

振動台加振制御を目的とした 加速度フィードバックによる 3変数制御器設計方法

梶原浩一¹・佐藤栄児¹・光田真旅²・渡辺紗綾香²・田川泰敬²・高井茂光³

¹防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

²東京農工大学 生物システム応用科学研究科 (〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16)

³西松建設(株)技術研究所 建築技術研究課 (〒243-0303 神奈川県 愛甲郡 愛川町中津 4054)

The National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) is now conducting for constructing a three-dimensional full scale earthquake testing facility (E-defense). The shaking table in this facility will be equipped basic controller designed by Three Variable Control (TVC) Technique. However the procedure to determine the control gain has been entrusted to the experience of the person who adjusts the gain. Therefore the procedure has not been clarified. To equip a more highly developed control, we should understand the performance of the TVC. This study shows the design technique of TVC and FVC by mathematical process.

Key Words : Three variable control, Four variable control, Shaking table, Vibration control, Control Method

1. はじめに

強震動による構造物の破壊過程を解明するため、現在、兵庫県三木市に実大三次元震動破壊実験装置⁽¹⁾ (以下「E-ディフェンス」) が建設中である。このE-ディフェンスは、震動台質量750ton、搭載面積20m×15m、最大搭載質量1200tonの世界最大規模であり、2005年度に完成する。

このE-ディフェンスでは、地震動を再現するために3変数制御手法 (Three Variable Controller; 以下TVC) による制御器が実装される。今後、さらに高度な制御アルゴリズムの開発、適用の必要性が述べられており⁽²⁾、それらの検討を行うためには、この制御手法の性能を十分に把握する必要がある。しかし、この3変数制御手法のゲイン決定方法は調整者の経験に委ねられる部分が大きく、一般には明らかとなっていない。このため、予めTVCの適用性能を把握するためには、1つの加振軸方向で6個のパラメータを試行錯誤的に決定し、その後シミュレーションを行わなくてはならない。そこで本研究では、まず目標とする閉ループ系伝達関数を決定することでパラメータ決定を比較的容易に行えるTVCの設計方法を提案した。また、それを拡張した4変数制御器 (Four Variable Controller; 以下FVC) の設計方法についても述べる。

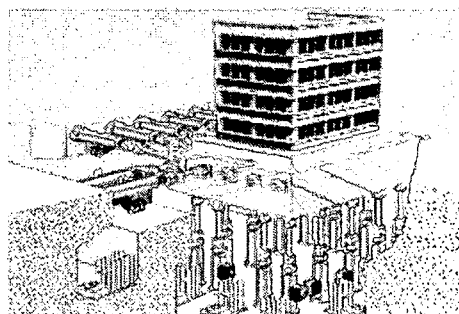


Fig. 1 実大三次元震動破壊実験装置

2. TVC制御手法

図1にE-ディフェンスの概略図を示す。このE-ディフェンスに実装されるTVCは、図2に示すように目標値と制御対象の状態量 (変位, 速度, 加速度) の偏差にフィードバックゲインを乗算して制御対象に戻すフィードバック部と、目標値の変位, 速度, 加速度それぞれにフィードフォワードゲインを乗算し制御対象に入力するフィードフォワード部により構成される。E-ディフェンスでは、この制御手法を基準として更に高度な制御アルゴリズムを実装していく予定ではあるが、そのためにもまずはこのTVC手法による制御性能の把握が必要となる。

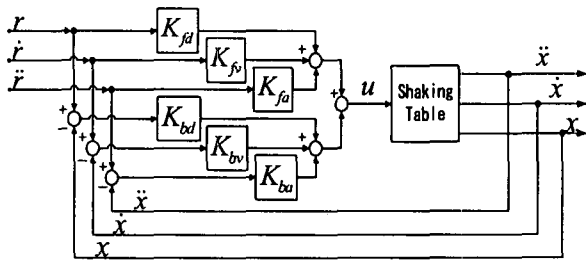


Fig.2 3変数制御

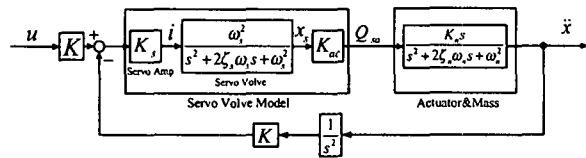


Fig.3 振動台プラント

(1) 振動台モデルの低次元化

TVC の設計にあたり、振動台の数学的モデルを定義する⁽³⁾。モデルの全体像を図3に示す。振動台を加速度出力フィードバックで操作するため、ここでは操作量から振動台加速度までを数学的モデルの対象とする。操作量は電圧で与えられ、電圧はサーボアンプを経て電流に変換される。

$$i = K_s u \quad (2-1-1)$$

K_s : サーボアンプゲイン

サーボアンプによって変換された電流はサーボ弁内のスプールを動作させ、スプールの変位がサーボ弁の動作へと伝わる。電流からサーボ弁までは伝達関数で二次遅れ系に近似する。ここで s はラプラス演算子である。

$$x_s = \frac{\omega_s^2}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2} i \quad (2-1-2)$$

$\left\{ \begin{array}{l} x_s : \text{サーボ弁スプール変位} \\ \omega : \text{サーボ弁固有振動数} \\ \zeta_s : \text{サーボ弁減衰係数} \end{array} \right\}$

サーボ弁の動作から油の流量までは線形近似で求め、変位-流量変換係数によって代表する。

$$Q_{sa} = K_{ac} x_s \quad (2-1-3)$$

$\left\{ \begin{array}{l} Q_{sa} : \text{サーボ弁出力流量} \\ K_{ac} : \text{変位 流量変換係数} \end{array} \right\}$

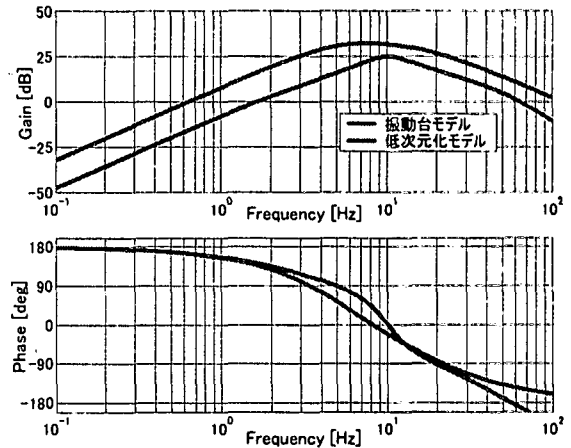


Fig.4 振動台モデル低次元化

サーボ弁出力流量は油圧アクチュエータの動作シリンダを経てアクチュエータ加速度 \ddot{x}_a へと変換される。

$$\frac{x_a s^2}{Q_{sa}} = \frac{K_n s}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-1-4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_n = \sqrt{(cC_{oi} + A_o^2) / Mk_o} \\ 2\zeta_n \omega_n = (MC_{oi} + ck_o) / Mk_o \\ K_n = A_o / Mk_o \end{array} \right\}$$

$\left\{ \begin{array}{l} c : \text{加振機粘性抵抗} \\ C_{oi} : \text{加振機流量損失係数} \\ A_o : \text{加振機受圧面積} \\ M : \text{加振機・振動台質量系} \\ k_o : \text{駆動系の剛性を表す係数} \end{array} \right\}$

以上をまとめて、操作電圧から振動台加速度までの伝達関数は以下のように表される。

$$\frac{x_a s^2}{u} = \frac{K_s \omega_s^2 K_{ac}}{s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2} \cdot \frac{K_n s}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2-1-5)$$

本研究でモデル化の対象とした西松建設(株)所有の中型振動台には、変位比例制御が振動台のシステムの一部として内蔵されており、この制御回路を除去して実験を行うことは困難である。したがって制御対象としての振動台の数学モデルにもこの変位比例制御を内蔵しなければならない。変位比例制御を内蔵した振動台の数学モデルは下記の式となる。

$$\frac{x_a s^2}{u} = \frac{KK_s K_{ac} K_n \omega_s^2 s^2}{(s^2 + 2\zeta_s \omega_s s + \omega_s^2)(s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2)s + KK_s K_{ac} K_n \omega_s^2}$$

K : 振動台内蔵変位比例制御ゲイン

(2-1-6)

制御器の設計の指針を明確にするため、本研究では振動台モデルの低次元化を行った。

$$\frac{x_a s^2}{u} = \frac{m_1 s^2}{s^3 + h_1 s^2 + h_2 s + h_3} \quad (2-1-7)$$

図4のように、この伝達関数のボード線図を描き、そのグラフを「包括」する形状の伝達関数を導き出す。「包括」とは、伝達関数のゲインにおいては可能な限り同じ形状で全体的に5dBほど隆起させ、位相では全体的にグラフの勾配を緩やかにし、制御帯域の中心部分（今回の場合は10Hz付近）で交差する様に設計した。ここではこの伝達関数を振動台の低次元化モデルと呼ぶ。

(2) フィードバックパラメータの決定

この低次元化モデルに対して、制御器を設計する。制御器はTVCと3次のHigh-Pass-Filter、2次のLow-Pass-Filterによって成り立つ。このうちHigh-Pass-Filterの2次はTVCの分母を相殺する。よってFilterは入力電圧のオフセットを除去するHigh-Pass-Filter1次、高周波ノイズをカットし、モデルの有効周波数帯域を定めるLow-Pass-Filter2次となる。

制御器の設計においてフィードフォワードとフィードバック各ゲインの定義を行う。TVCの概念においては目標値にけるフィードフォワードゲインと偏差にけるフィードバックゲインを定義したが、制御器の設計においてはその定義が異なる。図2で定義した各ゲイン $\{K_{fd}, K_{fv}, K_{fa}, K_{bd}, K_{bv}, K_{ba}\}$ をここでは図5~6の様に目標側ゲイン K_{fv} と加速度センサ側ゲイン K_{bv} とに分解、統合する。 K_{fv} ゲインと K_{bv} ゲインにはそれぞれ、下記の伝達関数を定義する。

$$K_{fv} = \frac{(K_{fa} + K_{ba})s^2 + (K_{fv} + K_{bv})s + (K_{fd} + K_{bd})}{s^2} \quad (2-2-1)$$

$$K_{bv} = \frac{K_{ba}s^2 + K_{bv}s + K_{bd}}{s^2}$$

本研究では最初に $K_{fv} = K_{bv}$ とすることで、目標値と状態量との偏差にゲインとFilterをかけ、入力信号とするフィードバック制御器として設計する。これは $\{K_{fa}, K_{fv}, K_{fd}\}$ の各ゲインは制御器の安定性に影響しないため K_{bv} よりも自由度がたかく、そのため当初は K_{bv} ゲインの決定で安定性を確保することが重要となるためである。TVCとFilterを組み合わせた制御器の伝達関数を、

$$\begin{aligned} & \text{Controller} \times \text{Filter} \\ &= \frac{K_{fa}s^2 + K_{bv}s + K_{bd}}{s^2} \times \frac{s}{s-\omega_1} \cdot \frac{s}{s-\omega_2} \cdot \frac{s}{s-\omega_3} \cdot \frac{\omega_4}{s-\omega_4} \cdot \frac{\omega_5}{s-\omega_5} \\ &= \frac{n_1 s^3 + n_2 s^2 + n_3 s}{s^5 + k_1 s^4 + k_2 s^3 + k_3 s^2 + k_4 s + k_5} \end{aligned} \quad (2-2-2)$$

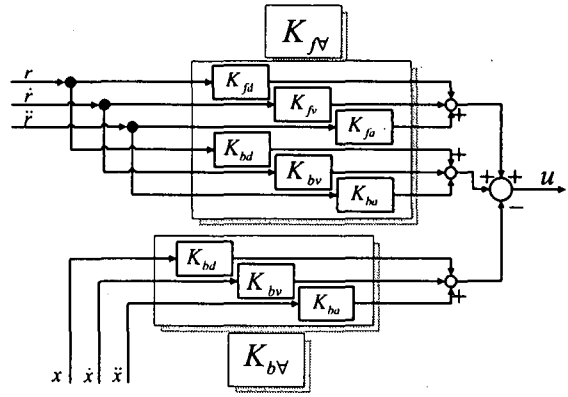


Fig.5 TVCブロック線図, 分解

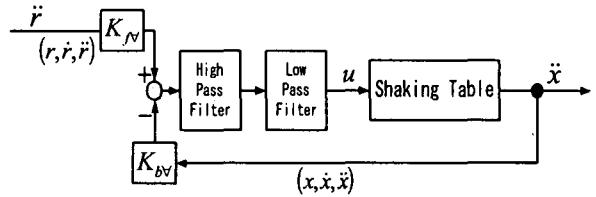


Fig.6 TVCブロック線図, 統合

とすると、TVC, Filter, 低次元化モデルの全体の伝達関数は、

$$\frac{\ddot{x}_u}{u} = \frac{(n_1 s^3 + n_2 s^2 + n_3 s) \cdot (m_1 s^2)}{(s^5 + k_1 s^4 + k_2 s^3 + k_3 s^2 + k_4 s + k_5) \cdot (s^3 + h_1 s^2 + h_2 s + h_3) + (n_1 s^3 + n_2 s^2 + n_3 s) \cdot (m_1 s^2)} \quad (2-2-3)$$

となる。

この伝達関数の8次の分母に対して、極配置 $P_1 \sim P_8$ から導き出した係数 $p_1 \sim p_8$ との比較を行う。

極配置による分母の係数を以下のように定義する。

$$\begin{aligned} & (s - P_1)(s - P_2)(s - P_3)(s - P_4)(s - P_5)(s - P_6)(s - P_7)(s - P_8) \\ &= s^8 + p_1 s^7 + p_2 s^6 + p_3 s^5 + p_4 s^4 + p_5 s^3 + p_6 s^2 + p_7 s + p_8 \end{aligned} \quad (2-2-4)$$

得られた分母の各係数と、全体の伝達関数の分母の係数を比較する。

極配置の係数を、

$$\{Pole\} = \{1 \quad p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4 \quad p_5 \quad p_6 \quad p_7 \quad n_3\}^T \quad (2-2-5)$$

と行列で定義し、TVCとFilterからなる伝達関数の分子分母の係数を、

$$\{Cont\} = \{1 \quad k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad n_1 \quad n_2 \quad n_3\}^T \quad (2-2-6)$$

と定義する。さらに低次元化した振動台モデルの係数を 9×9 の行列で定義する。

$$\{Model\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 \\ 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2-2-6)$$

これらの行列の定義より、系全体の伝達関数の分母と極配置による係数の関係は、以下の行列の等式で表現される。

$$\begin{pmatrix} 1 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 \\ 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} \quad (2-2-7)$$

ここで行列 $\{Model\}$ の逆行列をかけることにより、求める制御器の伝達関数の係数を表す行列である $\{1 \ k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ n_1 \ n_2 \ n_3\}^T$ の値を示す式を得られる。

$$\begin{pmatrix} 1 \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 1 & 0 & 0 & m_1 \\ 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 & h_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & h_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \end{pmatrix} \quad (2-2-8)$$

この行列の値により TVC の各ゲインと Filter の伝達関数が得られる。(2-2-2)より、

$$\begin{aligned} & \frac{n_1 s^3 + n_2 s^2 + n_3 s}{s^5 + k_1 s^4 + k_2 s^3 + k_3 s^2 + k_4 s + k_5} \\ &= \frac{n_1 s^3 + n_2 s^2 + n_3 s}{(s - \omega_1)(s - \omega_2)(s - \omega_3)(s - \omega_4)(s - \omega_5)} \\ &= \frac{\frac{n_1}{\omega_4 \omega_5} s^2 + \frac{n_2}{\omega_4 \omega_5} s + \frac{n_3}{\omega_4 \omega_5}}{s^2} \cdot \frac{s^3}{(s - \omega_1)(s - \omega_2)(s - \omega_3)} \cdot \frac{\omega_4 \omega_5}{(s - \omega_4)(s - \omega_5)} \end{aligned} \quad (2-2-9)$$

(但し、分母の極の $\omega_1 \sim \omega_5$ は添え字の数字の大き

い順に周波数の高い極を表すものとする。) よって、

$$\begin{aligned} n_1/(\omega_4 \omega_5) &: \text{加速度偏差ゲイン } K_{ba} \\ n_2/(\omega_4 \omega_5) &: \text{速度偏差ゲイン } K_{bv} \\ n_3/(\omega_4 \omega_5) &: \text{変位偏差ゲイン } K_{bd} \\ \text{High-Pass-Filter-Pole} & \dots \omega_1, \omega_2, \omega_3 \\ \text{Low-Pass-Filter-Pole} & \dots \omega_4, \omega_5 \end{aligned}$$

となる。

これにより TVC における K_{bv} の各係数と Filter のカットオフ周波数が決定する。

(3) 制御系安定性能の向上

極配置のみによるこの段階で、位相問題は別として、目的の制御帯域で入力と出力のゲインが一致するか、またはその状態に限りなく近い状態が得られるようであれば、設計した TVC は波形再現性能が良好な制御器であることがいえる。

しかしながら、TVC を設計するにあたり震動台の数学モデルを構築する際に幾つかの装置を線形近似したことでモデルにある程度の誤差が生じ、または震動台に搭載した試験体が何らかの状態の変化(地震波による試験体の倒壊等)を余儀なくされる事態を想定すると、制御系安定性能⁽⁴⁾についても考慮しなければならない。

制御器の不安定な状態を作る最大の要因はフィードバック制御器の過剰な感度である。そこで制御系安定性能を向上させる目的でフィードバック信号と目標値からなる偏差信号の入力量を軽減させ、その信号の不足分をフィードフォワード信号を増大させることで補うよう設計することで制御系安定性能を高めることが可能となる。

フィードフォワード信号を増大させることは、 $\{K_{fd}, K_{fv}, K_{fd}\}$ からなるフィードフォワードゲインの値を大きく設計することで達成でき、このゲインの増加に伴ってフィードバックゲインを同時に減少させなければならない。

(5) フィードフォワードパラメータ決定

次に $K_{fv} \neq K_{bv}$ として K_{fv} の決定を行う。 K_{fv} の各係数は極の安定には関与しないのでボード線図を参考にしながら極配置 p_1, p_2 と全体のゲイン K_G により決定してゆく。極(分母)に変化はなく、全体の伝達関数は以下の式になる。

$$\frac{\ddot{x}_a}{u} = \frac{K_G s(s - p_{f1})(s - p_{f2}) \cdot (m_1 s^2)}{(s - P_1)(s - P_2)(s - P_3)(s - P_4)(s - P_5)(s - P_6)(s - P_7)(s - P_8)} \quad (2-4-1)$$

極配置により伝達関数の概形は決定するが、次にボード線図のゲインが 0dB を示すように K_G を決定する。この伝達関数は分子に s が 3 つ存在することが分かるので、この数式を 3 次の High-Pass-Filter と、それ以外の数式の部分に分離すると以下の様に表される。

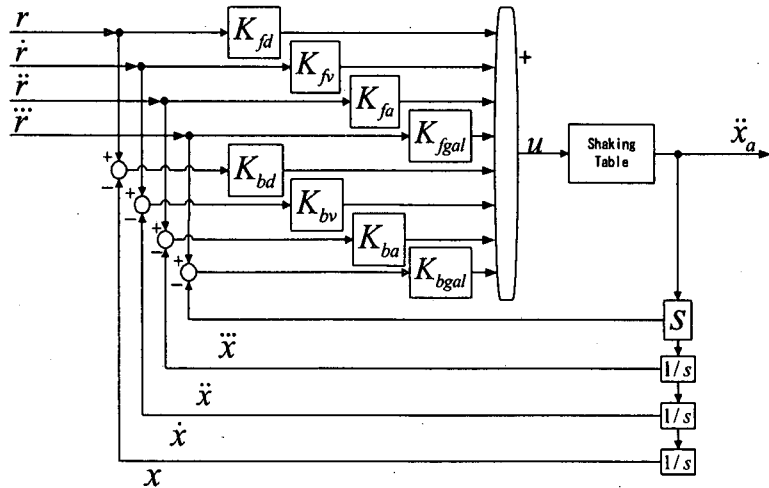


Fig.7 FVC ブロック線図

$$\frac{\ddot{x}_a}{u} = \frac{s^3}{(s-p_1)(s-p_2)(s-p_3)} \frac{K_G(s-p_{f1})(s-p_{f2})m_1}{(s-p_4)(s-p_5)(s-p_6)(s-p_7)(s-p_8)} \quad (2-4-2)$$

(但し、分母の極の $p_1 \sim p_2$ は添え字の数字の大きい順に周波数の高い極を表すものとする。)

式左側は High-Pass-Filter として機能し、極より高周波の帯域で 0dB を示すが、右側の式の挙動は不明である。そこで式右側が極より低周波側の周波数帯域において 0dB を示すように K_G を設定することで、2つの式を重ね合わせた時に理想的な台形型のゲインのボード線図を描くことが出来る。

つまり限りなく 0Hz に近い周波数帯域において伝達関数が 0dB を示せばよいので、

$$\begin{aligned} \text{Gain} &= \lim_{s \rightarrow 0} 20 \log \left| \frac{K_G(s-p_{f1})(s-p_{f2})m_1}{(s-p_4)(s-p_5)(s-p_6)(s-p_7)(s-p_8)} \right| = 0(\text{dB}) \\ \lim_{s \rightarrow 0} \left| \frac{K_G(s-p_{f1})(s-p_{f2})m_1}{(s-p_4)(s-p_5)(s-p_6)(s-p_7)(s-p_8)} \right| &= 1 \end{aligned} \quad (2-4-3)$$

$$K_G = \lim_{s \rightarrow 0} \left| \frac{(s-p_4)(s-p_5)(s-p_6)(s-p_7)(s-p_8)}{(s-p_{f1})(s-p_{f2})m_1} \right| = \frac{p_4 p_5 p_6 p_7 p_8}{p_{f1} p_{f2} m_1} \quad (2-4-4)$$

となる。

以上の手法により、 K_{fv} の各係数を決定することとなる。

(5) FVC

4変数制御 (Four Variable Controller; 以下FVC) は、TVCと同じく目標値と状態量を一致させる動作を基本に据えた制御器である。3変数を一致させるTV Cに対し、FVCは変位、速度、加速度、加々速度の4変数を一致させる。FVCのブロック線図を図7に

示す。TVCとFVCはその制御器の動作に共通の部分が多く、全く同じ手段で設計を行うことが可能である。本研究では主に高周波帯域における制御性能の改善を目標とし、TVCと同時にFVCの妥当性も検討の対象とする。

3. シミュレーション結果

これらのTVC・FVCのパラメータ設計手法に基づき制御器を設計を行った。本研究においては、制御器の設計手法について検証し、特にその制御器の制御系安定性能と波形再現性能の両立を目的としている。制御系安定性能については、前節において偏差信号を減少させることで性能の改善を見ることが出来ると予測した。そこで本研究のシミュレーションではその是非を検証するため、表1の3種の制御器を対象とした。シミュレーションの結果を図8～10に示す。

Table 1 シミュレーション条件

制御器の呼称	性質の重点
TVC_PIANE	制御系安定性能
TVC_FOLTE	波形再現性能
FVC_PIANE	制御系安定性能 高周波追従

TVC_PIANEの制御器は $K_{fv} = K_{bv}$ の設計段階、つまり偏差入力によるフィードバック制御器としては-10dBほどの波形再現性能の劣化を意図的に設計し、のちに K_{fv} ゲインを増幅させることで波形再現性能を補完するよう設計した。

対して、TVC_FOLTE制御器はフィードバック制御器のみで波形再現性能を獲得し、フィードフォワード制御器はあくまで微調整のための補助に留めた。詳細なパラメータ値については、紙面の都合で割愛する。

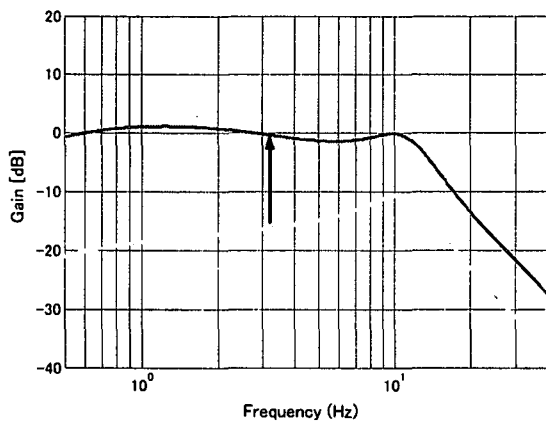


Fig.8 TVC_PIANE FFによる補完

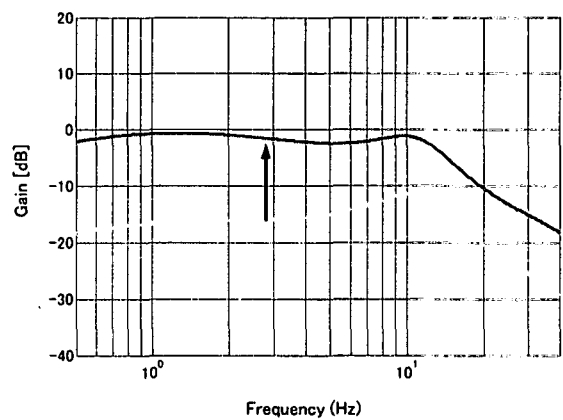


Fig.10 FVC_PIANE FFによる補完

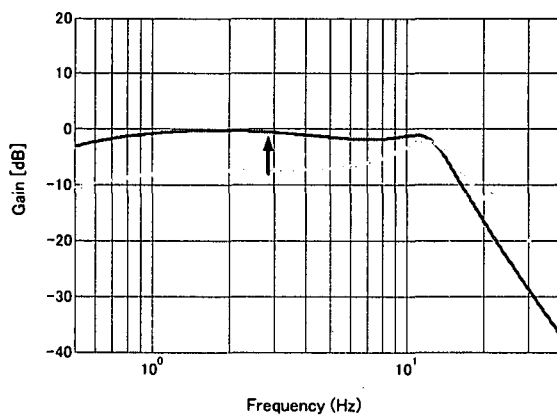


Fig.9 TVC_FOLTE FFによる補完

Table 2 グラフ線種

線種	制御器
---	FB : 偏差信号によるフィードバック制御器
—	FF : フィードフォワード信号の増幅を行った制御器

4. 結論

本研究では、これまで明確に示されることのない3変数制御のパラメータ決定について論理的な筋道でパラメータの決定を行い、その制御系安定性能に関わるフィードバック部分と波形再現性能に主として関わるフィードフォワード部分をそれぞれ独立に設計できる手法を提案した。また、3変数制御をさらに拡張した4変数制御手法についても同様の設計を行えることを示した。

以上により設計された制御器を用いてシミュレーションを行い、3変数制御手法および4変数制御手法により目的の周波数伝達特性を得られることを確認した。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費による総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関する研究」の一環として行われたものである。主査のいわき明星大学・清水信行教授には適切なご指導、ご助言を頂いた。また、いわき明星大学の大学院生の篠原雄一郎氏および研究室の皆様には、他手法を含む研究討議に参加いただき、本研究を成果あるものに導けた。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献：

- (1) T.Katayama, K.Ohtani, et al., 第10回地震工学シンポジウム論文集, (1998), 2221.
- (2) 松崎・平井, 機論, 42-353, (1976), 135.
- (3) 掛川智義, 実大三次元震動破壊実験装置のモデル化と制御に関する研究, (2002).
- (4) 前川・安田ほか, 三菱重工技報, 36-6(1999), 36.
- (5) 鈴木拓・田川泰敬・他, 震動台の地震波再現性能の改善に関する研究(2002)
- (6) 梶原浩一・藤田隆史, テーブルの浮性振動を考慮したアクティブ微振動制御手法の研究, 機論, 63-610, (1997), 1893.