

研究速報：免震精密生産施設のための圧電アクチュエータを用いた総合的アクティブ微振動制御システム：第1報、スマート構造による内生微振動の制御

その他のタイトル	Comprehensive Active Microvibration Control System Using Piezoelectric Actuators for Base-Isolated Precision Manufacturing Facilities : 1st Report, Control of Microvibration Generated in Building with Smart Structure
著者	嶋崎 守, 藤田 隆史, 橋本 嘉之, 吉岡 宏和, 北原 隆, 小川 智浩
雑誌名	生産研究
巻	56
号	6
ページ	514-517
発行年	2004
URL	http://hdl.handle.net/2261/00078710

doi: info:doi/10.11188/seisankenkyu.56.514

免震精密生産施設のための圧電アクチュエータを用いた 総合的アクティブ微振動制御システム

——第1報, スマート構造による内生微振動の制御——

Comprehensive Active Microvibration Control System Using Piezoelectric Actuators for
Base-Isolated Precision Manufacturing Facilities

—— 1st Report, Control of Microvibration Generated in Building with Smart Structure ——

嶋崎 守*・藤田 隆史*・橋本 嘉之**・
吉岡 宏和**・北原 隆***・小川 智浩****

Mamoru SHIMAZAKI, Takafumi FUJITA, Yoshiyuki HASHIMOTO,
Hirokazu YOSHIOKA, Takashi KITAHARA and Tomohiro OGAWA

1. ま え が き

半導体製造の分野では、高集積化・高性能化によって、生産施設の微振動が問題となっており、現在、除振テーブルを用いた局所的なアクティブ微振動制御が実用化されている¹⁾。しかし、局所的なアクティブ微振動制御では、今後のさらなる半導体の高集積化・高性能化には対処しきれなくなるため、藤田らは、生産施設の床や建物全体の微振動をアクティブ制御して微振動低減の要求に答える研究を行ってきた²⁾。また、日本のような地震国における精密生産施設は、建物内部の設備機器をも効果的に地震から守るために、免震構造の採用が望ましい。

そこで本研究では、免震精密生産施設を対象に、建物を構造部材にアクチュエータを組込んだスマート構造とし、さらに免震層にもアクチュエータを装備して、設備機器等からの内生微振動に対するアクティブ制御と地盤の常時微動や強風による外来微振動に対するアクティブ制御を同時に行なう総合的アクティブ微振動制御システムを開発する。

本報では、総質量6.9tの免震半導体工場建物モデルを設計・製作し、建物の柱・はりにピエゾアクチュエータを組込んで内生微振動に対するアクティブ制御について検討した結果を報告している。

2. 建物モデル

2.1 建物モデル概要

本研究で設計・製作された免震半導体工場を模した建物モデルを図1に示す。このモデルは、長手方向5.0m、短手方向3.0m、高さ4.0m、総質量6.9tの2層鉄骨造で、4

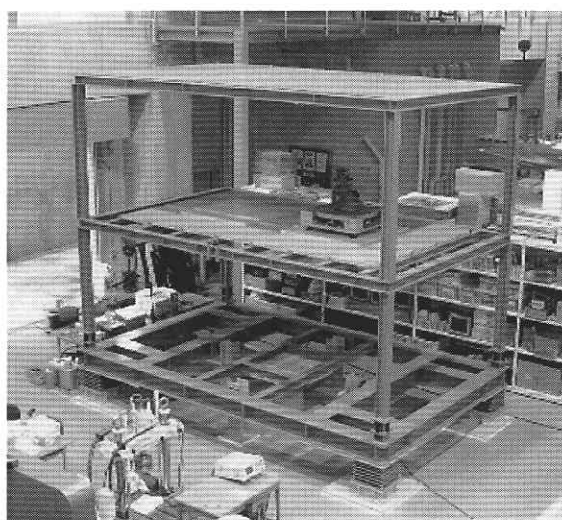


図1 建物モデル

基の多段積層ゴムにより免震支持されている。免震周期は約0.7Hzで、免震層中央にはエネルギー吸収のための粘性せん断型ダンパが装備されている。

2.2 ピエゾアクチュエータを組込んだスマート構造

図2, 3に示すように、建物モデルは、1階の各柱脚部と2階の長手方向のはり中央部にピエゾアクチュエータが合計20個組込まれたスマート構造を有している。これによって柱およびはりの曲げモーメントを制御³⁾することで内生微振動に対するアクティブ制御を行なうことができる。なお、このピエゾアクチュエータの外形寸法は25×25×36^Hmmで、最大変位は29.7 μ m、また、最大発生力は21.2kNである⁴⁾。

2.3 モデリング

図4は有限要素法を用いて求められた建物モデルの振動モードのうち、制御対象とした合計6つのモードを示した

*東京大学生産技術研究所 機械・生体系部門

** (株)竹中工務店 技術研究所

*** 日立プラント建設 (株) 松戸研究所

**** 住友重機械工業 (株) 技術開発センター

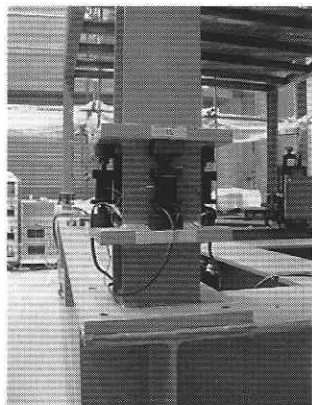


図2 柱に組込まれたピエゾアクチュエータ



図3 はりに組込まれたピエゾアクチュエータ

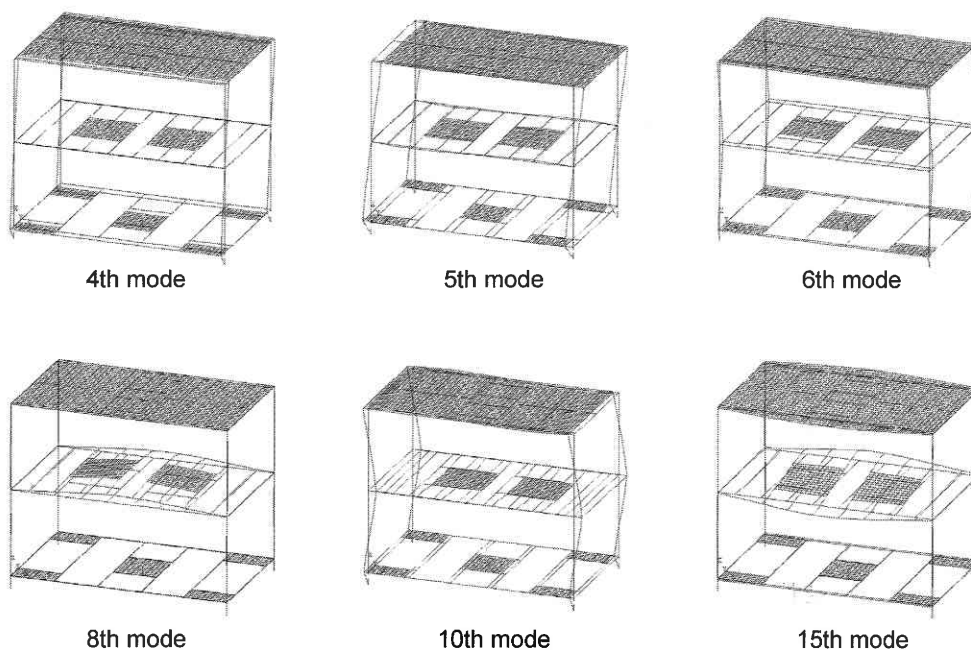


図4 制御対象のモード形状

ものである。各モードは、短手方向への柱の変形の4次モードと6次モード、長手方向への柱の変形の5次モードと10次モード、2階フロアが鉛直方向に振動する8次モードと15次モードである。なお、建物モデルの長手方向を x 方向、短手方向を y 方向、鉛直方向を z 方向とした。建物モデルを自由度6 (x, y, z 方向の各並進変位と各軸まわりの回転角変位) の節点からなる有限要素モデルで表現したときの運動方程式は以下のようになる。

$$[M]\{\ddot{X}\} + [K]\{X\} = [H_F]\{F\} + [H_U]\{U\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $[M]$ は質量行列、 $[K]$ は剛性行列、 $\{X\}$ は各節点の並進変位と回転角変位のベクトル、 $[H_F]$ は内生微振動外乱が作用する節点を示す行列、 $\{F\}$ は内生微振動外乱のベクトル、 $[H_U]$ はピエゾアクチュエータが発生する曲げモー

メントが作用する節点を示す行列である。また、 $\{U\}$ はピエゾアクチュエータが発生する曲げモーメントのベクトルで、以下のように表せる。

$$\{U\} = [a]\{u\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $[a]$ は操作電圧から曲げモーメントへの変換定数行列、 $\{u\}$ は操作電圧のベクトルである。式 (1) にモードベクトル $\{q\}$ ($\{X\} = [\phi]\{q\}$) を導入し、さらに減衰を考慮することで、制御対象は最終的に式 (3) で示す各振動モードに非連成化された l 個の独立な伝達関数により表現される。

$$\{y_m\}_{(i)} = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2} \{f_m\}_{(i)} + \frac{s^2}{s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2} \{u_m\}_{(i)} \quad i = 1 \sim l \dots\dots\dots (3)$$

表 1 同定された固有周波数と減衰比

Mode	Natural frequency [Hz]		Damping ratio [%]
	Experiment	Calculation	Calculation
4th	3.82	3.67	5.0
5th	5.42	5.29	3.0
6th	6.02	6.01	2.0
8th	7.47	7.07	0.1
10th	10.9	11.1	2.5
15th	18.3	18.4	0.3

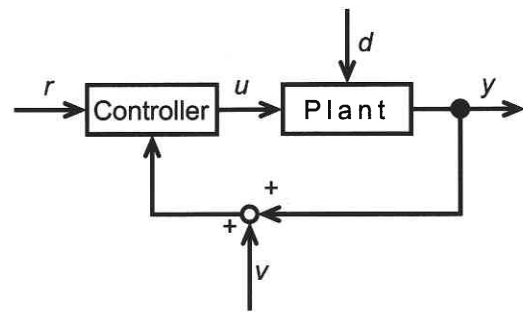


図 5 制御システム

ここで、 s はラプラス演算子、添字 (i) はベクトルの i 番目の成分を示し、これは i 次モード成分に対応する。また、 ω_i, ζ_i はそれぞれ i 次モードの固有円振動数、減衰比、 $\{f_m\}, \{u_m\}, \{y_m\}$ はそれぞれモード内生微振動外乱ベクトル、モード操作量ベクトル、モード絶対加速度ベクトルである。

2.4 モデル同定実験

実験は、内生微振動外乱を模擬するように建物モデル 1 階に加振器を設置して 0.1 ~ 50 Hz の狭帯域ランダム波で加振したときの、加振力から各階の応答加速度までの伝達特性と、各操作量から各フロアの加速度までの伝達特性を測定し、解析と比較することでモデル同定した。表 1 に同定された制御対象モードの固有振動数と減衰比を示す。

3. 制 御 則

制御器はモデルマッチング法を用いて、各モードごとに設計する。式 (3) について、図 5 に示すような制御システムを考える。ここで r, u, y, v, d はそれぞれ目標値、制御入力、制御量、観測ノイズ、内生微振動外乱を表わすものとする。このシステムにおいて $y = y_m, d = f_m, u = u_m$ とおくと、 y は次式で表わされる。

$$y = P_{dy}d + P_{uy}u \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 P_{dy} および P_{uy} はプラントへの内生微振動外乱および制御入力から制御量までの開ループ伝達関数である。また、 $u = C_{ru}r + C_{yu}(y + v)$ より

$$y = (1 - P_{dy}C_{yu})^{-1}(P_{uy}C_{ru}r + P_{uy}C_{yu}v + P_{dy}e) \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、 C_{ru}, C_{yu} はそれぞれ、制御器の目標値および制御量から制御入力までの開ループ伝達関数である。これらから次の三つの伝達関数 W_{ry}, W_{vy}, W_{dy} が得られる。

$$W_{ry} = (1 - P_{uy}C_{yu})^{-1}P_{uy}C_{ru} \dots\dots\dots (6)$$

$$W_{ry} = (1 - P_{uy}C_{yu})^{-1}P_{uy}C_{ru} \dots\dots\dots (7)$$

$$W_{dy} = (1 - P_{uy}C_{yu})^{-1}P_{dy} \dots\dots\dots (8)$$

これらはそれぞれ、目標値、ノイズ、外乱から制御量までの閉ループ伝達関数である。モデルマッチング法によりプロバな制御系が設計されるためには上記の伝達関数が以下の三つの条件を満たす必要がある。

- (1) W_{ry}, W_{vy} の相対次数は P_{uy} の相対次数以上である。
- (2) W_{ry}, W_{vy} の零点は P_{uy} の零点を全て含む。
- (3) $(1 + W_{vy})$ の零点は P_{uy} の全ての極を含む。

なお、モデルマッチング法に関する詳細は文献 (5) を参考にされたい。制御器は、可能な限り各モードに減衰を付加できるように、外乱 d から制御量 y までの伝達関数を指定することによって設計した。また、制御対象外モードによって起こるスピルオーバー不安定の回避のために、前置補償器⁶⁾を用いた。

4. 制 御 実 験

制御実験では、建物モデル 1 階の中央に設置した加振器により、0.1 ~ 50 Hz の狭帯域ランダム波で三次元に加振することで設備機器による内生微振動を模擬した。図 6 は加振器の加振力から各階の応答加速度までの伝達特性を示したもので、細線が非制御、太線が制御である。x 方向については、制御対象とした 5 次および 10 次モードのピークが各階で低減されている。これはモード減衰比を 5 次は 13% に、また 10 次は 10% に増加させているものである。y 方向についても同様に、制御対象とした 4 次および 6 次モードのピークが各階で低減されており、モード減衰比を 4 次は 12% に、また 6 次は 8% に増加させているものである。z 方向については、制御対象とした 8 次および 15 次モードのピークが 2 階で低減されている。これはモード減衰比を 8 次は 15% に、また 15 次は 10% に増加させているものである。また、これらの制御によって、対象としたモード以外の周波数においてゲインを増大させるようなことはなく、前置補償器の効果が表れている。

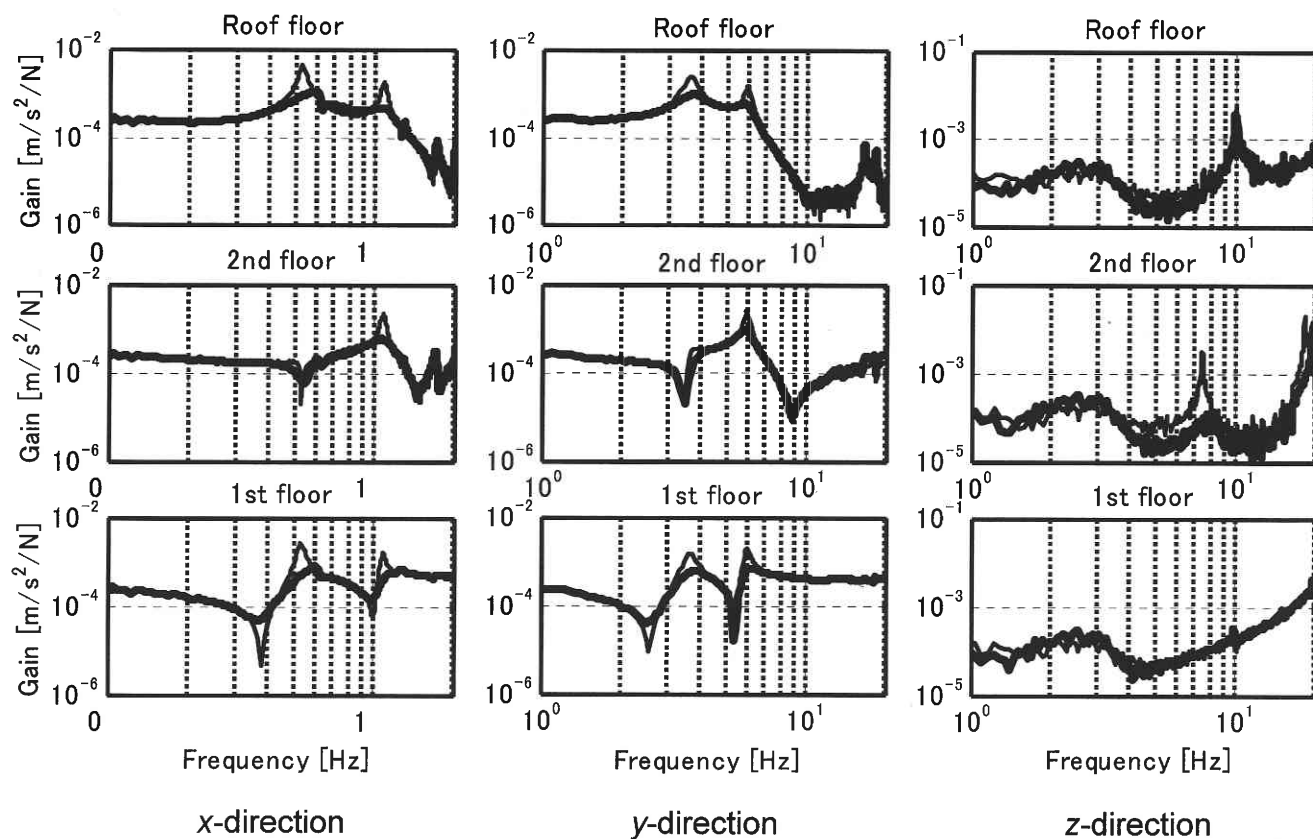


図6 制御性能

5. あとがき

総質量6.9tの免震半導体工場建物モデルを設計・製作し、柱・はりにピエゾアクチュエータを組込んだスマート構造によって内生微振動外乱に対するアクティブ制御を行った結果、良好な制御性能が得られることを実験によって確認した。また、前置補償器を用いることにより、スピルオーバー不安定を回避した。

今後は、さらに免震層に装備されたアクチュエータを用いて、内生微振動および外来微振動に対するアクティブ制御について検討する。

(2004年9月29日受理)

参考文献

- 1) 梶原・ほか3名, 日本機械学会論文集 (C編), 63巻615号, 3735~3742, 1997.
- 2) 藤田・ほか7名, 日本機械学会論文集 (C編), 66巻647号, 2122~2127, 2000.
- 3) 藤田・ほか5名, 日本機械学会論文集 (C編), 61巻584号, 1337~1342, 1995.
- 4) 嶋崎・藤田, 生産研究, 48巻9号, 449~452, 1996.
- 5) 田川・ほか3名, 日本機械学会論文集 (C編), 54巻507号, 2689~2696, 1988.
- 6) 梶原・藤田, 日本機械学会論文集 (C編), 63巻, 613号, 3003~3010, 1997.