

報告日：2020年10月19日

報告者：名古屋工業大学 工学部 准教授

関 健太

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名 (日本語)

省スペースと高精度加振を実現する振動台の加振機協調制御系設計

(2) 研究者氏名、職名

関 健太 名古屋工業大学 工学部 准教授

(3) 研究概要 (日本語)

本研究では、省スペースで設置可能な振動台を対象とし、複数の加振機を指令値通りに正確に動作させ、テーブル上で目標とする地震加速度波形を忠実に再現するための制御系設計を行った。実機の挙動を忠実に再現する機構・制御連成シミュレータを基に、制御系設計の検討を行い、まず各加振機を位相遅れなく目標値に追従させて協調動作を実現するためのフィードフォワード補償器を設計した。さらに、加振機間のクロストークを抑制するための外乱推定補償器を設計した。設計した制御系の有効性は、プロトタイプ機を用いた実験により検証した。

(4) キーワード

振動台, シミュレータ, 2自由度制御, 加速度制御, 外乱抑制

(英文)

(1) Research title

Cooperation controller design realizing high-precision excitation in space-saving shaking table

(2) Name of researcher with title of position

Kenta Seki, Associate Professor, Nagoya Institute of Technology

(3) Summary

In this study, a control system is designed for a shaking table system with space-saving mechanism to accurately reproduce the target seismic acceleration on the table by operating the multiple actuators exactly. Based on a simulator incorporating multi-body dynamics with control system design software, a feedforward compensator for each actuator is designed to achieve the precise tracking performance without phase delay. In addition, a disturbance observer is designed to suppress the interference force between actuators. The validity of designed control system is verified by conducting experiments using a laboratory prototype of shaking table system.

(4) Key Words

Shaking table, Simulator, Two-degree-of-freedom control, Acceleration control, Disturbance suppression

2. 本研究の意義・特色

世界有数の地震発生国である我が国では、耐震設計技術の向上が不可欠である。その基盤となる耐震試験では、主に振動台を用いた加振実験が行われる。振動台では地震加速度を正確に再現する制御性能が求められる一方で、その設置コスト低減のために省スペース化も同時に要求される。省スペースを実現するためには加振機の設置方法を工夫する必要があり、そのために複数加振機を正確に協調動作させる制御技術が求められる。本研究では、スケールダウンプロトタイプを対象として、機構と制御システム全体の挙動を正確に再現可能なシミュレータを構築し、モデルベースで各加振機が遅れなく目標値通りに正確に再現するための制御系設計を行った。本研究で構築した機構と制御システムを連成させるシミュレータは様々なメカトロニクスシステムの設計に展開できる。さらに、複数加振機協調制御により省スペース化と加振制御性能の両立が可能となり、耐震試験の性能向上とともに拡大、普及に貢献できると考えられる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果

3.1 制御対象の構成

図 1 に本研究で対象とした振動台の外観を示す。なお、基礎検討として研究室レベルで実験できるスケールダウンプロトタイプである。各加振機はテーブルの側面に沿って配置されており、テーブルとはボールジョイントで、固定部とは自在継手で連結されている。テーブル下面には低摩擦無給油スライドを設置し、平面 3 自由度の運動を可能としている。各加振機はサーボ弁によって駆動され、シリンダ内の圧力、変位、加速度を計測し、フィードバック信号として利用できる。テーブル上部には 3 軸加速度センサを設置し、テーブル加速度波形を評価する。図 1 の振動台の構成では、加振軸線上加振機を配置する従来構成よりも設置スペースを小さくできる反面、一方向のテーブル加振においても全ての加振機を駆動させる必要がある。そのため、テーブルの目標運動を実現するための加振機指令の生成、加振機の応答遅れの補償、各加振機運動のクロストークの低減が必要となる。

3.2 制御系の構成

3.2.1 シミュレータの構築

モデルベースで制御器設計と評価を行うためのシミュレータを構築した。その構成を図 2 に示す。複雑な加振機とテーブルの運動は機構解析ソフトウェア上で再現する。そして、加振機のダイナミクスと制御アルゴリズムは、制御系設計ソフトウェアを用

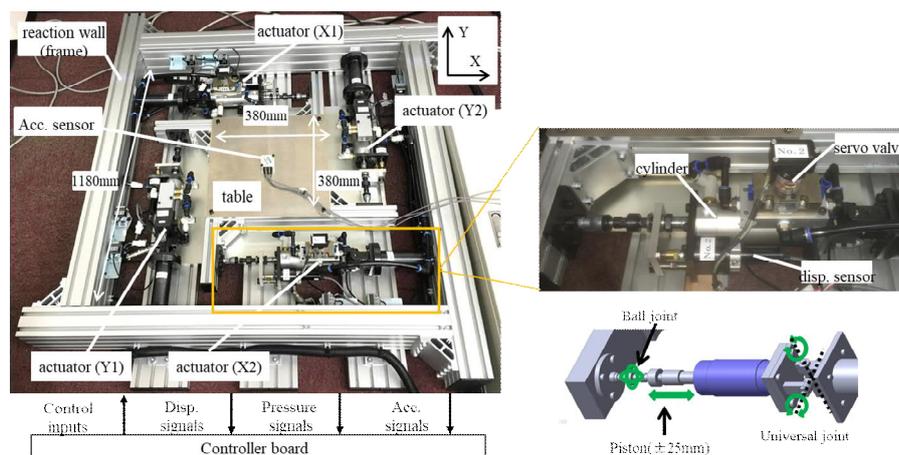


図 1 供試振動台の外観

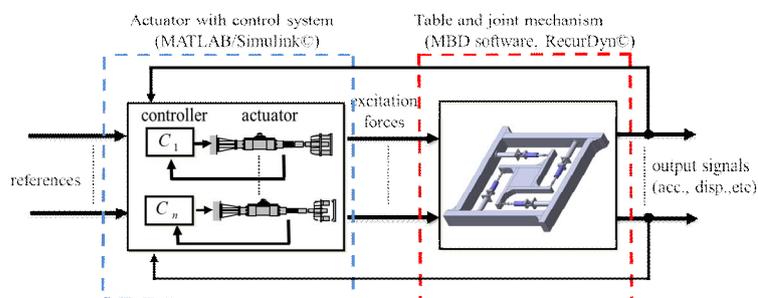


図 2 構築したシミュレータの構成

い、両者を連成させることで振動台システム全体をシミュレーションできる環境を構築した。加振機のパラメータは要素試験により同定し、シミュレータ上で発生する加振力を機構解析ソフトウェアに入力する。それに基づき、テーブル運動の解析を実行し、各部の変位や加速度を制御系への入力としている。

3.2.2 制御系の設計

指令生成

図 3 に基本制御システムの構成を示す。所望のテーブル運動を実現するためには、各加振機を協調動作させる必要がある。そのため、装置の幾何学配置を基に所望のテーブルの平面 3 自由度の運動を実現する各加振機先端変位、加速度軌道を算出し、目標指令としている。

フィードフォワード補償

各加振機に対してフィードバック制御系が設計されるが、加振実験では安定性が最優先されることから、制御系は十分な安定性が考慮される。そのため、目標値に対する追従性の観点からは加振周波数帯域内の位相遅れは避けられない。本対象では各加振機の動作が完全に一致する必要があることから、この位相遅れを補償する必要がある。本研究では、零位相差追従補償器 (ZPETC) を設計し、目標値に対して各加振機が遅れなく追従することを可能とした。

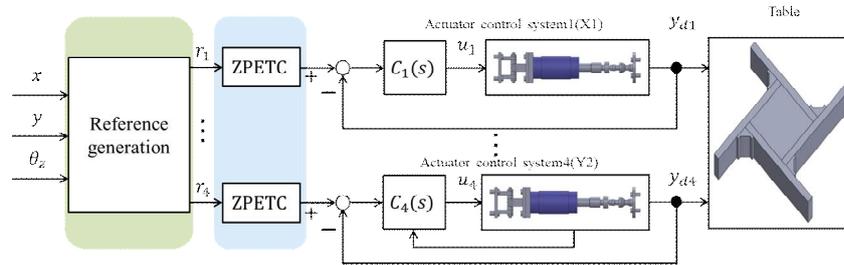


図3 制御システム全体の構成

フィードバック制御系

テーブル上には試験対象物が設置されることと、配線の取り回しの難しさや加振中の断線を防ぐためにセンサが設定されない場合もある。そのため、本研究では加振機毎にピストンの変位と加速度をフィードバックする制御系を構成する。その基本構成は、油の圧縮性に起因した共振振動に減衰を加えるための加速度マイナーフィードバックと、ピストンの定位性を確保するための変位信号に対する比例積分補償器とした。各補償器のゲインは制御系の安定余裕を十分確保するように設計される。そのため、試験対象物からの反力や加振機間のクロストークなどの外乱の影響を十分抑制することができない。そのため、外乱オブザーバを設計し、十分な外乱抑制性能を実現する。

図4に加振機フィードバック制御系のブロック線図を示す。 $G_a(s)$ は加振機伝達関数、 M はテーブルを含む負荷質量、 f_r は加振力、 y_a はピストン加速度、 y_d はピストン変位、 r は目標変位、 K_a は減衰付与のための加速度フィードバックゲイン、 $C_{fb}(s)$ は比例積分補償器、 DOB は外乱オブザーバである。外乱オブザーバへの入力信号である速度信号は、コンポジットフィルタを用いて加速度信号と変位信号を融合し、高帯域な速度信号を生成した。 $G_{hpf}(s)$ は3次のハイパスフィルタ、 $G_{lpf}(s)$ は3次のローパスフィルタであり、それぞれ加速度信号のドリフト低減と変位微分信号の高周波ノイズを低減するように設計している。両者の分離周波数は、各センサ信号の動特性を考慮して設定した。これにより、広い帯域で外乱抑制性能を向上させた。

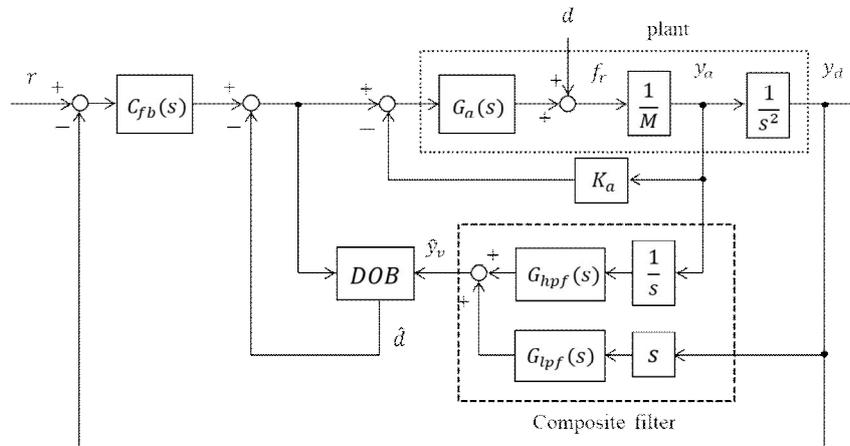


図4 フィードバック制御系のブロック線図

3.3 実験結果

図 1 に示したプロトタイプを用いて加振実験を行い、設計した制御系の有効性を検証した。図 5, 図 6 に実験結果を示す。図 5 はテーブル 1 軸方向加振の結果であり、X 軸方向のみに 1~6Hz の周波数成分を有するランダム加速度信号を入力したときのテーブル加速度応答を示している。図 6 は、テーブル 2 軸同時加振の結果であり、X, Y 両軸に 1~6Hz の周波数成分を有するランダム加速度信号を入力している。各図、上段はテーブル加速度時間波形、下段はその周波数解析結果であり、黒線は目標値、青線は外乱オブザーバを付加しないときのテーブル加速度応答結果、赤線は設計した外乱オブザーバを付加したときのテーブル加速度応答結果を示している。これらの結果から、特に外乱オブザーバを付加することで、各加振機間のクロストークの影響を抑制しつつ、目標加速度に良好に追従する結果が得られた。

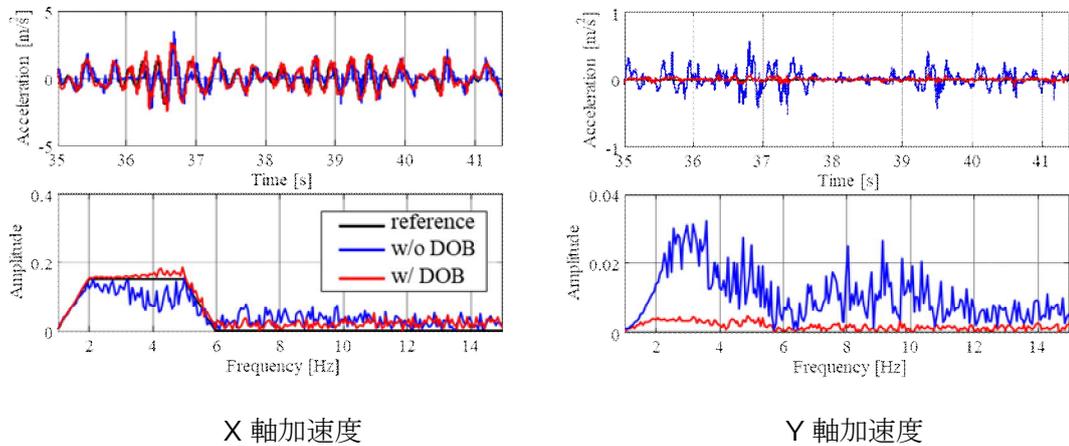


図 5 テーブル 1 軸方向加振時の実験結果

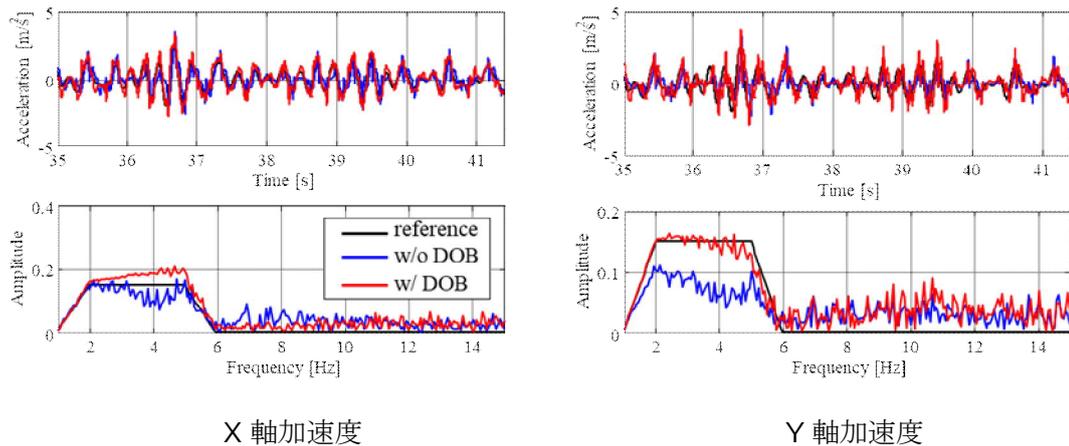


図 6 テーブル 2 軸同時加振時の実験結果

4. 本研究を実施したグループに属する主な研究者の氏名・職名

関 健太 名古屋工業大学 工学部 准教授

5. 研究実施時期

2017年（平成29年）3月1日から 2019年（平成31年）2月28日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- [1] S.Kaida, K.Seki, M.Iwasaki, Improvement of Accuracy of Seismic Waveforms Using Disturbance Observer in Multi-Axis Shaking Table Systems Proc. of the 43th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.4043–4048,2017
- [2] S.Kaida, K.Seki, M.Iwasaki, Design of Disturbance Observer Using Composite Filter in Two-Dimensional Shaking Table System, Proc. of 15th International Workshop on Advanced Motion Control, pp.379–384, 2018
- [3] 松岡 将史, 関 健太, 岩崎 誠, 2次元振動台における加速度信号を用いた MCS 手法の適用, 第 61 回自動制御連合講演会, 9E3, pp.1515–1518, 2018
- [4] M.Matsuoka, K.Seki, M.Iwasaki, Disturbance Compensation Using Minimal Control Synthesis Algorithm in Two-dimensional Shaking Tables, IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, TT8-3, pp.1–4, 2019

7. 内外における関連研究の状況

振動試験機の製造および制御技術の開発は、主に日本と米国の数社が手掛けており、様々なタイプの試験機を提供している。一方で、近年中国からも多くの研究論文が掲載されている状況にあり、本研究で取り組んだように、機構と制御を同時に考慮した差別化した装置の開発が求められている。制御技術に関しては、古くから油圧システムの非線形性の補償、供試体搭載時の影響抑制、複数加振機の干渉抑制などに関して研究開発が行われてきた。一方で、近年のセンサの低コスト化、ワイヤレス化の進展から、振動試験機にもワイヤレスで複数のセンサ信号を使った新たな制御系構築が求められる。さらに、耐震試験の低コスト化、試験時間短縮、省力化も重要視されており、本研究で取り組んだ装置自体の改善のみならず、構造物の部分的な実試験とシミュレーションをリアルタイムで同期させたハイブリッド実験についても多くの検討と実証実験が行われている状況である。

8. 今後の発展に対する希望

スケールダウンプロトタイプでの実験検証を行ったが、更なる制御精度向上と実物スケールでの実証実験が望まれる。