

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17996

研究課題名(和文) マルチ加振機の協調制御による振動試験機の新たな価値創造

研究課題名(英文) Value-creation of vibration-testing machine by coordinated control of multi-actuator

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造物の耐震性能を実験評価するための振動試験機を対象とし、特に従来の振動試験機に比して設置スペースの低減を図る機構の開発と、地震波形の再現性向上を実現するための制御系設計を行った。まず、制御系設計ソフトと機構解析ソフトを連成し、振動試験機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。構築したシミュレータを基に、テーブルを所望の入力に追従させるための各加振機入力信号生成アルゴリズムの構築と、加振機2自由度制御系を設計した。構築した制御系の有効性は、2次元3自由度のプロトタイプ機を用いた実機実験により検証した。

研究成果の概要(英文)：This research aimed at development of space-saving shaking mechanism and controller design to achieve the high reproducibility of earthquake waveforms. In this research, at first, the precise simulator integrated control design software with multibody dynamics software was constructed to analyze the shaking table motion. Based on the simulator, the references for each actuator were generated based on the target table motion and geometric arrangement. In the controller design, feedback control system with disturbance observer and pressure feedback loop was designed to improve the vibration suppression as well as disturbance suppression characteristic. In addition, zero phase error tracking algorithm as a feedforward compensator was applied to completely synchronize the motion of all actuators. The effectiveness of the shaking mechanism and control system was verified by conducting experiments using a horizontal shaken laboratory prototype.

研究分野：機械力学・計測制御

キーワード：運動制御 振動試験機 機構解析 制御系設計

1. 研究開始当初の背景

我が国において、構造物の耐震化及び耐震設計技術開発の促進は国の重要な施策である。その中で、国内では様々な耐震試験に対応した振動台の開発が行われている。振動台の主目的は、加振テーブル上に搭載した構造物に対して、油圧加振機を用いて正確な地震加速度を与えて耐震性能を評価することである。その目的を達成するために、様々な機械製造/設計技術、加振機制御技術の開発が行われている。

一方で、振動台を設置するためには、地盤の掘削・基礎工事を行う必要がある。そのため、装置自身の製造・組み立てのみならず、設置スペースの確保とともに、設置のための多大なコストと時間、エネルギーを要することになる。その点が、耐震試験の拡大・普及の障害となっていることは否めない。したがって、従来の振動台メカニズムと制御系設計の概念とは異なり、省スペースかつ高い地震波再現性能を両立する革新的な振動台の開発が求められている。

2. 研究の目的

上述の背景の下、本研究では図1に示す省スペースを実現する振動台加振機構を対象として高い波形再現性能を実現する制御システムを構築する。図1(b)に示す本研究対象の振動台は、加振機設置位置を工夫することで、図1(a)の加振機構に比して省スペース化を実現している。一方で、テーブルの高精度制御を実現するためには、各加振機の正確な協調動作が必須となる。そこで、本研究では、機構/構造/制御連成シミュレータを構築して、試作レスで運動性能劣化要因の分析や協調制御系設計の検討を行う。そして、最終的には提案する振動台の機構成立性と開発した制御手法の有効性を実証するために、試作機を製作して実験により検証する。具体的には、

(1) 提案する省スペース性を考慮した振動台の数値シミュレータを設計する。これにより、運動性能劣化要因を試作レスで事前に検討するとともに、設計した制御系のパラメータ設計や性能評価を可能とする。

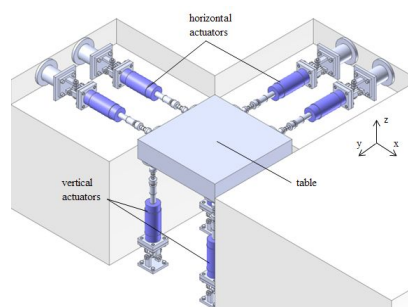
(2) 目標のテーブル運動を実現するための各加振機への入力信号生成アルゴリズムを開発する。

(3) 目標値への高精度追従制御性能を確保する加振機2自由度制御系を設計するとともに、外乱やパラメータ変動に対するロバスト性能を確保する制御系を設計し、加振機単体試験によりその性能を評価する。

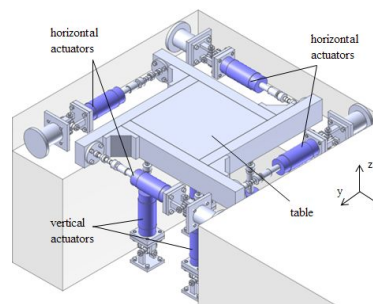
(4) 複数加振機協調動作を実現するため、

各加振機間のクロストークや同期誤差を補正する制御アルゴリズムの開発を行う。

(5) 試作機製作と実験による制御性能評価を行うことで、実用的な性能を評価して有用性を明らかにする。試作機に関しては、研究室レベルで実験可能な水平加振(2次元3自由度)を対象とした小型プロトタイプ機とする。



(a) 一般的な加振機構



(b) 省スペース化を実現する加振機構

図1 加振機構と設置スペースの違い

3. 研究の方法

本研究では、前述の研究目的を達成するために、図1(b)の加振機構の水平 X-Y 平面の2次元3自由度加振システムを対象として、以下の手順で研究を進める。

- (1) 数値シミュレータの設計
 - (2) 加振機制御系設計と入力信号生成アルゴリズムの構築
 - (3) 実機実験による有効性検証
- それぞれの項目について、具体的な内容を以下に示す。

・数値シミュレータの設計

対象とする振動台の加振機制御システム及び加振機構の運動を忠実に模擬する数値シミュレータを設計し、モデルベースで制御系設計と評価を行える環境を整備する。具体的には、

加振機の物理モデルを構築し、要素試験(周波数応答試験、加振試験)によりモデルパラメータを同定する。構築したモデルを制御系解析ソフトウェアに実装する。さらに、各加振機に対する制御系を含める。

機構解析ソフトウェアを用いて、ピストン、リンク機構、テーブルの3次元モデルを構築し、各部に運動の拘束条件を与えることで、各加振機が発生する力からリンク機構の動作、テーブル運動を模擬するモデルを構築する。

制御系解析ソフトウェアと機構解析ソフトウェアを連成させる。以上の数値シミュレータの構成を図2に示す。このシミュレータを用いることで、各加振機に対する制御系設計と評価をモデルベースで検討可能となる。本シミュレータは構造解析ソフトウェアを連成させれば、各部の弾性変形を考慮することが可能となる。なお、数値シミュレータの実機応答再現性は、後述の試作機を用いて十分な再現性能があることを確認する。

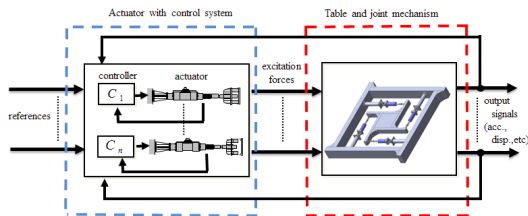


図2 数値シミュレータの概要

・加振機制御系設計と入力信号生成アルゴリズムの構築

対象とする振動台では、テーブルの目標運動を実現するために各加振機が適切な入力指令の下、外乱の影響を抑制しながら高精度に追従して動作することが必須となる。そこで、入力信号の生成アルゴリズムと加振機制御系を設計する必要がある。制御系の概要を図3に示す。

各加振機への入力信号生成アルゴリズム
各加振機の配置から、逆運動学に基づきテーブル目標指令から各加振機への指令に変換する座標変換アルゴリズムを構築する。

加振機制御系

加振機制御系に求められる性能としては、目標信号への高精度な追従と各種外乱の抑圧である。そこで、両者を独立に設計可能な2自由度制御系を設計する。フィードフォワード補償器には、目標信号へ位相差なく追従することを目的に、零位相差追従補償器(図3中 C_{zptc})を設計する。フィードバック補償器(図3中 C_{FB})には、圧力フィードバックにより共振振動の抑制を図りつつ、外乱オブザーバを導入することで、加振機制御系に作用する摩擦や干渉力などの外乱を抑制する。

・実機実験による有効性検証

本研究で試作した2次元3自由度水平加振可能なプロトタイプ機を図4に示す。各加振機のピストン変位は変位センサにより検出する。加振機内圧力は、圧力センサにより検

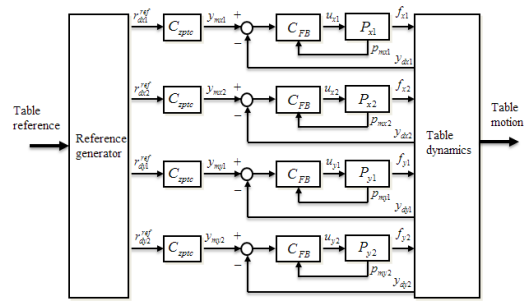
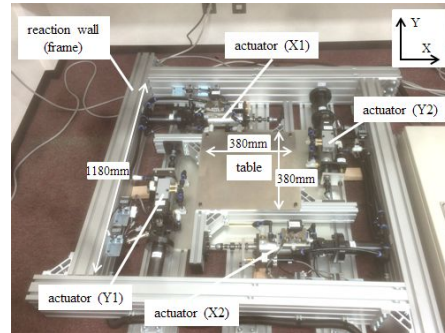
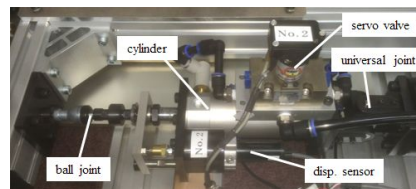


図3 構築した制御系の概要



(a) 全体図



(b) 加振機外観

図4 試作機の外観

出する。テーブル加速度は3軸加速度センサにより検出する。テーブルと床面は無給油スライドにより摺動する。設計した制御系は離散化して、コントローラ(Digital Signal Processor)に実装する。図4の試作機を用いて、テーブル運動の動作確認と制御系の湯構成を実証する。

4. 研究成果

得られた主な成果を以下に述べる。

・一般的な加振機構を有する振動台に比べて設置スペースを削減可能な新たな振動台加振機構に対し、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させることで、実機応答を忠実に再現可能な数値シミュレータを構築した。これにより、実際のテーブル運動を可視化しながらモデルベースで制御系の設計及び評価が可能な環境を構築した。さらに、機構の各部に発生する応力も同時に評価することができる。

・対象とする振動台の機構成立性と制御システムの有効性を検証するため、研究室で実験可能なスケールダウンしたプロトタイプ機

を試作した。

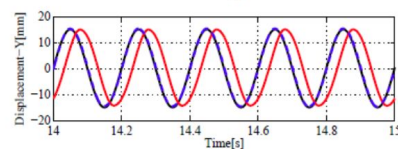
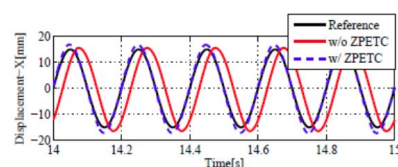
・対象とする振動台では、テーブルの一方方向の運動であっても各加振機が協調して動作する必要がある。そのため、目標とするテーブル運動から、各加振機の配置を考慮して逆運動学により加振機指令を生成するアルゴリズムを設計した。設計したアルゴリズムの妥当性は、数値シミュレーション及び試作機を用いた実験により検証した。これにより、各加振機が目標指令通りに遅れなく追従すれば、テーブルは所望の運動を実現できるようになった。

・加振機に応答遅れがある場合、テーブルが目標通りの運動とならないことが分かった。そこで、加振機を目標指令に遅れなく追従させることを目的に、零位相差追従補償器をフィードフォワード補償器として設計した。その有効性は、数値シミュレーション及び試作機を用いた実験により検証した。

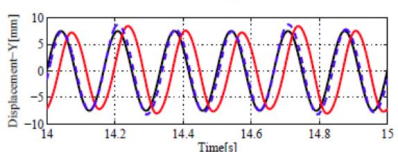
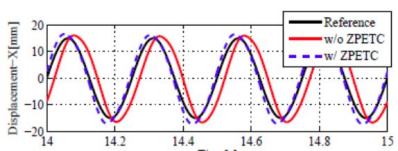
・フィードフォワード補償器により加振機が目標値通りに動作するためには、加振機に加わる各種外乱の影響を十分に抑制する必要がある。数値シミュレーションにより検討した結果、機構各部に発生する摩擦と加振機間のクロストークが主な性能劣化要因となることが分かった。この影響を抑制するため、外乱オブザーバを設計し、制御系の外乱抑圧性能を向上させることを試みた。その結果、外乱の影響を十分に抑制できることを実機実験により検証した。さらに、外乱オブザーバによる応答遅れにより速度方向反転時の摩擦の影響を十分に抑圧できないことが分かったので、摩擦数学モデルに基づくフィードフォワード補償器を設計し、十分な抑制効果を得た。

・テーブル加振中には加振機から見た等価的なテーブル質量が変化し、加振機構の持つ共振周波数が変動することが分かった。そこで、圧力センサを用いた圧力フィードバックにより、複素共役極に減衰を加えることを試みた。その結果、共振周波数が変動したとしても十分な共振ピーク低減が実現できた。なお、圧力フィードバックでなく、加速度センサを用いた加速度フィードバックでも同様な効果が得られることを確認した。

・設計した制御系の有効性を実機実験により検証した。一例を図5に示す。図はテーブルのX方向とY方向の運動を示しており、黒線は目標値、赤線は零位相差追従補償器なし、青破線は零位相差追従補償器ありの結果である。この結果より、テーブル目標指令通りにテーブルが追従していることが確認できる。



(a) X(15mm-5Hz), Y(15mm-5Hz)



(b) X(15mm-4Hz), Y(7.5mm-6Hz)

図5 正弦波加振実験結果

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3件)

- (1) Sota Kaida, Kenta Seki, Makoto Iwasaki, Development of Space-saving Mechanism in Shaking Table Systems for Earthquake Simulators, Proc. of 14th International Workshop on Advanced Motion Control, 2016年4月22日, Auckland (New Zealand)
- (2) Kenta Seki, Modeling and feedforward controller design in 2-dimensional shaking table systems, The 13th International Conference on Motion and Vibration Control, 2016年7月5日, Southampton (UK)
- (3) 海田 僧太, 関 健太, 岩崎 誠, 省スペースを目指した加振機構を有する振動台の制御系設計と実験検証, 平成28年電気学会産業応用部門大会, 2016年9月1日, 群馬大学(群馬県)

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