

K4-62

低次元化物理モデルを用いて搭載物の振動特性を考慮した アクティブ除振装置のモデリングと制御の研究

Modeling and Control of Active Isolation system taking the vibration modes of Elastic Load into Account by using the Reduced order physical model

○塩原和弥¹、太田秀満¹、須藤 佳祐²、渡辺 亨³、背戸 一登⁴、田中 宏幸⁵

Kazuya SHIOBARA¹, Hidemitsu OTA¹, Keisuke SUDO², Toru WATANABE³, Kazuto SETO⁴, Hiroyuki TANAKA⁵

This paper deals with the control system for active isolation table. It aims at controlling vibration of the installed object and isolation table. An experimental isolation table with flexible loaded object is built. Control simulations and experiments are carried out by using feedback controller designed by using LQ&P control theory.

1. 緒言

精密機器は微小な振動で、性能・精度が低下するため、性能を維持するには除振装置が必要となる。除振台に精密機器を搭載すると、除振装置全体の振動特性が変化してしまう。よって除振台だけでなく搭載物を含めた装置全体の制御が必要となり、搭載物を考慮したモデルが求められる。本研究では弾性振動特性を持つモデルを搭載させ、搭載物の弾性振動を考慮したモデリングを行う。本文では、実機を用いた除振装置のモデルの作成方法・制御方法を紹介し、シミュレーションと実機の制御結果を比較する。

2. 実験装置概要

本研究では、鉛直方向に高い電子顕微鏡を搭載することを想定している。テーブルは 320×320×15 mm のアルミ製である。搭載物は高さ 710 mm で、2本の角柱と2つのブロックより構成される。テーブル部は鉛直方向に4つの円弧ばね、水平方向に8つのリニアガイドにより支えられており、各々ピアノ線で接続している。また鉛直方向に4つ、水平方向に4つのボイスコイルモータによって制御力を伝えている。Fig. 1 に実験装置の外観を示す。

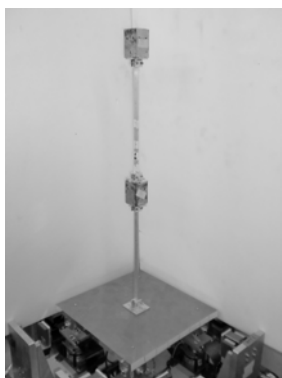


Fig.1 Overview of the Isolation System

3. 除振装置の振動特性

実験で得られる周波数応答を基に、実験モード解析ソフト Me' Scope から実験装置のモード形を調べた。そのモード形を Fig. 2 に示す。3つのモード形はすべて x 軸方向のものであり左から順に、1次モードのピッチングモード、2次モードのテーブル部のスウェイングモード、3次モードの弾性曲げモー

ドである。これら3つを制御対象とする。

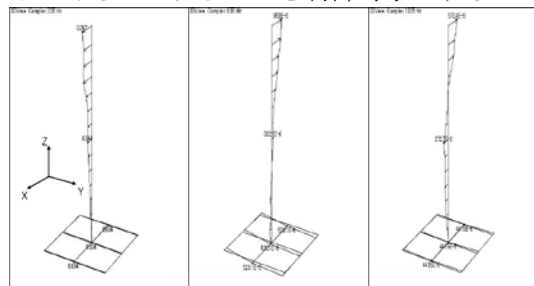


Fig.2 Vibration mode shapes of isolation table

4. モデリング手法

制御対象とする振動を低次元化物理モデル作成法に基づきモデリングした。

- ① 3次モードまでの、制御対象構造物の振動特性を調べる。
- ② 低次元化する自由度(次数)を決定する。今回は質点の数が3つのため、3自由度である。
- ③ 質点の配置ポイントを決める。各振動モード形を良く表せる点をモデリングポイントとして選択する。1次モードでは頭頂部・2次モードではテーブル部・3次モードでは中間部をモデリングポイントとする。

実験装置から、質点・バネ・ダンパのみで構成された簡単なモデルを作成する。

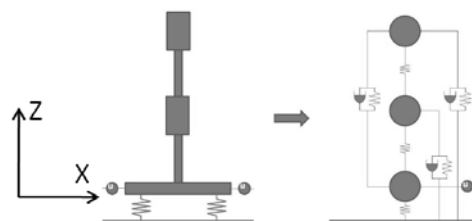


Fig.3 Concept of modeling

- ④ モード行列 Φ と各質点の等価質量 μ を求める。
- ⑤ 「低次元化物理モデル作成法」に基づいて質量行列 M ・剛性行列 K を求める。

$$M = \Phi^{-T} \Phi^{-1} \quad (1)$$

$$K = \Phi^{-T} \kappa \Phi^{-1} = \Phi^{-T} \omega^2 \Phi^{-1} \quad (2)$$

減衰行列 C は比例減衰的に求めた。

- ⑥ 運動方程式を立てて、制御系設計を行う。

5. モデリングの妥当性

作成したモデルと実機の周波数応答の比較図を示す。

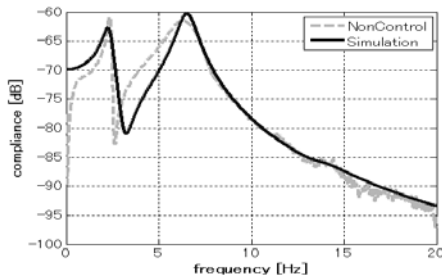


Fig.4 Transfer functions by model and experiment

6. 制御方法

制御ブロック線図を下記に示す. LQ制御理論を適用させたブロック線図をFig.5に、P包含LQ制御を適用させたものをFig. 6に示す. モデリングの際に無視している高次モードから引き起こるスピルオーバー対策として、ローパスフィルタを挿入している.

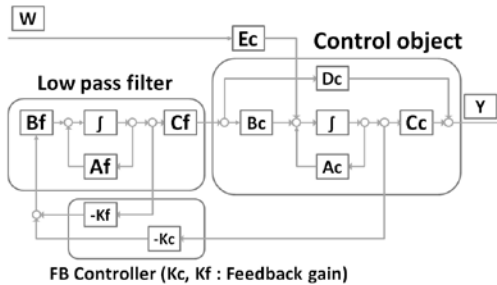


Fig.5 Block Diagram of LQ control method

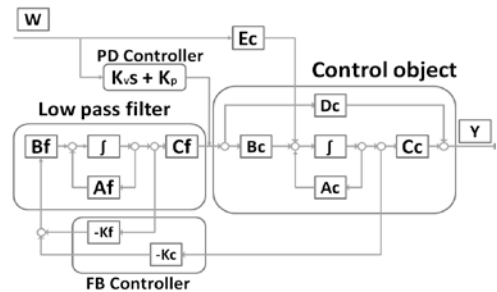


Fig.6 Block Diagram of P+LQ control method

7. 制御シミュレーション

モデルを用いたシミュレーションで、非制御時とFB制御時の周波数応答を比較したものをFig.7.8.9に示す. 破線が非制御時、実線は制御時を示す. グラフは全て直動外乱入力で、テーブル加振テーブル観測である.

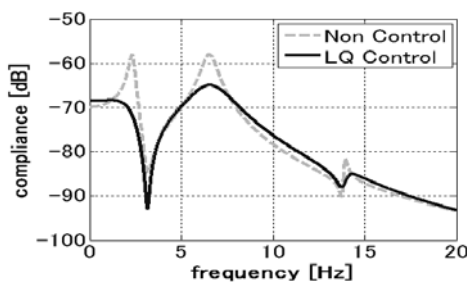


Fig.7 only LQ control

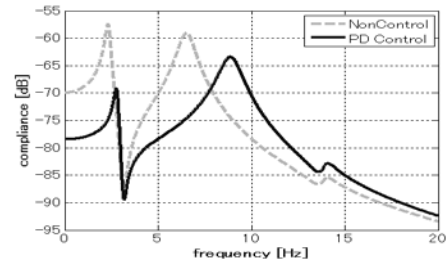


Fig.8 only P control

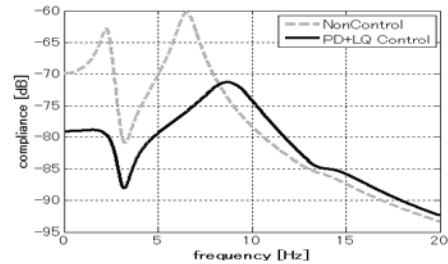


Fig.9 P+LQ control

8. 実機による制御実験

実機による非制御・LQ制御・P包含LQ制御時の周波数応答を比較したものを Fig.10に示す. 入力は地面加振で、頭頂部を観測した.

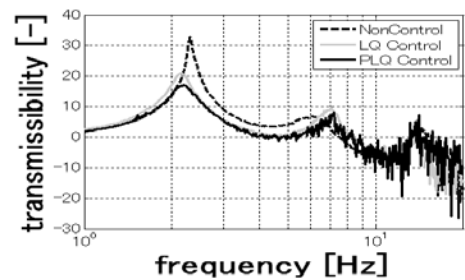


Fig.10 Transfer functions by experiment

9. 結論

低次元化物理モデルを用いて作成したモデルと実験装置の振動特性の妥当性が確認された. シミュレーションと実機にLQ制御理論より求めたFB制御をかける事によって周波数応答のピークを抑える事ができた. シミュレーション上でのP(比例)包含LQ制御をかける事によって低周波域のゲインを下げる事ができ、除振性能を向上させる事ができた.

10. 今後の展望

これまでは LQ 制御と P(比例)制御をかけていたが、今回はさらに D(微分)制御をかけて、ピークをさらに低減できるようにする。また、これまではレーザー変位センサを用いていたが、加速度ピックアップを用いて性能をさらに向上させる。

11. 参考文献

- [1]長松昭男 著 「モード解析入門」 コロナ社
- [2]背戸 一登・丸山 晃市 著 「振動工学 解析から設計まで」 森北出版株式会社
- [3]背戸 一登 著 「構造物の振動制御」 コロナ社