耐震試験用ハイブリッド実験システムの制御系設計*

関 健 太^{*1}, 服 部 誠^{*2}, 川 福 基 裕^{*1}
岩 崎 誠^{*2}, 平 井 洋 武^{*1}, 岸 田 一 義^{*3}

Controller Design of Hybrid Experimental System for Seismic Tests

Kenta SEKI^{*4}, Makoto HATTORI, Motohiro KAWAFUKU,
Makoto IWASAKI, Hiromu HIRAI and Kazuyoshi KISHIDA^{*4} Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

Hybrid experimental system is one of powerful tools to perform various seismic tests for unknown and/or huge structures, where an actuator-excited experimental vibratory system and a computational response analysis are on-line combined and are simultaneously conducted. This paper presents a control methodology for high performance hybrid experimental systems. A 2-degrees-of-freedom compensator is applied from the viewpoint of control techniques, where a FB compensator is designed according to the system stabilization analysis and a FF compensator is designed to achieve the desired servo characteristics. In the FF compensator design, an iterative learning control system is especially adopted to eliminate the time delay in actuator responses. The proposed compensation algorithm has been verified using an actual hybrid experimental set up with 2-mass structure.

Key Words: Hybrid Experimental System, Seismic Tests, Control Design, Iterative Learning Control, Hydraulic Actuator

1. 結 言

地震に対する構造物全体の振動応答評価法の一つとして、振動台を用いた加振実験が挙げられる⁽¹⁾。しかし、実際の構造物を振動台上に建設して振動試験を行うことは、経済的・時間的に大きな負担となる。さらに、高層ビルや高架橋といった大規模な構造物の振動試験には、実験設備に限界がある。一方で、計算機による数値解析が幅広く実施されているが、その解析精度は数値解析モデルの精度に大きく依存する。

これらの問題点を解決する手法として、ハイブリッド実験といわれる手法が考案され、活発に研究が行われている⁽²⁾。この手法は、数学的に解析が困難、あるいはモデル化が非常に複雑な要素の諸特性のみを加振実験により抽出し、これをオンラインで計算機内に取り込み、全体系の数値解析を進めるものである。その

ため、比較的小さな加振設備で構造物全体の振動応答を精度良く評価できる利点がある。ハイブリッド実験は、部材の変形過程の観察や復元力特性の検証を目的に、加振実験の時間軸を拡大した仮動的実験として広く使われ発展してきたが⁽³⁾⁽⁴⁾、その手法では摩擦ダンパーや粘性ダンパー等のように応答が速度に大きく依存する供試体に対して正確な評価を行うことができない。そこで、加振実験の時間軸を一致させ、ハイブリッド実験を実時間で行うリアルタイムハイブリッド実験が提案されている^{(5)~(7)}。リアルタイムハイブリッド実験においては、指令値に対する加振機の応答遅れが実験精度の劣化のみならず、実験システムの不安定化の原因となることが知られており、その補償法が極めて重要となる。従来、加振機の応答遅れ補償法として、堀内らは、加振信号に多項式関数を外挿することで加振機の応答遅れを予測・補償する手法⁽⁶⁾を提案し、所定の周波数範囲内では良い補償特性を持つことを実験により検証している。一方、五十嵐らは、加振機の振幅、位相特性をキャンセルするデジタルフィルタ、即ち逆伝達関数を加振信号に付加し、所定の周波数範囲内で良い補償特性を持つことを実験により検証してい

* 原稿受付 2006 年 12 月 20 日。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学大学院情報工学専攻 (〒466-8555 名古屋市中昭和区御器所町)。^{*2} 名古屋工業大学大学院情報工学専攻。^{*3} (株)日立プラントテクノロジー 研究開発本部土浦研究所 (〒300-0013 土浦市神立町 603)。

E-mail: k-seki@nitech.ac.jp

る⁽⁷⁾。しかし、いずれの方式も、加振可能な周波数が約 10[Hz] 以下に制限されることや、加振機のモデル化誤差、動特性の微小変化により実験精度及び実験システムの安定性が大きく劣化する問題を有している。

本研究では、上記課題に対して、制御技術的アプローチにより実験システムの安定性を大幅に改善した上で、加振機の応答遅れを補償し、10[Hz] 以上の周波数領域においても加振実験を可能とすることで、高精度な振動応答評価の獲得を可能とする制御手法を提案する。具体的には、実加振部と数値計算部を含めたハイブリッド実験を一つの制御システムとして捉え、制御システムを安定化するフィードバック（以降、FB）補償器と加振機の目標値追従特性を向上させるフィードフォワード（以降、FF）補償器を、独立に設計する 2 自由度制御系の考え方を導入する。ここで、特に FF 補償器設計においては、反復学習制御アルゴリズムを適用する。提案手法の検証では、小型の油圧加振機を用いた実加振部と 2 慣性系を数値モデルとして用いた数値計算部の構成によるハイブリッド実験システムにより、その有効性を示す。

2. ハイブリッド実験システムと従来制御手法

2-1 ハイブリッド実験システムの概要 図 1 に、ハイブリッド実験システムの概略図を示す。評価対象構造物の一部分を実物（以降、実物モデル）として持ち、他の部分は計算機上に数値モデルとして持つ。数値モデルの運動方程式は、次式で与えられる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f + f_r \quad (1)$$

ここで、 M 、 C 、 K はそれぞれ数値モデルの質量、減衰、剛性マトリクス、 x は相対変位ベクトル、 f は地震などによる外力ベクトル、 f_r は数値モデルと実物モデルの境界点に作用する力ベクトルであり、 f_r は境界点の変位 x_b を用いて形式的に、

$$f_r = f_r(x_b, \dot{x}_b, \ddot{x}_b, \dots) \quad (2)$$

と表現できる。加振実験により実物モデルから計測した力 f_r をオンラインで計算機に取り込み、式 (1) に代入することで評価対象構造物の振動応答を計算でき、その時に求められる境界変位 x_b を加振機により実物モデルに与え、 f_r を計測する。以上を繰り返すことで、構造物全体の数値計算によって振動応答を評価する。そのため、数値モデルにより計算される境界変位 x_b （加振機への変位指令となる）と実物モデルの応答変位を一致させることは、精度の高い振動応答評価を行うために必須である。

Fig. 1 Hybrid experimental system.

Fig. 2 Block diagram of hybrid experimental system.

ここで、図 1 に示すハイブリッド実験システムをブロック線図で表記すると図 2 となる。図中、 f は地震などによる外力、 x_b は数値モデルと実物モデルの境界変位、 x_p は加振機変位、 x_a は実物モデルの応答変位、 f_r は加振実験により計測される力、 $G_n(s)$ は数値モデルの伝達関数、 $C_p(s)$ は加振機 FB 補償器、 $G_p(s)$ はサーボアンプ、サーボ弁、ピストン、静圧継手からなる油圧加振機の伝達関数、 $G_a(s)$ は実物モデルの伝達関数である。加振機制御系は変位 FB 制御系を構成し、加振機の安定性と十分な外乱抑圧特性を確保するものである。図 2 より、ハイブリッド実験システムは数値モデルと実物モデル、加振機制御系を含む一つの FB 制御系を構成しているので、制御技術的アプローチでシステムを高性能化することが可能である。

2-2 システム構成と評価対象構造物 本研究のハイブリッド実験システムの制御系設計に際しては、加振機の加振方向は水平方向のみとし、評価対象構造物を図 3 に示す 2 慣性系とした。ここでは、 K_1 、 C_1 を実物モデルとして加振実験を行い、残りの部分は数値モデルとして数値計算を行う。各機械パラメータを

Fig. 3 Original structure of 2-mass system.

Table 1 Parameters of 2-mass system.

$M_1[\text{kg}]$	21.5	$M_2[\text{kg}]$	21.9
$C_1[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$	23.6	$C_2[\text{N}/(\text{m}/\text{s})]$	94.3
$K_1[\text{N}/\text{m}]$	3.3×10^4	$K_2[\text{N}/\text{m}]$	5.7×10^4

表1に示す。加振機制御系は、前述の通り変位FB制御系を構成しており、その一巡伝達特性のナイキスト線図を図4に、FB特性(図2中 x_b から x_p)を図5に示す。図4より、加振機制御系は十分な安定性を有していることがわかる。また、図5より、加振機制御系の追従特性は約10Hzまでゲインが0[dB]となっているが、位相遅れの影響で目標値と実応答には位相差が存在する。

2.3 従来の制御手法 ハイブリッド実験においては、図5に示す加振機の応答遅れが実験精度の劣化のみならず、システムの安定性低下の原因となる。ここでは、加振機の応答遅れ補償の代表的な従来手法である予測手法⁽⁶⁾を取り上げ、制御系設計の観点からこの手法の特性とその欠点を検討する。

予測手法は、加振機の応答遅れ時間 δt 分だけ先の振動応答を予測して加振機への変位指令とする手法である。予測式を次式に示す。

$$\hat{x}_b = \sum_{i=0}^n a_i x_b(i) = a_0 x_b(0) + a_1 x_b(1) + \dots \quad (3)$$

ここで、 $\hat{x}_b$ は予測値、 n は予測の次数、 $x_b(0)$ は現時刻の計算値、 $x_b(i)$ は現時刻よりも $(\delta t \times i)$ 前の計算値、 a_i は次数により決まる定数である。即ち、予測式は加振機の応答遅れ時間 δt をサンプリング時間とした、次式のパルス伝達特性を有するフィルタと考えられる。

$$\widehat{X}_b(z) = (a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots) X_b(z) \quad (4)$$

式(4)は予測式が位相進み補償器であることを示しており、例えばその次数を3次、各定数 $a_0 \sim a_3$ を文献(6)に記載されている値とし、加振機応答遅れ時間 δt

Fig. 4 Nyquist diagram of actuator control system.

Fig. 5 Frequency characteristic of actuator control system.

を10[ms]とすると、その周波数特性は図6となる。式(4)は図2のブロック線図において、ハイブリッド実験システムのFB補償器として作用する。即ち、位相進みによりFB制御系の安定性を確保していると考えられる。一方で、式(4)は加振機制御系から見た場合、前向き補償器として作用する。図7に、図5の周波数特性を有する加振機制御系と実物モデル、図6の予測フィルタを乗算した周波数特性を示す。図より、約10Hz以下の周波数領域においては、加振機の応答遅れをキャンセルして、ゲイン、位相ともにフラットな特性を得ていることから、境界変位 x_b と実物モデル応答変位 x_a を一致させることができる。しかし、高周波数領域でゲインが増大しているため、観測ノイズや油柱共振(液体内に粗密波が発生し、ピストンが振動する現象)⁽⁸⁾、ディザー信号⁽⁹⁾の影響を受け易い。さらに、図8は数値モデルを含めたハイブリッド実験システム全体の一巡伝達特性のナイキスト線図であるが、この図から安定余裕が非常に少なくなっていることがわかる。そのため、加振機の微小な特性変動の影響

Fig. 6 Characteristic of predictive filter.

Fig. 7 Frequency characteristic of experimental part with predictive filter.

響によりシステムが不安定になると考えられる。

3. ハイブリッド実験システムに対する制御系設計

3-1 制御系設計指針 前述のように、予測手法は1自由度制御系設計の考え方でシステムの高性能化を図っていると捉えることができる。そのため、ハイブリッド実験システムの安定性と加振機の目標値追従特性向上を同時に考慮して、加振可能な周波数帯域を拡大することには限界があると考えられる。そこで、本研究ではFB制御系の安定性と、目標値追従特性の向上を独立に設計可能な2自由度制御系の考え方を導入し、加振可能な周波数帯域の拡大を図る。即ち、

- ハイブリッド実験システムの安定性を確保するFB補償器の設計、
- 境界変位(加振機変位指令) x_b と実物モデル応答変位 x_a を一致させる、反復学習によるFF補償器の設計、

のそれぞれにより、ハイブリッド実験システムにおいて加振可能な周波数帯域の拡大を図る。

Fig. 8 Nyquist diagram of hybrid experimental system with predictive filter.

Table 2 Parameters of stabilization compensator.

ζ_n	0.71	ω_n [rad/s]	$2\pi \times 2.0$
ζ_d	0.71	ω_d [rad/s]	$2\pi \times 5.0$

Fig. 9 Frequency characteristic of $C_s(s)$.

3-2 FB補償器の設計 ハイブリッド実験システムの安定性向上のためには、位相特性の改善が不可欠である。そこで、本研究では次式に示す2次の位相進み補償器 $C_s(s)$ を設計する。

$$C_s(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_n\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_d\omega_d s + \omega_d^2} \quad (5)$$

各パラメータは、ハイブリッド実験システムにおける一巡伝達特性のゲイン交差周波数付近の位相を 60° 程度進めるよう調整した。設計した補償器の各パラメータを表2に、その周波数特性を図9に示す。また、図9の位相進み補償器を付加した制御系を図10に、その一巡伝達特性のナイキスト線図を図11に示す。図11より、設計した位相進み補償器を付加することで位相余裕は 55° 程度確保され、図8に示す従来手法に比べ安定性が大幅に改善されていることがわかる。

Fig. 10 Block diagram of hybrid experimental system with $C_s(s)$.

Fig. 11 Nyquist diagram of hybrid experimental system with $C_s(s)$.

しかし、位相進み補償器 $C_s(s)$ は加振機制御系から見た場合、前向き補償器として作用する。即ち、図9に示す $C_s(s)$ の特性から、低周波数領域でのゲイン低下は避けられず、その影響で加振機の追従特性が劣化してしまう。そこで、ハイブリッド実験システムの安定性とは独立に追従特性の改善を図る FF 補償が必須となる。

3.3 FF 補償器の設計

3.3.1 反復学習による FF 信号の生成 ハイブリッド実験においては、試験内容が評価対象構造物の非破壊試験である場合には、繰り返し試験が可能である。本研究では、その特徴を利用して、反復学習制御により境界変位指令 x_b と実物モデル変位 x_a を一致させるための FF 信号の生成を行う。なお、実際の加振実験においては、実物モデルの変位を計測することは困難であるため、加速度を計測することになる。そのため、境界加速度 $\ddot{x}_b$ と実物モデル加速度 $\ddot{x}_a$ が一致するような反復学習制御器とする。実際、加速度信号が一致していれば、速度、変位とも十分一致していると考えられる。

図12に、反復学習制御器を含めたハイブリッド実験システムのブロック線図を示す。ここで、 $G_1(s)$ は境界加速度 $\ddot{x}_b$ から境界変位 x_b までの伝達特性、 $G_2(s)$

は反力 f_r から境界加速度 $\ddot{x}_b$ までの伝達特性、 $G_3(s)$ は前述の位相進み補償器、加振機制御系、実物モデルを含めた、境界変位 x_b から実物モデルの加速度 $\ddot{x}_a$ までの伝達特性、 $G_4(s)$ は実物モデルの加速度 $\ddot{x}_a$ から反力 f_r までの伝達特性、 u は反復学習により生成される補正信号である。なお、 k は反復学習における k 回目の試行を表す。この反復学習制御器は、境界加速度 $\ddot{x}_b$ と実物モデル加速度 $\ddot{x}_a$ を入力とし、両者の誤差 e が零へ収束するように後述の学習則 $W(s)$ を乗じて補正信号 u を生成する。ただし、1回目の試行においては、 $u_1 = 0$ である。

3.3.2 学習則の導出 学習則 $W(s)$ を以下のよう導出する。図12より、 k 回目の試行における各伝達特性は、

$$\ddot{x}_{ak} = G_1(s)G_3(s)\ddot{x}_{bk} - G_3(s)u_k \quad (6)$$

$$\ddot{x}_{bk} = f + G_2(s)G_4(s)\ddot{x}_{ak} \quad (7)$$

$$e_k = \ddot{x}_{ak} - \ddot{x}_{bk} \quad (8)$$

となり、式(6)、(7)、(8)をまとめると、 k 回目の誤差 e_k は次式で表される。

$$e_k = \frac{\{G_1(s)G_3(s) - 1\}}{\alpha} f - \frac{\beta}{\alpha} u_k \quad (9)$$

ここで、 $\alpha = 1 - G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)$ 、 $\beta = G_3(s)\{1 - G_2(s)G_4(s)\}$ である。

従って、 $k+1$ 回目の試行における補正信号 u_{k+1} は、

$$\begin{aligned} u_{k+1} &= W(s)e_k + u_k \\ &= \frac{\{G_1(s)G_3(s) - 1\}W(s)}{\alpha} f \\ &\quad + \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}W(s)\right)u_k \end{aligned} \quad (10)$$

となり、この漸化式を解くと次式となる。

$$u_k = (-\gamma) \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}W(s)\right)^{k-1} + \gamma \quad (11)$$

ここで、 $\gamma = \frac{G_1(s)G_3(s)-1}{\beta}f$ である。

式(11)を式(9)に代入すると、

$$e_k = \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}W(s)\right)^{k-1} \frac{G_1(s)G_3(s) - 1}{\alpha} f \quad (12)$$

となる。ここで、試行1回目の誤差 e_1 は式(9)より、

$$e_1 = \frac{\{G_1(s)G_3(s) - 1\}}{\alpha} f \quad (\because u_1 = 0) \quad (13)$$

となるので、式(12)より次式を得る。

$$e_1 = \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}W(s)\right)^{k-1} e_1 \quad (14)$$

Fig. 12 Block diagram of hybrid experimental system with iterative learning controller.

即ち、式 (14) より、

$$\left| 1 - \frac{\beta}{\alpha} W(s) \right| < 1 \quad (15)$$

の条件を満たすとき、誤差 e_k は零に収束する。式 (15) より、

$$W(s) = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{1 - G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{G_3(s)\{1 - G_2(s)G_4(s)\}} \quad (16)$$

とすれば、最も少ない試行回数で誤差 e_k は零に収束し、境界加速度 $\ddot{x}_b$ と実物モデル加速度 $\ddot{x}_a$ を一致させることができる。

3.3.3 FF 信号生成手順 導出した学習則 $W(s)$ において、 $G_3(s)$ 、 $G_4(s)$ は加振機及び実物モデルの特性が含まれるため正確にモデル化することは困難である。そのため、本研究では試行毎に得られる x'_{bk} 、 $\ddot{x}_{ak}$ 、 f_{rk} の各信号をフーリエ変換し、

$$G_3(s) = \frac{\ddot{X}_{ak}(s)}{X'_{bk}(s)} \quad (17)$$

$$G_4(s) = \frac{F_{rk}(s)}{\ddot{X}_{ak}(s)} \quad (18)$$

により $G_3(s)$ 、 $G_4(s)$ を試行毎に同定する。また、補正信号 u_k の生成は加振実験毎にオフラインで行い、式 (16) を用いた補正信号 u_k の演算は周波数領域で行う⁽¹⁰⁾。これにより、式 (16) が非プロバ及び非最小位相系であっても実現できる。また、加振周波数以上の不必要な信号成分はマスク処理することで考慮しないこととする。上記 FF 信号の生成手順を図 13 に示す。

Fig. 13 Flowchart of proposed method for iterative learning control.

4. 実験結果

提案手法の有効性を実験により検証する。本研究では、高い周波数での加振機追従特性向上の効果より明確に示すため、加振周波数帯域を 10[Hz]~40[Hz] とし、図 14 に示す擬似加速度を入力信号として用いた。学習試行回数は 3 回であり、加振する実物モデルは表 1 の K_1 、 C_1 の値となるよう梁とダンパで構成し、数値演算、及び各補償器はサンプリング時間 0.2[ms] として、Digital Signal Processor(DSP)により実装した。実験結果を図 15、図 16 に示す。各図は試行 1 回目と 3 回目の実験結果であり、数値モデルと実物モデルの境界加速度 $\ddot{x}_b$ と実物モデルの応答加速度 $\ddot{x}_a$ の時間応答波形及び $\ddot{x}_b$ と $\ddot{x}_a$ の誤差信号を示している。それぞれの実験において、システムが安定に動作していることが確認できる。また、図 15 より試行 1 回目においては、位相遅れの影響により $\ddot{x}_b$ と $\ddot{x}_a$ の間で誤差が生じているものの、試行を重ねることで誤差が減少し、試行 3 回でほぼ一致することが確認できる。即ち、加振実験により数値計算ステップ毎に必要な反力が正確に求めることができ、より高い周波数まで精度の高い振動応答評価が可能であることが確認できる。

5. 結 言

本論文では、ハイブリッド実験システムを一つの制御システムとして捉え、制御系設計の観点からシステムを高性能化する 2 自由度制御手法を提案し、実験によりその有効性を検証した。そこでは、FB 補償器によりシステム全体の安定性を十分に確保しながら反復

Fig. 14 Waveform and frequency power spectrum in desired acceleration signal.

Fig. 15 Experimental results (1st trial).

Fig. 16 Experimental results (3rd trial).

学習により追従性を向上するFF信号を生成した。その結果、40Hzまでの周波数を含む地震波に対しても数値モデルと実物モデルの境界加速度と実物モデルの応答加速度を加速度の次元で一致させることが可能となり、精度の高い振動応答評価が可能であることを示

した。

本研究では、加振実験が繰り返し行え、かつ振動応答の再現性があることを前提に反復学習制御を適用したが、再現性の乏しい構造物に対する補償方法については稿を改め報告したい。

6. 謝 辞

本研究において、解析及び実験にご協力いただいた、名古屋工業大学大学院博士前期課程伊藤健介氏、樋川祥弘氏、(株)日立プラントテクノロジー 社会・産業システム事業本部保田和輝氏に感謝致します。

文 献

- (1) Kajiwara, K., et al., Shaking performance of 3-D Full Scale Earthquake shaking Table (E-Defense) and applications after construction, *Proceedings of the Motion and Vibration Control*, Vol.9th (2005-8), pp.313-316.
- (2) Iemura, H., Development and Future Prospect of Hybrid Experiments, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, No.356 (1985), pp.1-10.
- (3) Takanashi, K. and Nakashima, M., Japanese Activities on On-Line Testing, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.113, No.7 (1987), pp.1014-1032.
- (4) Dozono, Y., et al., Verification for a New Hybrid Seismic Experimental Method Combining Nonlinear Finite Element Analysis and Loading Test, *Proceedings of the Motion and Vibration Control*, Vol.9th (2005-8), pp.323-328.
- (5) Nakagawa, M., et al., Development of a Real-Time On-Line Vibration Testing System by Substructuring Method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.60, No.570 (1994), pp.412-417.
- (6) Horiuchi, T., et al., Development of a Real-Time Hybrid Experimental System with Actuator Delay Compensation (1st Report, Compensation Method and Application to Experiments of Single-Degree-of-Freedom Systems), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.61, No.584 (1995), pp.1328-1336.
- (7) Igarashi, A., et al., The Real-Time Hybrid Test System Using Digital Filter Compensation, *Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol.11th (2002-11), pp.1633-1636.
- (8) Neild S.A., et al., Control issues relating to real-time substructuring experiments using a shaking table, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.34, No.9 (2005), pp.1171-1192.
- (9) Ota, Y., Trouble of Servo Valve and its action (in Japanese), *Proceedings of the hydraulic technique*, Vol.20, No.11 (1981), pp.19-23.
- (10) Igarashi, H., et al., Fast-Response and High-Precision Positioning Using Iterative Learning Control, *Papers of Technical Meeting on Industrial Instrumentation and Control, IIC, IEE Japan*, Vol.IIC-03, No.45-52.54-73, (2003), pp.19-24.