイナーゲイン g_d, g_v および2極ローパスフィルタで近似された変位センサーの入力回路特性と,同じく2極ローパスフィルタで近似された速度センサーの入力回路特性を用いて、

$$v = u - \left(\frac{b}{s^2 + a_1 s + a_0} g_d + \frac{d}{s^2 + c_1 s + c_0} g_v s \right) x_a \quad (2)$$

ただし, x_a : 装置ストローク

g_d, g_v : 装置ストローク x_a および装置速度 \dot{x}_a に掛かるマイナーゲイン

a_1, a_0, b : 変位センサーの入力回路係数

c_1, c_0, d : 速度センサーの入力回路係数

で表される。

後述する検証実験に用いる変位センサーおよび速度センサーの入力回路特性を Fig.3 に示す。同図には参考のため,制御対象である建物模型2次までの固有振動数を併記した。各図共, 印がAD変換器の出力応答の実験値を表し, 印が位相特性の実験値を表す。また,各図中の実線および破線は当該実験値の最小自乗近似値をそれぞれ表している。なお,そのときの入力回路係数は $a_1 = 1019.3$, $a_0 = 373670.1$, $b = 368909.6$, $c_1 = 911.5$, $c_0 = 307276.1$, $d = 305468.9$ である。これらの図から,双方共,建物模型2次振動数で約 10° の位相遅れが確認できる。

いま,式(2)を式(1)に代入して整理すると、

$$\frac{x_a}{u} = \frac{\beta(s^4 + Hs^3 + Is^2 + Js + K)}{s^7 + As^6 + Bs^5 + Cs^4 + Ds^3 + Es^2 + Fs + G} \quad (3)$$

ただし, $A = \alpha_1 + H$, $B = \alpha_0 + \alpha_1 H + I$,

$C = \alpha_0 H + \alpha_1 I + J$,

$D = \alpha_0 I + \alpha_1 J + K + \beta d_0 g_v$,

$E = \alpha_0 J + \alpha_1 K + \beta(b g_d + a_1 d g_1)$,

$F = \alpha_0 K + \beta(b c_1 g_d + a_0 d g_1)$,

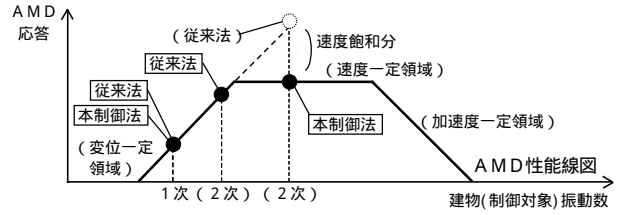


Fig.1 提案制御手法の概念
Concept of Control Method



Fig.2 装置特性変換のためのブロック線図
Block Diagram of Minor Loop

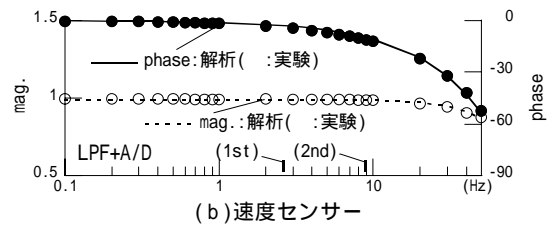
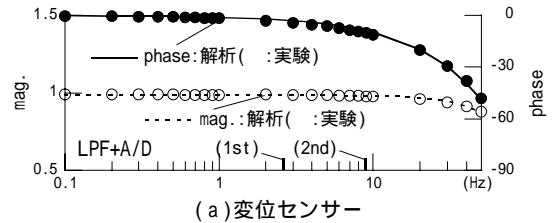


Fig.3 センサー入力回路の伝達特性
Transfer Function of Sensor

$$G = \beta b c_0 g_d, \quad H = a_1 + c_1, \quad I = a_0 + c_0 + a_1 c_1,$$

$$J = a_0 c_1 + a_1 c_0, \quad K = a_0 c_0$$

となる。この式(3)をマイナーゲイン g_d, g_v によって,希望する伝達関数の形に構成することを考える。従来法^{2),3)}では,これを極配置することによって,制御対象次数の固有振動数帯域で装置ストロークが一定となる変位制御型特性を構成する方法を示した。本報では建物1次振動数帯域で装置ストロークを一定とし,さらに同2次振動数帯域で装置速度を一定とする装置特性の構成法を考える。しかし,これを実現する極を直接的に決定することは難しい。そこで,本報では,式(3)の (x_a/u) および $(s \cdot x_a/u)$ に $s = i\omega$ を代入した式から振幅を表す ω の関数をそれぞれ $D(\omega), V(\omega)$ で,またそれらの ω の微分を表す $D'(\omega), V'(\omega)$ で表し, $D'(\omega)$ と $V'(\omega)$ をそれぞれ建物1次振動数帯域と2次振動数帯域でゼロとする条件より,マイナーゲイン g_d, g_v を求める方法を用いた。

3.2 特性変換法の検証

後述する検証実験に用いるAMD模型の特性を Fig.4 に

示す。各図には参考のため、制御対象である建物模型2次までの固有振動数を併記した。同図(a)の印はACサーボモータ本来の特性である速度制御型特性の実験値を表し、破線はそれを式(1)に適用した最小自乗近似値を表す。なお、このときのACサーボモータの動特性係数は、 $\alpha_1 = 120.2$ 、 $\alpha_0 = 45444.3$ 、 $\beta = 907544.0$ である。同図(b)の印は、3.1節で示す方法により求まるマイナーゲイン $g_d = 0.57107$ 、 $g_v = -0.03296$ を用いたときの操作電圧 u に対する装置ストローク x_a の実験値を表し、実線は式(3)から求まる操作電圧 u に対する装置ストローク x_a の解析値を表す。また、同図(b)の印と破線は、同様に、操作電圧 u に対する装置速度 \dot{x}_a の実験値と解析値をそれぞれ表す。なお、後述の検証実験では、式(3)を3極ローパスフィルタに低次元化⁴⁾して用いている。これらの結果から、提案する装置特性変換法の妥当性が確認できると共に、建物1次振動数近傍では操作電圧 u に対して装置ストローク x_a が追従し、同2次近傍では装置速度 \dot{x}_a が追従する特性に変換されていることが分かる。

4. 最適フィルタを含む制御システムの構成

水平1方向に駆動可能なAMDを最上層に搭載した、4層鉄骨建物を制御対象とした制御システム構成をFig.5に示す。本システムでは、建物模型奇数層の観測量と装置加速度を用いないとする制御構造制約を設けており、その際の建物模型モデルは、2次までを制御対象として、実験データだけを用いた低次元化手法⁵⁾により決定した。なお、建物模型における制御対象の特性は $f_1 = 2.56\text{Hz}$ 、 $f_2 = 9.07\text{Hz}$ 、 $h_1 = h_2 = 1\%$ である。また、装置加速度項は、制御力を含めた拡大系状態方程式を構成し、Mooreの低次元化手法⁶⁾を用いて取り除いている。

本システムが従来法^{2),3)}と異なる点は、個別制御を達成するために、フィルタと可変ゲイン(スカラーゲイン)をモード毎に設定することにある。

いま、1次制御用として設定されるフィルタ特性を、

$$\dot{X}_{f1} = A_{f1}X_{f1} + B_{f1}u_{s1}, \quad u_{z1} = C_{f1}X_{f1} \quad (4)$$

と表す。式(4)と、同様の定式化で得られる2次制御用として設定されるフィルタ特性とを一つにまとめると、

$$\dot{X}_f = A_f X_f + B_f U_f, \quad U_{zg} = C_f X_f \quad (5)$$

ただし、

$$X_f^T = (X_{f1}^T \quad X_{f2}^T), \quad U_f^T = (u_{s1} \quad u_{s2}),$$

$$A_f = \begin{bmatrix} A_{f1} & [0] \\ [0] & A_{f2} \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} B_{f1} & \{0\} \\ \{0\} & B_{f2} \end{bmatrix}, \quad C_f = \begin{bmatrix} C_{f1} & (0) \\ (0) & C_{f2} \end{bmatrix}$$

となる。

低次元化された建物模型特性とAMD特性、およびフィルタ特性を含めた拡大系状態方程式は、建物模型の状態量を添え字 s 、AMDの状態量を添え字 a 、フィルタの状態量を添え字 f でそれぞれ表すと、

$$\dot{X}_G = A_G X_G + B_G U_G \quad (6)$$

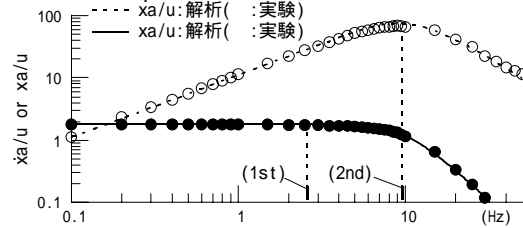
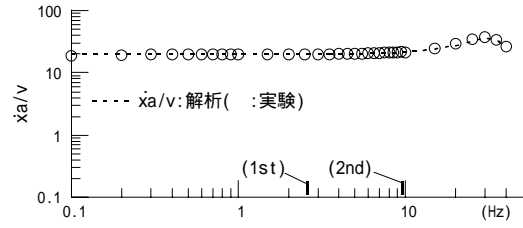


Fig.4 AMDの伝達特性
Transfer Function of AMD

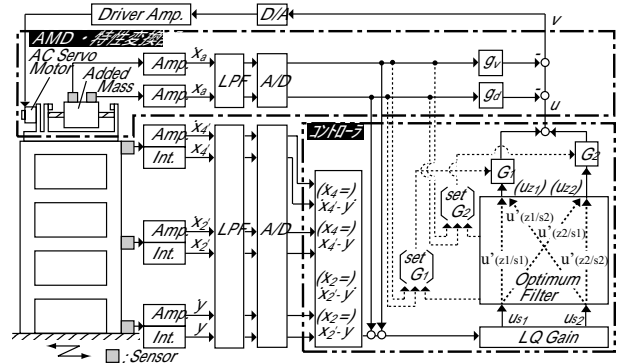


Fig.5 制御システムの構成
Block Diagram of Control System

ただし、

$$X_G^T = (X_s^T \quad Z_a^T \quad X_f^T),$$

$$A_G = \begin{bmatrix} A_s & B_s(0 \quad 0 \quad 1) & [0] \\ [0] & A_a & \begin{bmatrix} 0 \\ B_a \end{bmatrix} \\ [0] & [0] & A_f \end{bmatrix} C_f, \quad B_G = \begin{bmatrix} [0] \\ B_f \end{bmatrix}$$

として表される⁵⁾。

式(6)を用いて最適制御理論から求まるLQゲインベクトル K を、

$$K = (K_s \quad K_a \quad K_f) \quad (7)$$

ただし、 K_s, K_a, K_f : 建物模型, AMD, およびフィルタへのLQゲイン

と表し、式(6)の制御量 U_G をフィルタへのゲイン K_f と他のゲインに分離すれば、

$$U_G = -([0 \quad 0 \quad K_f] X_G - (K_s \quad K_a \quad [0]) X_G) \quad (8)$$

となる。式(8)の第2項を U_R とし、第1項を式(6)の A_G 内部に移項すると、式(6)は、

$$\dot{X}_G = A_{Gf} X_G + B_G U_R \quad (9)$$

ただし,

$$A_{Gf} = \begin{bmatrix} A & BC_f \\ 0 & A_f - B_f K_f \end{bmatrix}, \quad U_R = -(K_s \quad K_a \quad [0])X_G$$

となる。式(9)の A_{Gf} は,式(5)で当初設定したフィルタの特性マトリクス A_f に,フィルタへのLQゲイン K_f を用いることで,

$$A_{f(opt)} = A_f - B_f K_f \quad (10)$$

に修正されるものであり,式(10)が最適フィルタの特性マトリクスとなる。

最適フィルタの状態方程式と出力方程式は, $U_R = U_f$ の関係を考慮すると,

$$\dot{X}_f = A_{f(opt)}X_f + B_f \begin{Bmatrix} u_{s1} \\ u_{s2} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} u_{z1} \\ u_{z2} \end{Bmatrix} = C_f X_f \quad (11)$$

で表される。式(11)より,最適フィルタでは操作量 u_{s1} (あるいは u_{s2}) から u_{z1} (あるいは u_{z2}) として流れる出力信号だけでなく,他方からの干渉成分も生じることが分かる。このときの,フィルタへの操作量を u_{s1} とした伝達関数 W (u_{s2} も同様の形で構成)は,

$$W_{(z1/s1)} = (C_{f1}(0)) [sI - A_{f(opt)}]^{-1} \begin{Bmatrix} B_{f1} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$W_{(z2/s1)} = \begin{pmatrix} 0 & C_{f2} \end{pmatrix} [sI - A_{f(opt)}]^{-1} \begin{Bmatrix} B_{f1} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

で表される。

実際の制御ではデジタルフィルタとして用いるため,

$$s = \frac{2}{T_d} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) \quad (T_d: \text{サンプリング時間}) \quad (14)$$

の関係から,フィルタの次数を n_f とし,例えば,式(12)の伝達関数を,

$$H_{(z1/s1)} = \frac{u_{(z1/s1)}}{u_{s1}} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_f} z^{-n_f}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_f} z^{-n_f}} \quad (15)$$

あるいは,

$$u_{(z1/s1)}(k) = \sum_{i=1}^{n_f} b_i u_{s1}(k-i) - \sum_{i=1}^{n_f} a_i u_{(z1/s1)}(k-i) \quad (16)$$

に変換すると,最終的なデジタルフィルタの出力は,

$$u_{z1}(k) = \dot{u}_{(z1/s1)}(k) + u_{(z1/s2)}(k) \quad (17)$$

$$u_{z2}(k) = \dot{u}_{(z2/s1)}(k) + u_{(z2/s2)}(k) \quad (18)$$

としてそれぞれ表される。コントローラ内部における最適フィルタの出力計算に式(17)と(18)を用いることによって,式(11)の状態量を逐次計算することなく,フィルタの出力を求めることが可能となる。

当初設定したフィルタと, $T_d = 5m \cdot sec$ としてそれを修正したデジタル最適フィルタの関係をFig.6に示す。当初設定した1次制御用フィルタはハイパスカットオフ振動数を $1.0Hz$, ローパスカットオフ振動数を $2.6Hz$ とし, 2次制御用フィルタはハイパスのそれを $6.0Hz$, ローパスのそれを $9.1Hz$ とした,4極バターワース型バンドパスフィルタとしてそれぞれ構成される。同図・各図には参考のため,建物模型における制御対象次数の固有振動数を併記

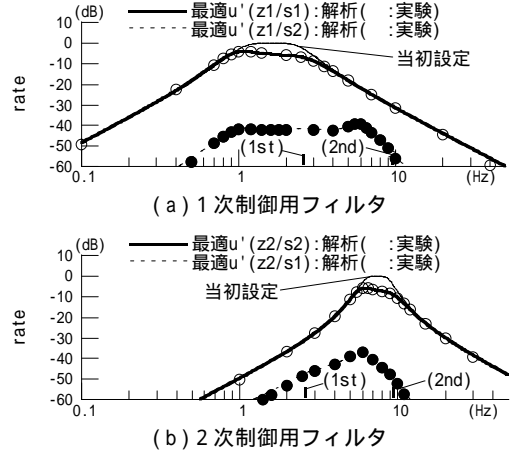


Fig.6 当初設定フィルタと最適フィルタの比較
Comparison between Original and Optimum Filter

した。同図(a),(b)共に,当初設定フィルタでは対応する次数の振動数をローパス側のカットオフとしているが,最適フィルタでは最適制御を実現するため,その通過帯域をそれぞれ若干広げていることが分かる。

5. 可変ゲインの設定

装置ストロークおよび装置速度を指令演算段階で直接管理する可変ゲイン制御は,4章のFig.5に示す1次制御用の可変ゲイン G_1 と,2次制御用の可変ゲイン G_2 を用いて行われる。3章で示す通り,A MDの装置特性は,建物模型の1次振動数帯域では変位制御型に,同2次振動数帯域では速度制御型となるように構成されている。このことから,最適フィルタを通過した1次制御用の可変ゲインに入力される信号 u_{z1} は装置ストロークの指令信号であり,2次制御用の u_{z2} は装置速度の指令信号となる。しかし,最終的な装置の動きは,1次制御用と2次制御用の可変ゲイン G_1, G_2 を通過した信号の加算値で決まる。このことより, u_{z1} と u_{z2} から,それぞれに対応する速度成分と変位成分を知る必要がある。そこで, u_{z1} を微分することによって,また u_{z2} を積分することによって,1次制御用および2次制御用の仮想ポテンシャルストロークと同速度を,それぞれ,

$$\bar{D}_1 = \sqrt{(G_1^* u_{z1})^2 + (G_1^* \dot{u}_{z1} / \omega_1)^2} \quad (19)$$

$$\bar{V}_1 = \sqrt{(G_1^* \dot{u}_{z1})^2 + (G_1^* u_{z1} \omega_1)^2} \quad (20)$$

$$\bar{D}_2 = \sqrt{(G_2^* \bar{u}_{z2})^2 + (G_2^* u_{z2} / \omega_2)^2} \quad (21)$$

$$\bar{V}_2 = \sqrt{(G_2^* u_{z2})^2 + (G_2^* \bar{u}_{z2} \omega_2)^2} \quad (22)$$

ただし, \bar{u}_{z2} : コントローラ内で行われる積分信号

ω_1, ω_2 : 建物模型1次, 2次の固有円振動数と定義する。

時々刻々の可変ゲイン G_1, G_2 は,式(19)~(22)の値が,設定されたストロークと速度を超えないように適宜変更される。今回の可変ゲイン制御では,建物模型1次の制御

を重視し、同2次の制御はその装置余裕分によって行うこととした。よって、1次で装置ストロークが飽和する可変ゲイン G_1 が1.0以外の場合、同 G_2 はゼロとして設定される。なお、そのとき修正される可変ゲイン G_1, G_2 の上限を1.0とし、最も大きな制振効果が達成できる $G_1=1.0, G_2=1.0$ 時のLQゲインを、以降、100%ゲインと呼ぶ。

6. 検証実験時のLQゲイン

可変ゲイン G_1, G_2 をそれぞれ1.0とした100%ゲイン時の重み係数は、制御対象を建物模型2次までとして、モード座標上における建物速度の1次と2次に与える方法で決定する。この100%ゲインは、建物模型の制御対象次数(1次と2次)の極の軌跡が円上にある最大の重みを用いたときのLQゲインを用いる。このことは、制御力が建物模型への減衰力として作用する場合を表すこととなる。この場合、スカラー量の可変ゲイン G_1, G_2 を変更すると、減衰量が変更される制御が可能となる。

今回用いた建物模型の解析モデルに、各種のLQゲインと可変ゲインを固定した場合の、制御系の各次の極をS平面上に表した結果をFig.7に示す。同図中の印は非制振時の、印は100%ゲイン時の極をそれぞれ表す。また、○印は可変ゲイン G_1, G_2 を双方とも一律に0.75, 0.5, 0.25, 0.1に変更した場合の、印は制御力に掛かる重み係数を R として、この R を0.5, 0.1, 0.05に変更することで100%ゲイン時($R=1.0$)からさらに制御効果を高めようとした場合の極をそれぞれ表す。同図から、印で示す100%ゲインが減衰量のみを変更可能な最大ゲインとなること、また印の結果から可変ゲイン G_1, G_2 を用いて弱い制御に変更すると、減衰力が変更される制御となっていることが分かる。

可変ゲイン G_1, G_2 を双方とも一律に0.75, 0.5, 0.25, 0.1に変更した場合の建物模型の減衰定数をFig.8に示す。同図には参考のため、非制振時の場合を0%ゲインとして併記している。同図中のポイントマークは自由振動から求めた実験結果を、ラインはFig.7の極から求まる解析結果をそれぞれ表す。同図から、実験結果と解析結果はよく一致していること、制御対象次数の減衰性能は可変ゲイン G_1, G_2 の大きさに比例していることが分かる。

7. 提案制御手法の検証

7.1 伝達関数による検証

建物模型最上層・絶対加速度の振動台に対する伝達特性をFig.9に示す。同図・各図中、印は非制振時の実験結果を、破線はその解析結果をそれぞれ表す。また、印は制振時の実験結果を、実線はその解析結果をそれぞれ表す。なお、同図の制振時の相違は可変ゲイン G_1, G_2 の設定値の違いであり、6章で示す、100%および50%ゲインを用いた計4種類の組み合わせの結果をそれぞれ表している。同図から、実験結果と解析結果はよく一致していること、可変ゲイン G_1, G_2 を個別に変更する制御を行った場

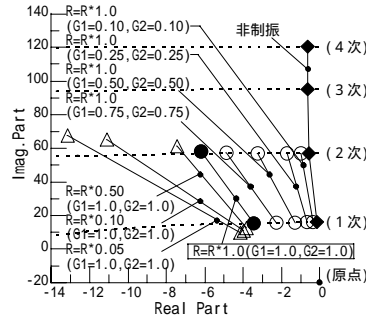


Fig.7 極の軌跡
Root Loci

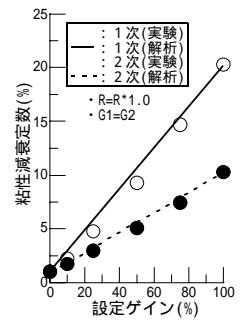


Fig.8 減衰性能
Damping
Characteristics

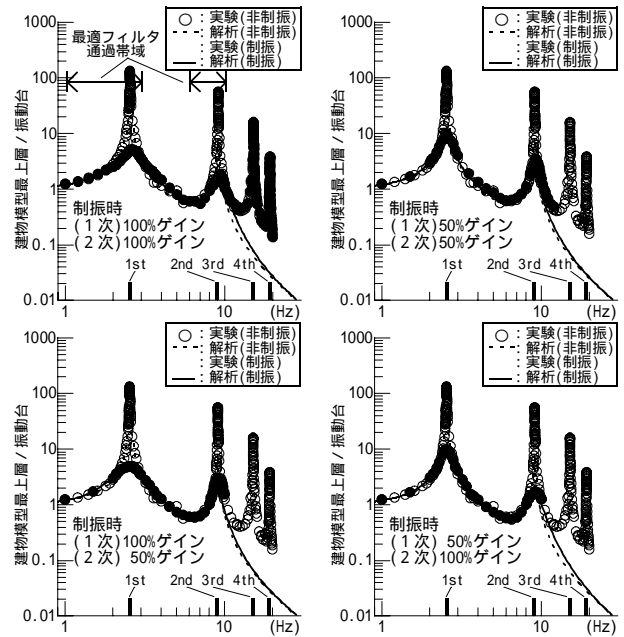


Fig.9 加速度伝達特性(非制振時と制振時)
Transfer Function of Absolute Acceleration

合でも、可変ゲイン G_1, G_2 を一律に変更した場合と同等の制御効果が得られることが分かる。

7.2 時刻歴応答による検証

建物模型1次と2次の振動数成分を対象として作成した合成波形を用いて建物模型を加振した、振動台実験結果をFig.10に示す。このときのAMD模型のストロークは2.5cmに、同速度は41cm/sにそれぞれ設定している。これらの図から、装置ストローク、装置速度共に、設定値をオーバーしない良好なサチュレーション制御が実現されていることが分かる。また、5章で示す通り、今回は建物模型1次の制御を重視し、同2次の制御にはその余裕分を用いて制御を行うため、可変ゲイン G_1 が機能している時間帯域では2次制御用の可変ゲイン G_2 は設定通りゼロとなっていることが分かる。

Taft NS地震波を振動台入力に用いたときの時刻歴応答結果をFig.11に示す。ただし、入力波の卓越振動数が建物模型振動数近傍となるように時間幅を調整して用いて

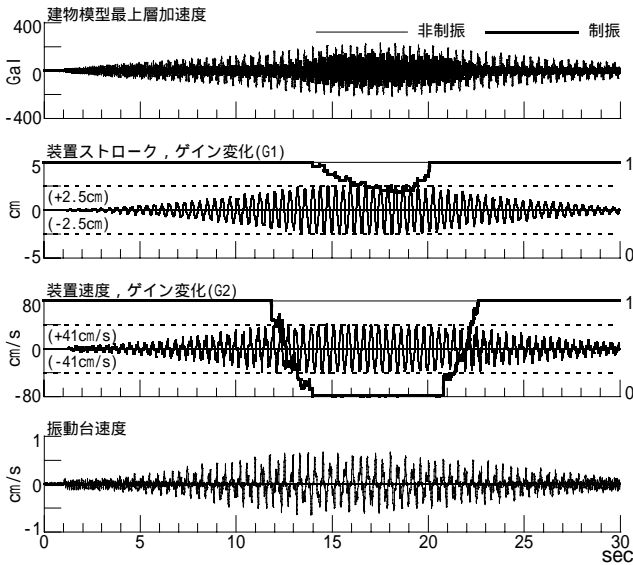


Fig.10 合成波による加振実験結果
Time Response under Synthesized Wave

いる。同図(a)は、その時間幅を建物模型1次近傍となるように、同図(b)は同2次近傍となるようにそれぞれ変更した結果である。なお、同図(a)の場合には装置ストロークに5.0cm、装置速度に150cm/sの制約を設けており、同図(b)の場合には装置ストロークに6.5cm、装置速度に58cm/sの制約を設けている。これらの図より、Fig.10の結果と同様に、装置ストロークおよび装置速度を最大限活用した制御を実現していることが分かる。

Fig.10とFig.11の結果は全てACサーボモータを提案する変換法で特性変換して用いたものであり、バンドパスフィルタとして構成される最適フィルタの効果とあいまって、装置ストロークや装置速度に過渡的および定常的なドリフトが現れていないことも、併せて確認される。

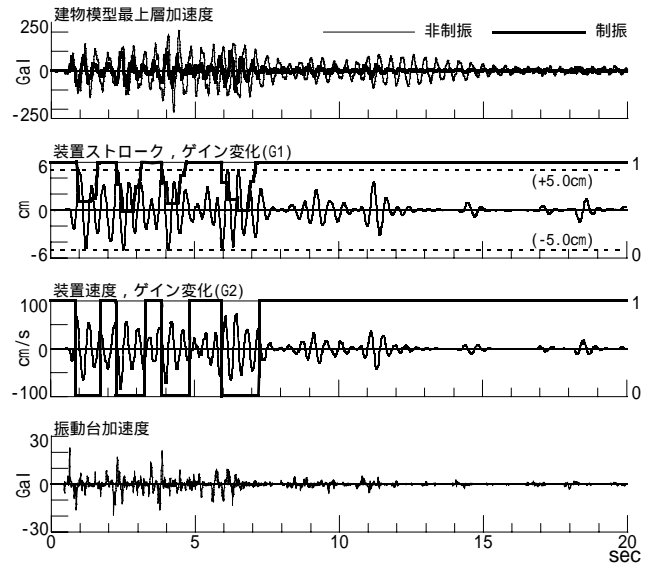
8. おわりに

従来法^{2),3)}で達成した装置ストローク制約に、装置速度の制約を付与した制御手法を提案し、その有効性を振動台実験によって確認した。今後は、本提案制御手法を「AVICS-2」などの実機レベルで使用する予定である。

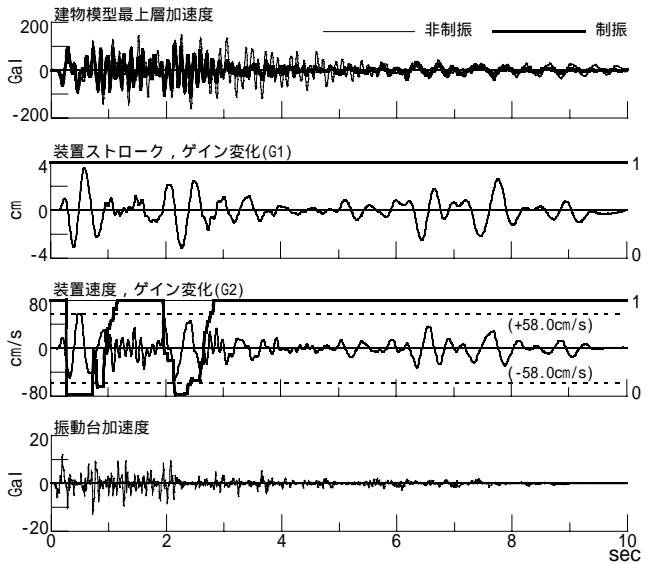
最後に、本報告で提案する制御手法はモード毎に制御を行うため、本制御に装置のトルク制約を導入することは、本制御法を簡単に拡張することによって達成できることを付記しておく。

参考文献

- 1) 蔭山満, 奥田浩文, 鈴木哲夫, 安井譲: 可変ゲインを用いたAMDストローク・サチュレーション制御の研究(その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2(構造), pp.773 ~ 776, (1997)
- 2) 奥田浩文, 蔭山満, 鈴木哲夫, 安井譲: Hybrid Mass Driver(HMD)の実用化に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No.58, pp.7 ~ 12, (1999)



(a) 入力波の卓越振動数を建物1次近傍に調整した場合



(b) 入力波の卓越振動数を建物2次近傍に調整した場合

Fig.11 非正常外力による加振実験結果
Time Response under Earthquake

- 3) 奥田浩文, 蔭山満: スピルオーバー防止とAMDストローク制約下における可変ゲインの設定を考慮した最適制御手法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第532号, pp.87 ~ 94, (2000)
- 4) E.C.Levi: Complex-Curve Fitting, IRE Trans.on Automatic Control, Vol.AC-4, pp.37 ~ 44, (1959)
- 5) 奥田浩文, 蔭山満: Hybrid Mass Driver(HMD)の実用化に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No.62, pp.49 ~ 56, (2001)
- 6) BRUCE C. MOORE: Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.AC-26, No.1, pp.17 ~ 32, (1981)