

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760187

研究課題名(和文) 長周期地震に対応した振動台のモデル化と加速度波形の再現性向上を目指した制御系設計

研究課題名(英文) Improvement of Acceleration Reproducibility by Controller Design in Shaking Table Systems for Long-period Ground Motion

研究代表者

関 健太 (SEKI, KENTA)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70432292

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、長周期地震動を再現する振動台に焦点を当てた、振動台の地震加速度波形再現性能を劣化させる要因の分析とそのモデル化、および波形再現性能向上を目指した制御系の各要素技術の確立を行った。まず、振動台の実機応答を忠実に再現する数値シミュレータを構築した。そして、特に油圧加振機の変位増加に伴う非線形特性と共振振動を抑制するための制御手法と、複数振動台の協調動作時の干渉補償法を確立した。提案した各制御系の有効性は、基礎実験装置を用いた実機実験により検証された。

研究成果の概要(英文)：This research aimed at control system design for shaking tables to improve the reproducibility of long-period earthquake acceleration waveforms. In the shaking table system to generate the long-period earthquake waveforms, the nonlinearities and lower resonant vibrations of hydraulic systems cause the deteriorations of the reproducibility of acceleration waveforms. In this research, at first, we constructed the precise simulators to analyze the shaking table motion. Then, we developed the control methodologies to compensate for the nonlinearities, resonant vibrations, and the effects of interference between actuators. The proposed control systems have been verified by experiments using a laboratory experimental setup.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械力学・制御

キーワード：運動制御 振動台 地震加速度

1. 研究開始当初の背景

日本は世界有数の地震発生国であることから、耐震設計技術は世界を牽引する立場にある。国内では、様々な耐震試験に対応した振動台の開発が民間企業で行われており、その機構・制御設計、製造技術は世界のトップレベルである。これまでの振動台は、主に都市部における直下型地震への対応策として、短周期地震動の再現と、破壊試験に対応した加振制御技術の開発に主眼が置かれていた。一方で、先の東日本大震災でも経験されたように、震源地から遠く離れた東京都心においても超高層ビルで大きな揺れが発生するなど、遠隔地においても様々な被害が報告されている。これらは、上記の短周期の揺れと異なり、数秒～十数秒の長い周期で揺れる「長周期地震動」によって引き起こされる被害であり、近年、それに対する耐震技術の確立、被害予測など、国の重要な施策として精力的に研究が進められている。

長周期地震動では、加速度の周期が長い(周波数が低い)ため、地動の変位が大きくなる。既存の振動台では変位の限界があるため、その地震動を再現することが困難となっている。そのため、長周期地震動を再現する(長い変位を発生させる)新たな機構の開発が行われている。そこでは、

(1) 油圧加振機単体の発生変位量の増加

(2) 2台の振動台を併用する機構

に関して開発が進められている。これら機構改善に伴い、(1)では、加振機の長ストローク化に伴い油の体積が大きくなるため、剛性が低下して共振周波数が低下することや、油の流出入量増加に伴う非線形特性の影響により加速度波形の再現性能が劣化する。(2)では、2台の振動台を併用した際の動作干渉による波形再現性能劣化が制御性能を向上させる上で問題となる。そのため、それぞれの課題に対応して、それを解決する新たな制御技術の開発が装置を完成する上で必須となっている。

2. 研究の目的

上記の背景を下に、本研究は長周期地震動を念頭においた振動台の加速度波形再現性能を劣化させる要因の分析とモデル化、およびそれらを補償するための制御技術の要素開発を目的とする。具体的には、以下の項目に焦点を当てて取り組む。

(1) 油圧加振機非線形特性および共振振動を忠実に模擬するシミュレータ構築と抑制手法の確立

長周期地震動に対応した振動台では、油圧加振機の発生変位量が大きくなるため、必然的に油圧シリンダの体積と使用する作動油の流量が大きくなる。それに伴い、サーボ弁

における非線形特性や剛性低下による共振周波数の低下に起因して制御性能が劣化する。本研究では、それらの課題を模擬するプロトタイプ機を製作し、設計した制御系の性能を実験により評価する。具体的には、実機応答を忠実に再現する数学モデルの構築を行い、数値シミュレータを作成する。構築したシミュレータを用いて、フィードバック/フィードフォワード補償器を設計する。設計した補償器を実装し、その有効性を実験により確認する。

(2) 複数の油圧加振機を併用した際の動作干渉モデルの構築と制御系設計

2台の振動台や複数の油圧加振機を併用して発生変位量の増大を図る場合、各振動台間や加振機間で動作干渉が発生する。これらは各加振機制御系の外乱として作用するため、加速度の再現性能が劣化する。一方で、長短ストロークの異なる加振機や、地震加速度の周波数成分を分離して複数加振機を制御する場合には、動作分離周波数帯で干渉が発生して加速度波形が劣化する。本研究では、複雑な機構のモデリング手法として、機構解析ソフトウェアを援用し、制御系設計ソフトウェアや構造解析ソフトウェアと連成することでシステム全体の高精度シミュレーションを行う。シミュレータを援用して、外乱の発生要因分析や外乱抑制、干渉抑制制御系を設計し、加速度再現性能の向上を図る。

3. 研究の方法

本研究では、前述の具体的な2つの研究目的を達成するために、それぞれ以下の手順で研究を進める。

(1) 油圧加振機非線形特性および共振振動抑制手法について

・制御課題を実機において再現するために、既存の油圧振動台システムを改良することで、図1の油圧振動台システムを構築する。この振動台は、変位ストロークが $\pm 110\text{mm}$ であるが、最大負荷積載量は1tとしている。

・図1の振動台システムの物理モデルを導出し、周波数応答や時間応答波形からモデルのパラメータ同定を行い、制御系解析ソフトウェア上で動作するシミュレータを構築する。このとき、負荷質量や入力振幅の変化時においても実機応答を忠実に再現するモデルを構築する。

・得られたシミュレータを用いて非線形要素や共振振動を抑制するフィードバック/フィードフォワード補償器を設計し、実機に実装して実験によりその有効性を確認する。

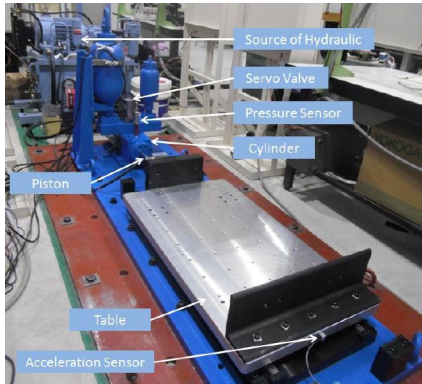


図1 供試1軸振動台の外観

(2) 複数の油圧加振機を併用した際の動作干渉モデルの構築と制御系設計

・複数の加振機を協調動作させたときの加振機制御手法を評価するために、図2のプロトタイプ機を用いた。はじめに(1)と同様に、各加振機の数学モデルを導出し、単体試験結果を基にパラメータ同定を行う。システム全体の機構のモデリングには機構解析ソフトウェアを用いる。機構解析ソフトウェアと制御系解析ソフトウェアを連成解析することで、制御性能の評価と機構の挙動を同時に評価することを可能とする。さらに、構造解析ソフトウェアを連成することで、構造物の弾性変形に起因した反力を模擬することを可能とする。

・構築した機構 / 構造 / 制御連成解析シミュレータを用いて、動作干渉を補償する制御方式を確立する。

・制御帯域が異なる加振機を制御する際に問題となる動作分離周波数近傍の性能劣化を抑制するための制御手法を開発する。

・設計した制御系の有効性を、実機実験を通して検証する。

4. 研究成果

得られた主な成果を以下に述べる。

・油圧加振機の非線形特性に対して、負荷質量や加速度、発生変位が大きくなるときに課題となる、圧力 / 流量間の非線形特性の数学モデルを構築し、それを相殺するためのフィードフォワード補償器を設計した。設計した補償器の有効性を実機実験により検証し、特に加速度ひずみ率が低減できることを確認した。図3はその実験結果の一例であり、緑線は補償なし、赤点線は設計したフィードフォワード補償器を用いた場合の結果を示している。この結果より、設計した補償器を適用することで、加速度再現性能の劣化を抑制できている。

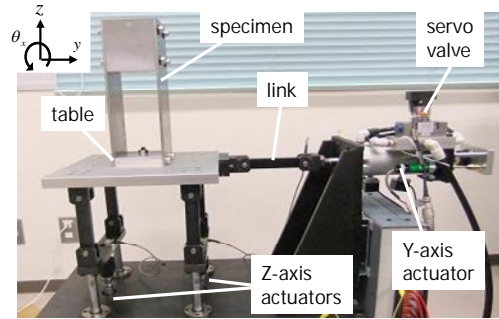


図2 複数加振機を有する供試振動台の外観

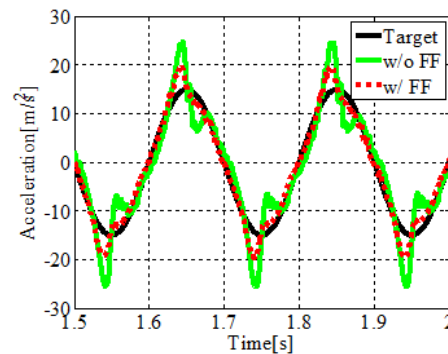


図3 油圧加振機非線形特性の補償結果 (実験) の一例

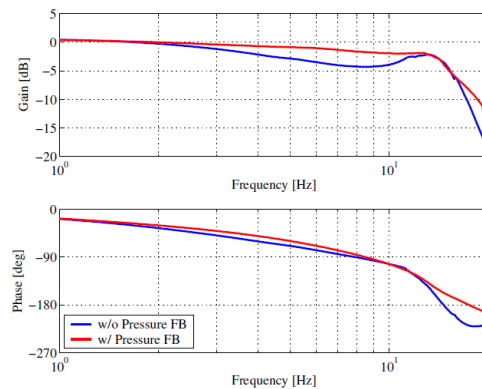


図4 圧力オブザーバを用いたフィードバック制御系の周波数特性測定結果の一例

・加振機のストロークや負荷質量が増大すると、油圧加振機制御対象の有する共振振動周波数が低下し、制御帯域が制限される。共振周波数のゲインピークを低減させる手法として、圧力センサを用いたフィードバック補償、加速度センサを用いたフィードバック補償、さらに、センサを用いないオブザーバ併合状態フィードバック制御系を設計した。これらの制御系の有効性を実機実験により検証し、共振周波数近傍のゲイン低減と共に、制御帯域の拡大が実現できることを示した。図4はその実験結果の一例であり、青線は補

償なし、赤線は圧力オブザーバによる状態フィードバック制御を適用した結果であり、13Hz 付近の共振振動によるゲインピークを低減させつつ、フィードバック制御系の帯域が拡大している。

・機構 / 構造 / 制御解析ソフトウェアを連成したシミュレータを構築することで、複数の加振機が動作する複雑な振動台の動作挙動を忠実に再現することを可能にした。そこでは、テーブル上に搭載した構造物の共振振動に起因した反力の影響も模擬することができた。

・構築した高精度シミュレータを用いて、コンピュータシミュレーション上で外乱を補償するためのフィードフォワード信号を反復学習制御により生成する手法を構築した。これにより、実機実験を繰り返すことなく、外乱の影響を抑制した高精度制御が可能となる。構築した補償方式の有効性は、実機実験を通して検証した。

・制御帯域が異なる加振機を同時に制御した際に問題となる動作干渉を補償する方式を開発した。開発した制御系の有効性を実機実験により検証した。

以上、開発したそれぞれの要素技術は長周期地震動を再現する油圧振動台のみならず、通常の油圧加振機や振動台の加速度波形再現性能向上に寄与することができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計8件)

- (1) 杉田 和洋, 関 健太, 岩崎 誠, 非干渉制御による 2 次元振動台のモーメント外乱抑制, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013 年 11 月 16 日, 新潟大学 (新潟県)
- (2) Kenta Seki, Kazuhiro Sugita, Makoto Iwasaki, Design of Disturbance Compensation Signals Aided by Multi-Body Dynamics Software in Shaking Table Systems, The 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013), 2013 年 11 月 13 日, Vienna (Austria)
- (3) 杉田 和洋, 関 健太, 岩崎 誠, 圧力オブザーバを用いた空気圧アクチュエータの共振振動抑制, 平成 25 年電気関係学会東海支部連合大会, 2013 年 9 月 24 日, 静岡大学 (静岡県)
- (4) 篠原 悠作, 関 健太, 岩崎 誠, H 制御による共振周波数変動を考慮し

た 2 段アクチュエータ制御系の設計, 電気学会産業計測制御 / メカトロニクス制御研究会, 2013 年 3 月 6 日, 千葉大学 (千葉県)

- (5) 宇佐美 貴章, 関 健太, 岩崎 誠, 2 次元振動台におけるモーメント外乱の抑制を考慮した適応フィードフォワード補償, 電気学会産業計測制御 / メカトロニクス制御研究会, 2013 年 3 月 7 日, 千葉大学 (千葉県)
- (6) 杉田 和洋, 関 健太, 岩崎 誠, 機構解析ソフトウェアを活用した反復学習制御による振動台の外乱抑制, 電気学会産業計測制御 / メカトロニクス制御研究会, 2013 年 3 月 7 日, 千葉大学 (千葉県)
- (7) 杉田 和洋, 関 健太, 岩崎 誠, 機構解析 CAD 援用による 2 次元振動台のモデル化, 平成 24 年電気関係学会東海支部連合大会, 2012 年 9 月 24 日, 豊橋技術科学大学 (愛知県)
- (8) 杉田 和洋, 関 健太, 岩崎 誠, 機構・構造連成解析による供試体反力を考慮した振動台のモデル化, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学 (石川県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関 健太 (SEKI KENTA)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 70432292