K4-46

搭載物の動特性を考慮したアクティブ除振台のためのフィードフォワード併合制御

Feedforward Augmented Control for an Active Isolator taking Dynamical Property of Elastic Load into account

長谷川　諒[1], 植田　貴大[2], 肱岡　純也[2], 渡辺 亨[3], 背戸 一登[4], 田中 宏幸[5]
Ryo HASEGAWA[1], Takahiro UEDA[2], Junya HIJIOKA[2]
Toru WATANABE[3], Kazuto SETO[4], Hiroyuki TANAKA[5]

This paper deals with the control system design 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 sub-optimal, absolute velocity feedback control and feedforward control.

１．緒言

高精度の精密機器は微小な振動で，性能・精度が低下する．この微小な振動対策として，除振装置の研究が様々に行われている．その多くは地面からの振動絶縁のみを考慮したものであるが，除振台に大型の精密機器や縦長の形状をしているものを搭載したときには，搭載物による連成振動がおき，除振台と搭載物が一体となって揺れるような振動が生じ，問題となっている．本研究では除振台のみの制御で振動絶縁と制振効果を与えることを目指す．そのために，塔状弾性搭載物の振動特性も考慮したモデリング制御系の設計を行う．

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．

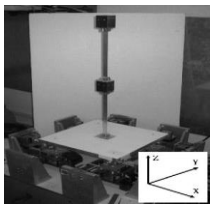

Fig.1 Overview of the Isolation System

３．実験装置の振動特性

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 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ライディングモード，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．

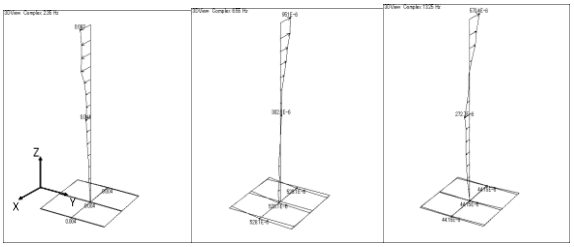

Fig.2 Vibration mode shapes of isolation table

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[2,3]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．

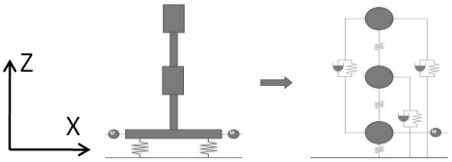

Fig.3　Concept of modeling

④ モード行列Φと各質点の等価質量μを求める．

⑤ (1),(2)式から質量行列 M・剛性行列 K を求める．

1:日大理工･学部･機械 2:日大理工･院･機械 3:日大理工･教員･機械 4:背戸振動制御研究所 5:株式会社　昭和サイエンス

$$M = \Phi^{-T}\Phi^{-1} \tag{1}$$

$$K = \Phi^{-T}\kappa\Phi^{-1} = \Phi^{-T}\omega^2\Phi^{-1} \tag{2}$$

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．準最適制御(sub optimal control)

従来, 状態フィードバック制御を行うには最適制御理論を用いることが多い．しかし最適制御を行うには全ての状態を観測する必要がある．しかしながら，多自由度モードの全質点に全てのセンサを取り付ける事はコストの面から見ても一般的ではく，質点の多い場合は全ての状態量を観測するのは困難である．そこで構造制約のある場合の解決方法として知られている準最適制御理論を用いる．今回は，中央部のセンサを無視し，センサ数を 2 つに減らしつつ 3 次モードまでを考慮する事が可能である.

６．準最適制御による制御実験

準最適制御において，Fig.4 に制御時と非制御時での地面加振を行った場合のテーブル観測の結果を示す. これにより，非制御時に比べ良好に制御されていることが確認できる.

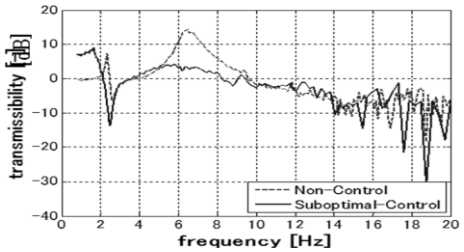

Fig.4　Frequency response to ground disturbance

７．速度 FB・FF による制御実験

現在の準最適制御系に対して，テーブルに関する除振性能の向上を図るため，搭載物を除き，テーブルのみで速度フィードバック制御をおこなう．またフィードバック・フィードフォワード制御を組み合わせた結果を Fig.5 に示す.

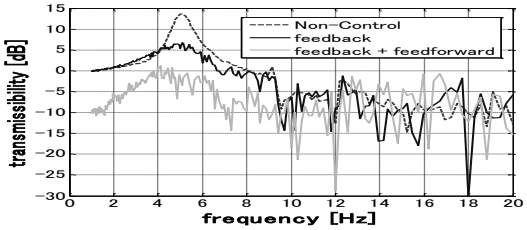

Fig.5 Frequency response ground disturbance only table

８．FF 併合制御による制御実験

第 6 章, 第 7 章の結果をふまえて，この実験を行う. FF 併合制御とは準最適制御と速度 FB・FF 制御理論の 2 つを組み合わせたものである．頭頂部のシミュレーション結果を Fig.6 に実験結果を Fig.7 に示す.

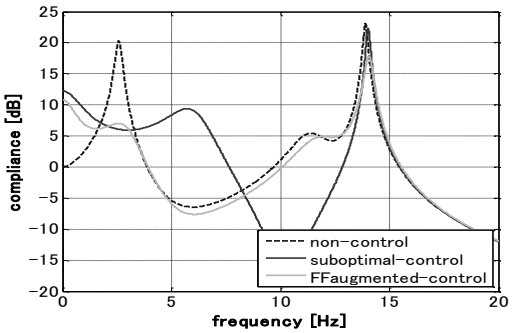

Fig.6 Frequency response to ground disturbance at the top point of installed object (simulation)

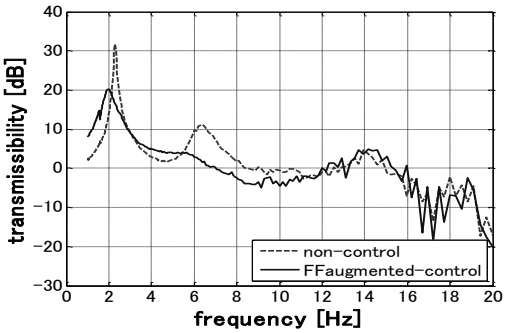

Fig.7 Frequency response ground disturbance at top point of install object (experiment)

９．結論

FF 併合制御の実験では，これまで提案したすべての制御を同時に適用した状態で制御が可能であることを確認したがシミュレーションで確認されたような低周波域での振動低減効果は得られなかった.

１０．今年の研究

FF 併合制御を実現するために準最適制御と速度 FB・FF による制御の精度の向上を目指し, 制御器の改良を行う.

改良された制御器を用いて加振実験を行う.

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
[4]保坂 まき・鎌田 崇義 : フィードフォワード制御を併用した梁のピエゾアクチュエータによる上下振動の制御
第 47 回自動制御連合講義会 CD-ROM,C(2004)