

ハイブリッドアクチュエータを用いたアクティブ微振動制御に関する研究

中 村 佳 也 中 山 昌 尚
蔵 正 幸 ^{*1} 笹 井 克 彦 ^{*2}

概 要

走査型電子顕微鏡や半導体露光装置(ステッパ)などの微細加工・検査装置は、装置の性能を保証するための振動許容条件が提示されている。提示される振動許容条件が厳しいことや、振動環境の最適な場所が必ずしも設置予定場所ではないこと等から、各種微振動対策が行われる。その中でも、微振動環境を保証する対策として一番効果的なものは、アクティブ除振台の適用と考えられる。アクティブ除振台の制御性能の特徴は、使用しているアクチュエータによって異なる。一般に、エアークチュエータ、圧電アクチュエータや超磁歪アクチュエータを用いたものが実用化されており、筆者らも超磁歪アクチュエータを用いたアクティブ除振台の開発・実用化を行ってきた。

そこで、従来のアクティブ除振台に比べ、広い制御周波数範囲で高い制御性能を実現させることを目的として、ハイブリッドアクチュエータを用いたアクティブ微振動制御に関する研究を行った。本報告では、実大サイズの装置を製作し、装置およびハイブリッドアクチュエータの概要について示した。また、従来用いていたモデルマッチングによる制御系設計法を改良し、目標とする制御性能を実現する制御系を容易に求めることができる設計方法について検討した。最後に、各種制御実験を行い、ハイブリッドアクチュエータによる制御の有効性を検討した。

Study on Active Micro-vibration Control System using Hybrid Actuators

Abstract

In recent years, there has been an increasing demand for micro-vibration free space from industrial and scientific organizations. In response to this demand, several active micro-vibration control systems utilizing various types of actuators have been developed and applied in various environments and to a number of machines. The authors have developed an active micro-vibration control system with six-degrees of freedom using giant magnetostrictive (GMS) actuators and actually have applied it to FIB (Ion Focused Beam).

In general, a GMS actuator has a quicker response time and bigger displacement characteristics at higher frequencies than an air actuator. Therefore we have developed a Hybrid actuator that consists of a GMS actuator and an air actuator.

We have developed an active 6-DOF micro-vibration control system using hybrid actuators. This paper presents an outline of the active 6-DOF micro-vibration control system, the hybrid actuator used, and the design strategy of control system. Results of control experiments under various disturbances are described. Through these results, it is verified that an active 6-DOF micro-vibration control system using hybrid actuators control vibration more effectively than use of air actuators alone. This good performance is realized by efficiency of hybrid actuator, which is attributed to the collaboration of the air actuator and GMS actuators.

キーワード: 微振動, アクティブ制御, ハイブリッドアクチュエータ, エアークチュエータ, 除振, 制振, 制御実験

*1 建築本部エンジニアリング営業部

*2 設計センター 構造設計部

§1. はじめに

走査型電子顕微鏡、3次元測定機や半導体露光装置（ステッパ）などの微細加工・検査装置は、設置に当たって、装置の性能を保証するための振動許容条件が提示されている。設置予定場所の振動が許容条件を満足しない場合の解決策として、除振台の適用がある。除振台にはパッシブ型とアクティブ型があり、部分的な対策が可能で、かつ効果が明瞭であるという利点がある。アクティブ型除振台は使用しているアクチュエータによって特徴が異なる。実用化されている除振台では、エアークチュエータ、ピエゾアクチュエータ、超磁歪アクチュエータ、ボイスコイルモータなどが用いられている。筆者らも既に超磁歪アクチュエータを用いたアクティブ除振台の開発および適用を行い、その有効性を検証してきた^{1),2)}。

しかし、これまでのアクティブ除振台は制御対象を 30～40Hz 以下の低い周波数範囲に限定しているものがほとんどで、高い周波数範囲の制御性能の実現を行ったものはない。一方、先に示した微細加工・検査装置は、今後さらに微細化、高度化、処理の高速化、大型化が進み、振動許容条件は一段と厳しくなる傾向にある。また、設置環境においても、精密機器に影響を及ぼす振動外乱が増大・多様化する傾向にある。このように、微振動制御に対する要求は今後さらに高まることが予想される。

したがって、広い周波数範囲をアクティブに振動制御を行い、かつ高い制御性能を実現する新しいアクティブ除振台が必要である。そこで、広い周波数範囲での制御を可能にするため、超磁歪アクチュエータとエアークチュエータを組み合わせたハイブリッドアクチュエータを開発した。文献 3)で、ハイブリッドアクチュエータ試作機を製作し、制御シミュレーションにより有効性を検証した。

本報告では、ハイブリッドアクチュエータを用いた実大サイズのアクティブ微振動制御装置を製作し、制御実験を行った。また、高周波数範囲での制御性能の目標を容易に実現する制御系設計方法についても示した。

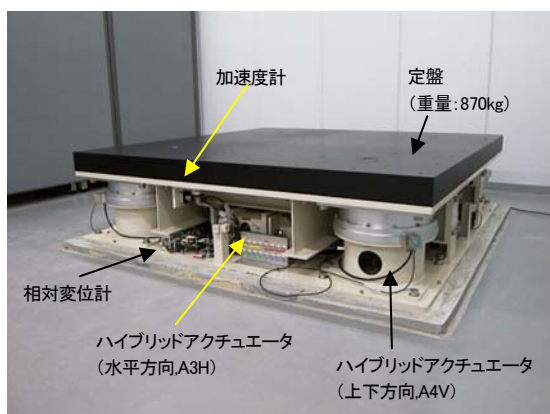


写真1 アクティブ微振動制御装置

§2. ハイブリッドアクチュエータを用いたアクティブ微振動制御装置

2.1 装置概要

製作した6自由度アクティブ微振動制御装置を写真1、図1に示す。装置は、定盤およびそれを支持・制御するハイブリッドアクチュエータと、定盤の応答を計測するセンサとから構成される。平面形状は 1.5m 角の正方形をしていて、高さは全体で 0.39m である。この装置上に重量 2ton の精密機器が設置できる。定盤の厚さは 0.1m で、定盤自体の固有振動数が 150Hz 以上となるように設計した。定盤の構造は軽量で高剛性を実現するように鋳鉄製格子定盤とした（格子間隔 0.3m, 格子リブ板厚 0.03m）。また、面外剛性を大きくするため、定盤下部に H 型鋼を井形に組んで一体化した。

ハイブリッドアクチュエータは8台設置し、上下方向アクチュエータを定盤4隅に配置し、水平方向アクチュエータを定盤の辺にあたる位置4箇所配置した（図1参照）。定盤加速度を計測する加速度センサを定盤下部に上下・水平方向各4ヶ所取り付け、さらに、定盤と床との相対変位を計測する相対変位計を上下・水平方向各4ヶ所設置した。

ハイブリッドアクチュエータによって定盤を浮上させ位置制御を行った状態で振動計測を行い、装置の固有振動数および減衰定数を同定した。装置固有振動数は水平並進方向が 5.2Hz(X), 5.5Hz(Y) で、上下方向が 11.0Hz(Z) であり、減衰定数は 0.05 であった。

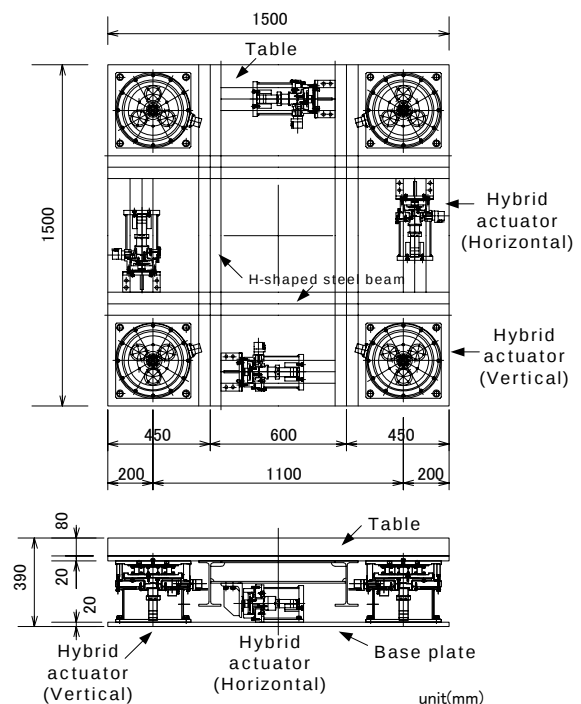


図1 平面図・断面図

2.2 ハイブリッドアクチュエータ

超磁歪アクチュエータとエアークチュエータを組み合わせたアクチュエータを、『ハイブリッドアクチュエータ』と呼ぶ³⁾。高周波数での駆動が得意で微細変位が発揮できる超磁歪アクチュエータと、低周波数での駆動が得意で大変位・大出力が発揮できるエアークチュエータを組み合わせ、両者の利点が発揮される新しいアクチュエータを目指して開発した。ハイブリッドアクチュエータの特徴を図2に、外観および概略構造を図3に示す。特徴は、図3(b)に示すように、ドーナツ形状をしたエアークチュエータの中央部に超磁歪アクチュエータを配置し、両アクチュエータの配置が並列になっている点にある。並列構造であるため、変位は両者共通、力は両者の和となる。エアークチュエータと超磁歪アクチュエータの発生変位量は大きな差がある(エアークチュエータは最大数mm、超磁歪は最大数十 μm)ので、発生変位の差を吸収するため、超磁歪アクチュエータには弾性体を直列に取り付けた構造とした。また、超磁歪アクチュエータの発生する力は弾性体の変形に比例した復元力で発揮する。

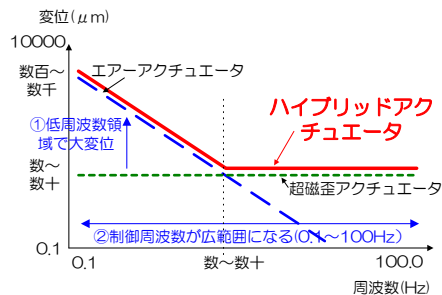
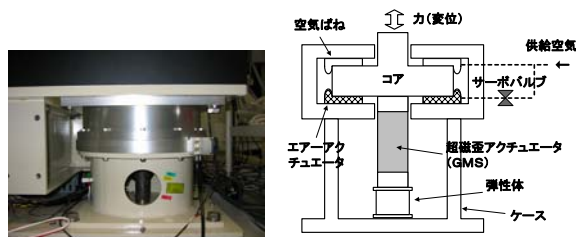


図2 ハイブリッドアクチュエータの特徴



(a)外観

(b)構造概念図

図3 ハイブリッドアクチュエータ(上下方向)

2.3 制御システム

図4に本アクティブ制御装置の制御ブロック図を示す。ハイブリッドアクチュエータで振動制御と位置制御の2つの異なる制御系を構成している。振動制御は定盤加速度をフィードバックし、位置制御は定盤と床との相対変位のフィードバックするシステムである。超磁歪アクチュエータは超磁歪素子周辺に巻かれているコイルに流れる電流を制御信号で変化させ内部の超磁歪素子に作用する磁界

を変化させ超磁歪アクチュエータを伸縮させる。エアークチュエータは、サーボバルブの開度を制御信号で変化させ、空気ばね内部の圧力を制御力を発生する。なお、エアークチュエータは定盤の位置制御も行うため、振動制御分に加えて位置制御分を追加した制御信号をサーボバルブに与える。

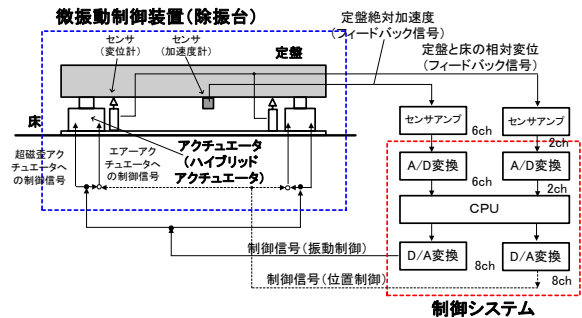


図4 制御システム図

§3. 制御系設計

3.1 設計方針(振動制御)

定盤の加速度のみフィードバックする制御を行う。定盤は剛体とみなし、自由度は並進3方向、回転3方向、計6自由度とする。物理座標系で表される運動方程式をモード座標変換により、非連成化したモード座標での運動方程式を得る。各モード独立に、非連成化された運動方程式を制御対象として制御系を設計する(1次~6次)。

3.2 制御系設計方法

制御対象に制御器を加えた全体システム(閉ループ)の入力と出力の関係を示したのが、図5である。微振動制御問題の目標は、制御器によって制御対象の外乱に対する出力(応答量)の低減を実現することにある。

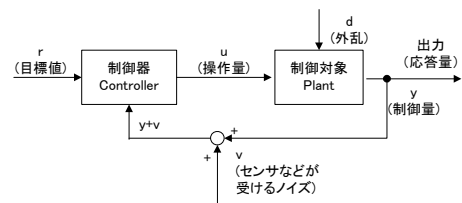


図5 制御系モデルのブロック図

図5のブロック線図を入出力関係で示すと次式となる。

$$\begin{aligned} y &= P_{dy} \cdot d + P_{uy} \cdot u \\ u &= C_{ru} \cdot r + C_{yu} \cdot (y + v) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 y :出力(制御量)、 d :外乱、 u :操作量、 r :目標値、 v :ノイズ、 $P_{dy}, P_{uy}, C_{ru}, C_{yu}$:制御対象及び制御器の伝達関数(添字:前=入力、後=出力)。

式(1)で, u を消去し, y でまとめると次式となる。

$$y = W_{dy} \cdot d + W_{ry} \cdot r + W_{vy} \cdot v \quad (2)$$

ここで, W_{dy}, W_{ry}, W_{vy} は閉ループ伝達関数である。

$$W_{dy} = \{1/(1 - P_{uy} \cdot C_{yu})\} \cdot P_{dy} \quad (3a)$$

$$W_{ry} = \{1/(1 - P_{uy} \cdot C_{yu})\} \cdot P_{uy} \cdot C_{ru} \quad (3b)$$

$$W_{vy} = \{1/(1 - P_{uy} \cdot C_{yu})\} \cdot P_{uy} \cdot C_{yu} \quad (3c)$$

制御器により, 3つの閉ループ伝達関数が変化すること(調整できる)ことがわかる。制御器の設計は, 目標とする閉ループ伝達関数をもとに行う。ここで注意すべき点は, 得られた制御器を実際の制御システムに適用し制御を実現するためには, 設計された制御器がプロパーである必要がある(プロパー: 分数多項式表現した伝達関数で, 分子の次数が分母の次数以下であること)。目標に設定した閉ループ特性(注: W_{dy} ではない)を実現するプロパーな制御器を求める方法がモデルマッチングによる設計法¹⁾である。この設計法は, 目標とした性能の制御器を比較的容易に設計できる反面, 入力パラメータが閉ループ伝達特性の極(全て)と制御器の極(一部)であり, 制御性能とは一致していないため, 目標とする制御性能を発揮する制御器を得るため, 試行錯誤が必要となる欠点がある。

本報では, 従来のモデルマッチングによる設計方法を改善し, 制御性能を表す感度関数(S)を入力パラメータにして, プロパーな制御器を設計する方法を提案した。

まず, 目標の感度関数を式(4)のように設定する。

$$S^* = \frac{\gamma_n s^n + \gamma_{n-1} s^{n-1} + \cdots + \gamma_1 s + \gamma_0}{k_n s^n + k_{n-1} s^{n-1} + \cdots + k_1 s + k_0} \quad (4)$$

次に, 図5の閉ループ(全体システム)において, 感度関数(S)は制御対象および制御器の特性から次式で与えられる。

$$S = W_{dy} / P_{dy} = \{1/(1 - P_{uy} \cdot C_{yu})\} \quad (5)$$

ここで, 制御対象の特性および制御器の特性を次式のように多項式を用いた伝達関数で表現する。

$$P_{uy} = \frac{\tau_m s^m + \tau_{m-1} s^{m-1} + \cdots + \tau_1 s + \tau_0}{q_m s^m + q_{m-1} s^{m-1} + \cdots + q_1 s + q_0} \quad (6)$$

$$C_{yu} = \frac{\beta_n s^{n-m} + \beta_{n-m-1} s^{n-m-1} + \cdots + \beta_1 s + \beta_0}{\alpha_n s^{n-m} + \alpha_{n-m-1} s^{n-m-1} + \cdots + \alpha_1 s + \alpha_0} \quad (7)$$

制御対象の特性は, 実験あるいは解析モデルから同定・作成する。式(6)中のパラメータはすべて既知である。制御器はプロパーな伝達関数を仮定する。次数は, 感度関数と制御対象特性の次数から与えられる。式(7)中のパラメータはすべて未知である。

式(5)～(7)から, 感度関数は次式で表される。

$$S = \frac{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \cdots + b_1 s + b_0} \quad (8)$$

式(4), (8)の分子及び分母多項式の係数をすべて比較すると, 未知パラメータ(α, β)の連立方程式が得られる。この連立方程式を解くことで, プロパーな制御器の特性を決定できる。なお, 未知パラメータの個数よりも連立方程式の数が $2m$ 個多くなる。つまり, プロパーな制御器は必ず設計できるが, 感度関数に誤差が生じてしまう。ここでは, 制御対象とする周波数範囲での感度関数の誤差を見ながら, 実現可能な最適な制御器を決定した。

一方, 式(4)の目標感度関数の設定については,

$$\gamma_n = k_n, \gamma_0 = k_0 \quad (9)$$

である必要がある。本報では, 式(9)を満足するように, 次式で示すノッチフィルタと棚状伝達関数でつくられる伝達関数を目標感度関数とすることにした。

$$S^* = \left[\prod_i \frac{s^2 + 2h_i(2\pi f_i)s + (2\pi f_i)^2}{s^2 + 2h_i'(2\pi f_i)s + (2\pi f_i')^2} \right] \times \left[\left(\frac{s + 2\pi f_H}{s + 1/\varepsilon \cdot 2\pi f_H} \right) \cdot \left(\frac{s + 2\pi f_L}{s + \varepsilon \cdot 2\pi f_L} \right) \right] \quad (10)$$

ここで,

f_i : ノッチフィルタの周波数 (= 制御周波数) (Hz)

h_i, h_i' : ノッチフィルタのノッチの高さ及び幅の設定

f_H, f_L : 棚状伝達関数の周波数範囲(Hz)

ε : 棚状伝達関数の高さを設定するパラメータ

式(10)で感度関数を与えることで目標性能が明確となり, かつ生じる誤差も出来るだけ小さくすることができる。

図6に, 一例としてハイブリッドアクチュエータ制御での1次モードの制御対象に対する制御系設計結果を示す。(a),(b)が制御対象の特性, (c)が感度関数(点線: 目標, 実線: 設計結果), (e),(f)が制御器, (d)が床振動に対する加速度伝達特性(点線: 非制御, 実線: 制御)である。なお, 制御性能の目標は, エアー制御およびハイブリッド制御ともに, 共振点付近の振動数成分のゲインを $-10 \sim -20$ dB とすることとし, ハイブリッド制御はさらに, 周波数 100Hz までゲインが 0dB 以下になるようにした。

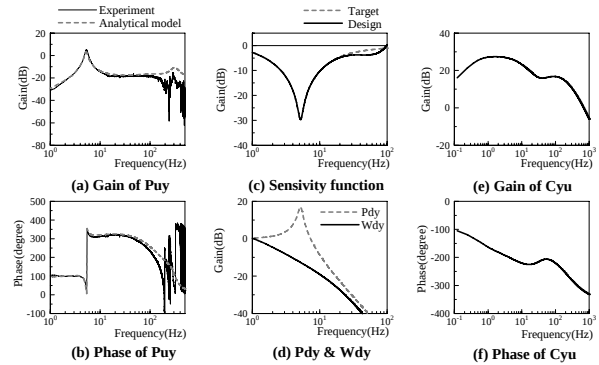


図6 制御系設計結果
(ハイブリッドアクチュエータ制御, 1次モード[X 方向])

§4. 制御実験結果

ハイブリッドアクチュエータを用いたアクティブ微振動制御装置の制御性能を調べるため、各種制御実験を実施した。制御の状態は、エアークチュエータのみ制御（以下、『エアーク制御』）、ハイブリッドアクチュエータで制御（以下、『ハイブリッド制御』）の2種類とし、比較を行った。

4.1 実験1（床振動に対する除振性能検証）

床から伝わる振動に対する除振（振動絶縁）性能を検証するため、微動状態での床および定盤の加速度を計測した。図7は、床加速度に対する定盤加速度の伝達特性で、非制御、エアーク制御、ハイブリッド制御の3つの状態での結果を比較したものである。X,Y,Z3方向とも固有振動数成分を含む20Hz以下の周波数領域では、エアーク制御、ハイブリッド制御ともにゲインが-10dB以下になっていて十分な制御（除振）性能が得られていることがわかる。一方、20Hzから100Hz以下の周波数領域については、エアーク制御では非制御よりもゲインが大きくなっている周波数範囲が見られる。逆に、ハイブリッド制御では非制御よりもゲインを小さく抑えている周波数範囲があり、大きくなっているところはない。この結果、ハイブリッド制御では

低い周波数領域での高い除振性能を有し、かつ高い周波数範囲の振動まで制御できることを確認できた。

4.2 実験2（定常加振に対する制振性能検証）

定盤に直接作用する定常外乱に対する制振性能を検証するため、定盤上に電磁加振器を置き、定盤を強制加振させる制御実験を行った。電磁加振器に変位振幅一定のログサインスイープ波の信号を与え、マスを加振した。加振時間は60秒、周波数は0.9から100Hzに変化させた。図8に、X方向に加振したときの加振器のマス加速度に対する定盤加速度の伝達特性を示す。図(a)は実験結果、(b)は制御系設計時の予測結果である。

本実験では、加振器によりある程度大きな加振力を微振動制御装置（定盤）に作用させることが出来たので、周波数100Hzまで明瞭な伝達特性が求められた。非制御状態では、固有振動数でピークをもつ伝達特性を示した。エアーク制御では、固有振動数を含む低周波数領域の応答低減効果は高いが、15~20Hzで逆に非制御よりも応答が大きくなり、100Hzまで非制御よりも応答が大きくなっている。これは設計結果の予測ともほぼ同じであり、設計通りの制御は実現できている。一方、ハイブリッド制御では、固有振動数を含む低周波数領域の応答低減効果は

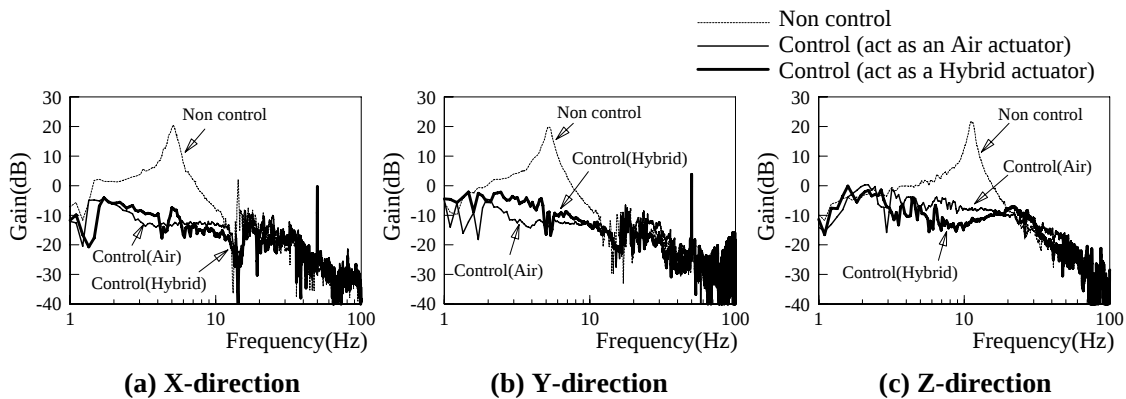


図7 床加速度に対する定盤加速度伝達特性

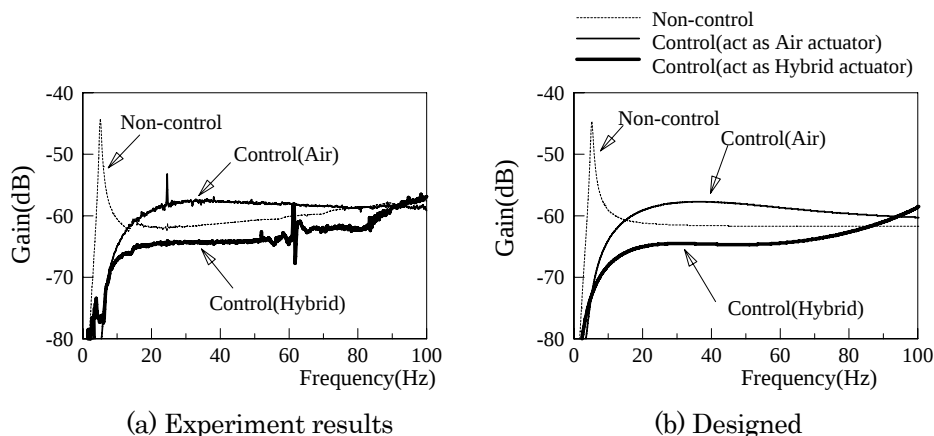


図8 電磁加振器加速度に対する定盤加速度伝達特性(X方向)

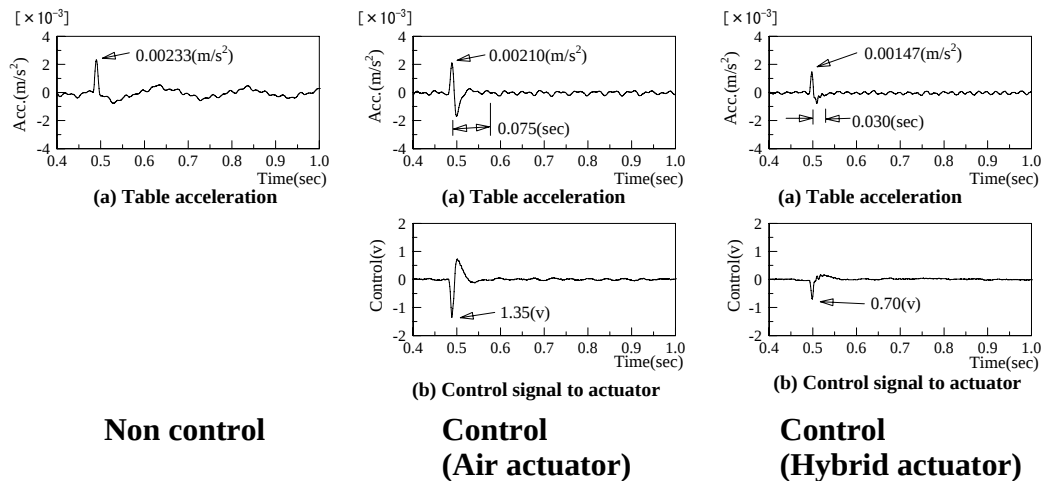


図9 衝撃加振作用時の定盤加速度およびアクチュエータ制御信号(X 方向)

エアー制御と同等の性能を発揮しつつ、100Hz 以下の周波数範囲まで応答が非制御よりも小さく抑えられていて、広い周波数範囲で振動制御が行えていることがわかる。

4.3 実験3(衝撃に対する制振性能検証)

定盤に直接作用する衝撃に対する制振性能を検証するため、定盤にゴムボールを衝突させる制御実験を行った。図9に、X方向に衝撃を与えたときの定盤加速度およびアクチュエータへの制御信号の時刻歴波形を示す。図(1)に非制御状態、(2)にエアー制御状態、(3)にハイブリッド制御状態の結果をそれぞれ示す。これらの図を見ると、ハイブリッド制御の結果は、エアー制御に比べ定盤応答加速度の最大値が約 0.7 倍に、零に収束するまでの時間が 0.075 秒から 0.030 秒へ約 1/2 にそれぞれ小さくなっている。また、制御信号もエアー制御 1.35V からハイブリッド制御 0.70V と小さく抑えられている。衝撃に対する制御ではアクチュエータの応答性が重要である。ハイブリッドアクチュエータによる制御は、制御信号に対して比例した力を時間遅れなく発生できる超磁歪アクチュエータとエアーアクチュエータを組み合わせたことにより、衝撃作用時に生じる加速度最大値を小さく抑え、かつ作用後に生じる自由振動の収束時間を短くすることができたものと考えられる。

§5. まとめ

ハイブリッドアクチュエータを用いたアクティブ微振動制御に関して、得られた知見を以下に示す。

- (1)超磁歪アクチュエータとエアーアクチュエータを一体化したハイブリッドアクチュエータを用いた実大サイズのアクティブ微振動制御装置を設計・製作した。
- (2)複雑な制御性能を実現する制御系を容易に設計でき

る設計方法を提案した。

- (3)各種制御実験により、ハイブリッドアクチュエータでの制御は、単体アクチュエータ(エアー)での制御に比べ、制御性能の欠点が無く、制御性能を向上させることができた。また、周波数 1~100Hz と広い周波数範囲での制御を実現することができた。

謝 辞 本研究は東京大学生産技術研究所藤田隆史教授の指導のもと、特許機器㈱と共同開発したものである。貴重なご意見、ご協力を頂いた皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中村佳也・中山昌尚・増田圭司・蔵正幸・組田良則・古舘佳子:超磁歪アクチュエータを用いたアクティブ微振動制御装置の開発, フジタ技術研究所報告集, 第 34 号, pp.103-108, 1988.
- 2) Yoshiya NAKAMURA, Masanao NAKAYAMA, Masayuki KURA, Masashi YASUDA and Takafumi FUJITA: Application of active micro-vibration control system using a giant magnetostrictive actuator, Journal of INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS and STRUCTURES. (投稿中)
- 3) 中村佳也・中山昌尚・増田圭司・安田正志・蔵正幸・藤田隆史:微振動制御用ハイブリッドアクチュエータの開発, 日本建築学会大会講演梗概集(東北), B-2, pp.843-844, 2000.

ひとこと

微振動制御に対する要求は、今後さらに高まることが予想される。アクティブ微振動制御装置『F・LAPUTA(フラピタ)』に、高い要求に対応できる高性能型を加えることができた。



中村 佳也