506 磁気浮上を用いた防振装置の床振動に対する制振の研究

Research of Vibration Control from Floor Vibration by Magnetic Levitated Isolator

○学 東中須 一彰 (九大院) 学 土居 信明 (九大工)
正 金光 陽一 (九大工) 正 雄本 信哉 (九大工)
正 松田 浩一 (九大工) 正 渡辺 和英 (荏原総研)

Kazuaki HIGASHINAKASU, Kyushu University, Hakozaki6-10-1, Higashi-ku, 812-0053
Nobuaki DOI, Yoichi KANEMITU, Shinya KIJIMOTO, Koichi MATSUDA, Kyushu University
Katsuhide WATANABE, Ebara Research, Co. Ltd.

Key Words : Magnetic Levitation, Vibration Isolation Control, H_∞ Control

1.緒言

近年、半導体デバイス技術の高度化に伴い、半導体製造装置や検査装置等に対し高性能、高信頼性が強く望まれている。しかし、これらの装置では、装置内や設置床からの励振力による装置の振動を小さくしなければ、その性能を十分に発揮することはできない。そのため、これらの嫌振装置を使用する場合、装置を防振装置に搭載して、その振動を極力除去することが必要である。

しかし、従来主流であった受動形防振装置の場合、低周波数帯域の振動を防振することは困難であり、また共振周波数で振動レベルが大きくなる問題もある。これらの理由から、受動形防振装置で微振動を絶縁するのは困難である。

本研究で取り扱う磁気浮上防振装置では、精密な防振が可能であり、共振周波数での振動伝達率を1以下にできる^[1]。また、磁気浮上により制御対象を非接触支持するため、多くの長所を持つ。

防振装置に加わる外乱は、床振動外乱であり、0.1~10Hzの低周波数帯域で振幅が大きい。また、磁気浮上防振装置も低周波数帯域での防振特性が悪くなっている。そのため、前報にて制御対象である防振テーブルを1自由度で制御し、良好な結果を得た^[2]。

本研究では、防振テーブルの制御は3自由度で行う。その際、低周波数帯域に着目し、 H_∞ 制御を用いて、床振動から防振テーブルまでの振動伝達率を極力小さくする制御器を設計することを目的とする。

2.磁気浮上防振装置

磁気浮上防振装置は、防振テーブルを磁気吸引力で非接触支持し、床振動外乱の伝達を抑制する装置である。防振テーブルの寸法及びアクチュエータ、加速度センサの位置、座標軸をFig.1に示す。

Fig.1 Isolation Table

Fig.1 のように防振テーブルは、3つのアクチュエータにより支持される。また、各アクチュエータには、水平方向、鉛直方向に磁気力を発生する電磁石が内蔵されている。水平方向は、電磁石の漏れ磁束により受動復元力が働き基本的に安定であるため、考慮しない。そのため、制御に用いる電磁石は、鉛直方向の上下のペア電磁石である。

3.モデリング

本研究では、防振テーブルを鉛直方向変位 z 、X 軸回りの回転角 α 、Y 軸回りの回転角 β の3自由度で制御する。このときの、防振テーブルに関する並進と回転の運動方程式は以下の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{z} &= F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} \\ I_{\alpha}\ddot{\alpha} &= \ell_x F_{z1} - \ell_x F_{z2} \\ I_{\beta}\ddot{\beta} &= -\ell_y F_{z1} - \ell_y F_{z2} + \ell_y F_{z3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

F_{z1}, F_{z2}, F_{z3} 各アクチュエータの磁気吸引力
 I_{α}, I_{β} X 軸, Y 軸回りの回転モーメント
 ℓ_x, ℓ_y 防振テーブルの重心から各アクチュエータの中心点までの X, Y 方向の距離

である。

また、1つの電磁石により発生する磁気吸引力は、次式で表される。

$$f = k \left(\frac{i_0 + i}{x_0 - x} \right)^2, \quad k = \frac{\mu_0 N^2 A}{8} \quad (2)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 N はコイルの巻数、 A は磁極断面積、 i_0 は平衡状態での励磁電流、 i は平衡状態からの励磁電流の変動成分、 x_0 は平衡状態での空隙、 x は防振テーブルと床振動の変位差 (相対変位) である。

従って、上下ペアの電磁石で発生する磁気吸引力は、式(2)で表すことができる。

$$F_j = k \left(\frac{i_0 + i_m + i_j}{x_0 - x_j} \right)^2 - k \left(\frac{i_0 - i_m - i_j}{x_0 + x_j} \right)^2 \quad (3)$$

$$= k_{\alpha} x_j - k_{\beta} i_j \quad j = 1, 2, 3 \quad (4)$$

上式では、防振テーブルの自重を支えるためにオフセット電流 i_m を加えている。式(3)は非線形な式であるため、テイラー展開を用いて、平衡点近傍で線形化する。線形化により得た式(4)を式(1)に代入したものが、プラントの基本モデルとなる。

4. 制御系設計

4.1. 問題設定

制御器設計にあたり、 H_∞ 制御理論を適用する^[9]。外乱として床振動加速度外乱 $w_f = \{\ddot{z}_f, \ddot{\alpha}_f, \ddot{\beta}_f\}$ 、モデル化や線形化の際に無視したダイナミクスやパラメータの誤差等の不確かさによる外乱 $w_d = \{z_d, \alpha_d, \beta_d\}$ の2つを考え、これらの外乱による防振テーブルの絶対加速度 z_a 及び防振テーブルと床との相対変位 x_r への影響が少なくなるように制御器を設計する。制御量として、防振テーブルの各アクチュエータ点における絶対加速度と相対変位を考える。絶対加速度は、防振テーブルに取り付けた加速度センサで測定し、相対変位は、各アクチュエータに内蔵されている変位センサで測定する。

4.2 重み関数の選択

4.2.1 床振動外乱に対する重み関数の選択

3つのアクチュエータに加わる鉛直方向の床振動外乱により、防振テーブルには、鉛直、回転方向の床振動外乱 $\ddot{z}_f$ が伝達する。各アクチュエータに加わる床振動外乱のパワースペクトルを Fig.2 に示す。Fig.2 より、床振動外乱の鉛直方向成分は、低周波数帯域で大きいことがわかる。また各アクチュエータ間の距離は近いので、防振テーブルに加わる床振動外乱は、鉛直方向成分が最も大きいと考える。床振動外乱から防振テーブルの絶対加速度までの周波数特性を整形するため、低周波数帯域でゲインの大きい式(5)の重みを選択する。

$$W_s = 2368s / (s+5)(s+157) \quad (5)$$

Fig.2 Power Spectrum of Floor Vibration

4.2.2 モデル誤差に対する重み関数の選択

制御モデルは、パラメータの不確かさやモデル化の際に無視した高次の振動モードなどにより、実際の制御対象とはモデル誤差が生じる。そのため、制御モデルに対して特性が良好でも実際の装置では、その特性が得られない場合がある。一般にモデル誤差は、高周波数帯域で影響する。そのため、高周波数帯域でゲインの大きい式(6)の重みを付けて、ロバスト性を持たせる。

$$W_t = 105(s+377)/(s+132000) \quad (6)$$

4.2.3 相対変位に対する重み関数の選択

防振テーブルが安定に浮上するには、相対変位の変動が磁極間隙間 $\pm 0.35\text{mm}$ 内に収まっている必要がある。そのため、床振動から相対変位までの周波数特性を整形するために式(7)の重みを用いる。

$$W_d = 0.05 \quad (7)$$

4.3 制御器の設計

基本プラントに式(5)から式(7)の重み関数やセンサ特性等を加えた拡張プラントに対し、 H_∞ 制御問題を適用する。その結果、6入力3出力で、30次の制御器が求められた。この制御器を用いた時の床振動加速度外乱 w_f から防振テーブルの絶対加速度 z_a への周波数応答の結果を Fig.3 に示す。Fig.3 から 0.1Hz 程から床振動に対する防振が行われることがわかる。

Fig.3 Transfer Function of Acceleration from Floor w_f to Table z_a

5. シミュレーション

Fig.2 の床振動外乱を用いてシミュレーションを行った。4.2.1 で述べた理由により、防振テーブルに伝達する床振動外乱は、鉛直方向の振動が大きいと考え、Fig.2 の床振動が防振テーブルの鉛直方向に伝達すると考える。Fig.4 は、伝達する床振動外乱の時刻歴を示しており、その時の防振テーブルの絶対加速度 $\ddot{z}$ の時間応答を Fig.5 に示す。また、その時のアクチュエータにおける相対変位、制御電流の時間応答を Fig.6 に示す。この結果より、どちらも許容範囲内 ($\pm 0.35\text{mm}$, $\pm 5\text{A}$) に収まっていることがわかる。

6. 結言

本研究では、磁気浮上防振装置を3自由度でモデル化し、 H_∞ 制御理論を用いて制御を行い、低周波数帯域の床振動外乱に対する防振特性について検討した。本研究のシミュレーション結果より、0.1Hz 以上の周波数帯域で床振動を抑制できることがわかった。

7. 参考文献

- [1] 金光, 渡辺: 精密機器用磁気浮上除振装置の設計, 機械設計, 第38巻第7号, p65~71, 1994
- [2] 東中須, 高木: 機論 九州支部 No.998-1 406
- [3] 美多 勉: H_∞ 制御: 昭晃堂 1994

Fig.4 Acceleration of Floor $\ddot{z}_f$

Fig.5 Acceleration of Table $\ddot{z}$

Fig.6 Time Response