

## 【補助事業概要の広報資料】

補助事業番号 28-120  
補助事業名 平成28年度 アクティブ振動技術向上に向けた研究 補助事業  
補助事業者名 東京海洋大学 学術研究院 助教 小池雅和

### 1 研究の概要

精密な測定・加工分野では床振動やテーブル上で発生する振動外乱が問題になっている。本研究の目的は、安価なon-off弁を用いた精度の高い振動抑制技術を実用化レベルの技術として引き上げることである。そのために、位置決め誤差を小さくする手法を提案し、数値シミュレーションおよび実機実験によりその有効性を検証した。その結果、20ミクロンの精度で位置決めを実現した。

### 2 研究の目的と背景

精密な測定・加工分野では床振動やテーブル上で発生する振動外乱が問題になるが、現状ではパッシブな除振装置を導入する程度であり、振動が収まるまで十分時間をかけた後に測定・加工を行っている。また、設備費が潤沢にある企業であれば、高価なサーボ弁を用いたアクティブ制御を用いて、より短い時間で測定・加工を行っているが、そのような企業は稀である。よって安価な装置構成でアクティブな振動抑制を可能にする技術が求められている。そこで、本研究の目的は、安価なon-off弁を用いた高精度なアクティブ振動抑制制御技術を実用化レベルの技術として引き上げることである。

### 3 研究内容

目的達成のために以下の4つの研究をおこなった。(1) 厳密に定常偏差をなくす手法の構築, (2) 鉛直並進, ロール回転, ピッチ回転方向への拡張, (3) サーボ弁を用いた場合との性能比較, (4) 計算負荷の小さいアルゴリズムの開発。

#### (1) 厳密に定常偏差をなくす手法の構築

URL (<http://masakazukoike.site44.com/interestsjp.html>)

本事業は空圧式除振台の鉛直方向変位に対する高精度な振動抑制を目的としており、具体的には制振性能を高めつつ、定常偏差を厳密になくすアルゴリズムの開発を目指した研究である。まず、流量から台の変位までの特性を運動方程式をベースとしてモデリングをおこなった。そして、本研究のメインテーマでもある、「公倍数制約付きの制御入力の生成方法」を考案し、数値シミュレーションによって、その有用性を確認した。なお、この制御手法の内容は第59回自動制御連合講演会(11月10日～11月12日開催, <http://www.jsme.or.jp/conference/rengo59/>)にて発表した。また、実機を用いて基礎実

験をおこなった。具体的には、公倍数制約を満たす入力を印加する前後の空気ばねの圧力、台の変位等を計測し、その再現性を評価した。その結果、当初想定していた電磁弁は空気の漏れが顕著に発生する事が新たに分かり、漏れのないクロダニューマティクス社製の電磁弁（VA01HPSC24-1PE-L5）に変更した。さらに、ヘルツ株式会社・安田社長と技術相談をおこない、「インパルス外乱から2秒以内に振動を抑制することが現場で求められている」こと、「空気ばね内の空気が湿度に対しては感度良く変化しない」などの知見を得た。さらに、研究を進めていくと、公倍数制約を満たす入力であっても実機実験の場合には定常偏差が残ることが明らかになった。その原因は、空気ばね内の圧力に依存して、入出力流量が複雑に変化するためであった。図3.1.1は公倍数制約を満たす入力A,Bをフィードフォワード入力した例である。理想状態では公倍数制約を満たす入力であれば、入れた空気の量と出た空気の量が一致し、テーブルは元の位置に戻るはずだが、A,Bの入力を比較すると、Bは戻っていないことが分かる。そこで、モデルベースで制振性能を高める入力列を求め、事前実験によって厳密にオフセットを除去するように効率良く入力列を修正する手法を開発した（以下「オフセットゼロ入力生成手法」と呼ぶ）。その結果、20ミクロンの範囲で定常偏差を抑えることに成功した。なお、この応用例として、任意の目標値へ変位を追従させるサーボ系設計にも取り組んでおり、その時間応答図を図3.1.2に載せる。

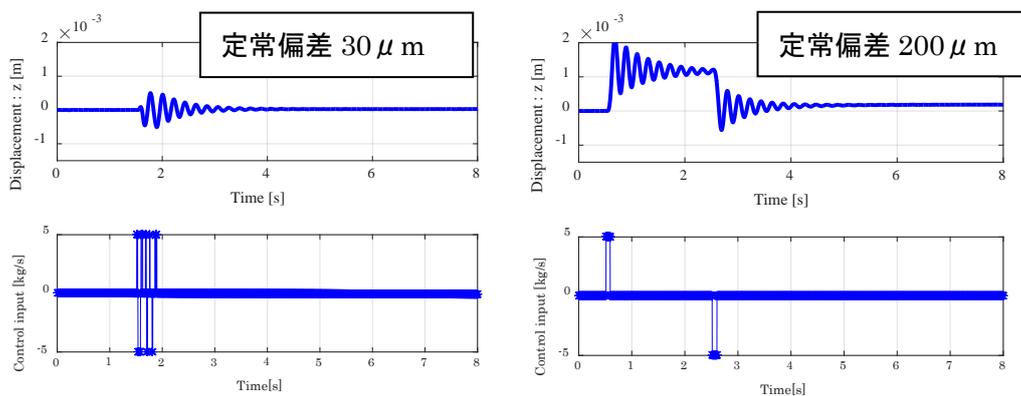


図3.1.1：公倍数制約を満たす入力を印加した場合のテーブル変位（左：入力A, 右：入力B）

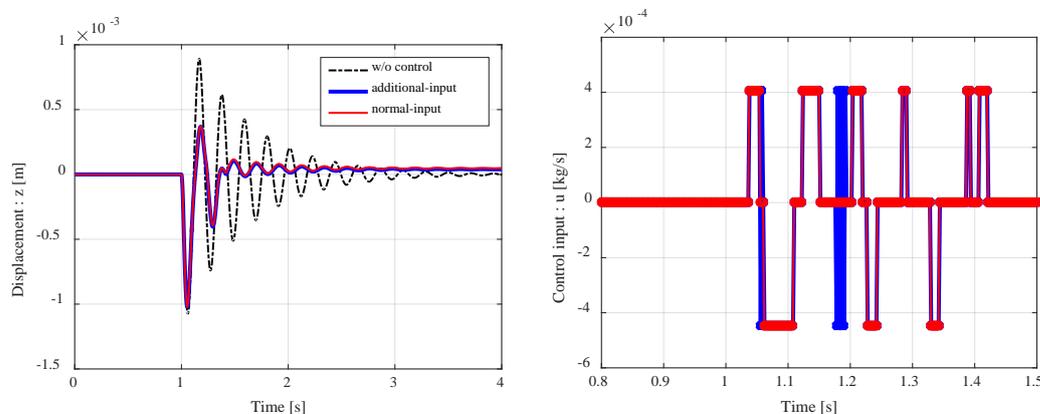


図3.1.2：オフセットゼロ入力を応用したサーボ系の時間応答（目標値は50 μm）

## (2) 鉛直並進, ロール回転, ピッチ回転方向への拡張

本事業は鉛直並進方向のみの振動抑制制御から, 加えてロール回転方向・ピッチ回転方向まで考慮にいたれた振動抑制制御手法に拡張する研究である. 鉛直並進方向とロール回転方向の振動抑制を実現するアルゴリズムを開発した. 四つの空気ばねのうち左側系統の空気ばね二つと右側系統の空気ばね二つを独立に動作させることができる機械構成を想定し, モデリングを実施し, 各系統に関して, 公倍数制約を満たす制御入力を生成させている. 数値シミュレーションによって, その有用性を確認しているが, ピッチ回転方向への拡張にはまだ至っていない. なお, この制御手法の内容はThe 36th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (2017年2月20日~22日開催, <https://www.iasted.org/conferences/home-848.html>)にて発表した. さらに, この拡張についてもヘルツ株式会社・安田社長と技術相談をおこない, ピッチ回転方向を加える際の問題点について議論した. また, 実機実験検証用に図3.2.1の装置を製作した. ただし, 「厳密に定常偏差をなくす手法の構築」でも述べたように, 公倍数制約を満たす入力では実機に適用した際, 厳密にオフセットを無くすことはできない. オフセットゼロ入力生成手法を拡張すれば, この問題を解決できると期待できるが, この拡張までは至っていない.



図3.2.1 : 実機実験装置

## (3) サーボ弁を用いた場合との性能比較

本事業はアクチュエータとして安価で入力分解能の非常に低いon-off弁を用いた場合と, 高価で入力分解能の高いサーボ弁を用いた場合で, 制振性能を比較する研究である. サーボ弁(ピー・エス・シー株式会社製AS310L-007)を購入し, 周辺機器を組み合わせることで動作確認をおこなった. その後, 既存設備として所有している1軸制振用除振台を用いた制振制御実験をおこなった. その際, 流量調整のゲインのチューニングが非常に難しく, 予想以上に平衡状態を作り出すことが困難であった. そのため, 理想状況を仮定した数値モデルを構築し, 数値シミュレーションにおいて, on-off弁との比較をおこなった. その結果, サーボ弁を用いた線形入力の方がより高い制振性能を有することを確認した. 図3.3.1は比較応答

図である。明らかにサーボ弁を利用した場合と比較して、on-off弁でも適切なタイミングで入力を加えれば、高い制振性能が得られることが分かる。実機検証は今後の課題である。

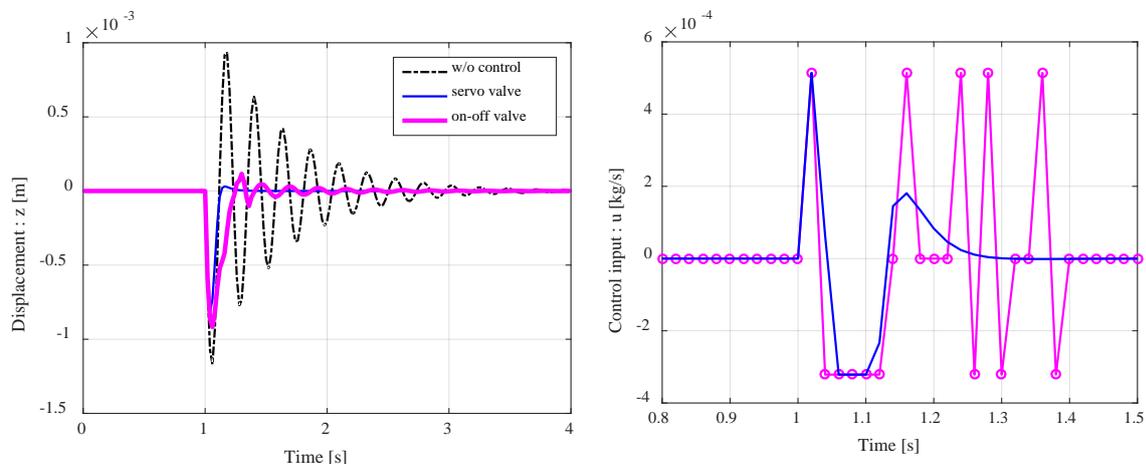


図3.3.1: サーボ弁を用いた場合とon-off弁をもちいた場合の性能比較

#### (4) 計算負荷の小さいアルゴリズムの開発

本事業では制御入力の計算負荷を低減するためのアルゴリズムを開発する。低次元化手法の代表例である平衡実現と打ち切り法を用いて、次数の低いコントローラの設計をおこなった。あまりに極端に低次元化を施すと制振性能が劣化してしまうため、性能劣化が小さい範囲で低次元化を施した。その結果、制振性能を維持したままでは、8次のシステム（2軸制振用除振台装置に対応）に対して6次までしか低減できないことがわかった。

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

今回の研究で提案した手法はインパルス外乱の印加を前提とした非常に限定的なものではあるが、安価な装置構成で制振性能を維持しつつ、20ミクロンの精度で定常偏差をなくすることができる。これによって精密測定や精密生産現場でのアクティブ除振装置の導入が加速すると予想される。また、ステップ外乱等、複雑な外乱に適応可能な手法の研究も精力的になされると思われる。さらに、空圧式除振台を対象に研究を進めてきたが、on-off弁を用いた油圧や水圧システムにおいても、同様に提案手法を用いることができるので、これらの装置に対しても導入が社会で促進すると予想される。この研究をさらに高めることで、精密部品の測定・製造分野においてエネルギー消費の削減につながることを期待する。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

2010年から空圧式除振台のアクティブ制御に関して研究を続けているが、定常偏差を厳密になくすことは当初からの課題であった。今回の研究ではこの問題を解決する一つの糸口（本質）になり、極めて重要な位置にある。また、申請者の主たる研究は二つあり、一つは「区間解析を利用した電力の発電計画問題」であり、もう一つが今回の内容に関連する「空

圧式除振台のアクティブ制御]である。よって今回の研究はメイン研究の半分を占めている。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

### 【学会発表】

(1) 井上良太, 小池雅和, 章ふえいふえい, 田原淳一郎:

吸排気入力に関する公倍数制約を考慮したon-off弁型空圧式除振台の高精度な位置決め制御,

第59回自動制御連合講演会, SaA4-4, 2016年11月, 北九州.

(2) Masakazu Koike, Feifei Zhang, Junichirou Tahara:

Multi-axis positioning control for pneumatic isolation table by using on-off valves, Proc. of The 36th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, pp186-193, Innsbruck.

## 7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

該当なし

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの

学会発表論文2件(上述6のもの)

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 東京海洋大学 学術研究院

住 所: 〒135-8533

東京都江東区越中島2-1-6

申 請 者: 助教 小池雅和(コイケマサカズ)

担 当 部 署: 海洋電子機械工学部門(カイヨウデンシキカイコウガクブモン)

E-mail: mkoike0@kaiyodai.ac.jp

U R L : <http://masakazukoike.site44.com/indexjp.html>