絶対変位センサを用いたダイレクト床振動フィードフォワードの実装*

甲斐孝志^{*1}, 涌井伸二^{*2}Implementation of Direct Floor Vibration Feedforward
Using an Absolute Displacement SensorTakashi KAI^{*3} and Shinji WAKUI^{*3} The Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16 Nakacho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

Acceleration signal from an accelerometer has been conventionally used in the field of vibration control. However, its integration in order to detect the velocity signal will amplify the pink-noise of the sensor and cause a drift problem in low frequency, when the accelerometer is applied as a feedback or feedforward sensor. In this paper, an absolute displacement sensor, which can simultaneously detect the acceleration, velocity, and displacement signals from its stable control loops, is proposed, and the direct velocity and displacement feedforwards are implemented for an air type anti-vibration apparatus. Namely, the floor vibration is detected as the velocity and displacement signals, and those are directly fed forward to the voice coil motor fixed with the apparatus. At first, the effects of the velocity and displacement feedforwards are respectively shown. Next, both feedforwards are simultaneously implemented. As these results, the performance to suppress the vibration of the isolated table is improved by using the direct floor vibration feedforward.

Key Words: Vibration Control, Sensor, Seismic Motion, Pneumatic Equipment

1. 結 言

半導体露光装置を支持する空圧式除振装置 (以下, AVA と略記) には, 地動外乱を抑制するため, 床振動のフィードフォワード (以降, FF と略記) が施されることがある^{(1)~(3)}. 地動外乱は, AVA の粘性比例係数と機械剛性に, すなわち, 床振動の速度と変位成分に比例した外乱項である. 従来, これらの検出には, 小型・軽量の加速度センサからの加速度信号が多用されてきた. 具体的に, FF の実装の際には, 加速度信号に PI 補償を施して, さらに空圧系の積分特性を利用する. しかし, PI 補償の積分演算に起因して低周波のピンクノイズが増幅され, ドリフトの問題が生じる. そこで, 筆者らは, 文献(4)で提案し, 文献(5), (6)で FB センサとして AVA に適用した絶対変位センサを FF センサとしても適用したいと考えた. 本論文では, 提案のセンサと産業応用の AVA に常備されつつあるボイスコイルモータ (以下, VCM と略記) を用いて, 速度・変位信号の直接 FF を実現する.

2. 絶対変位センサ

2-1 制御構造 文献(4)で提案の絶対変位センサの構造を簡単に説明する. 同センサは, 市販のサーボ形速度センサの振動子に施す FB 構造を変更したものである. 図1に機械構造および制御構成を示す. 主に, 以下3点の特徴がある.

- [1] サイズ型振動センサであり, 観測対象に直接設置して加速度・速度・変位信号を同時に検出.
- [2] 検定コイルの逆起電力を検出して, フォーサコイル駆動のメインループに活用.
- [3] センサ自身の傾斜設置に起因するオフセット出力の自己校正が可能.

Fig. 1 Structure and control scheme of absolute displacement sensor

* 原稿受付 2010年7月26日.

^{*1} 正員, 東京農工大学大学院工学府 (〒184-8588 小金井市中町2-24-16).

^{*2} 正員, 東京農工大学大学院工学研究院.
E-mail: 50010834201@st.tuat.ac.jp

Fig.2 Frequency response of absolute displacement sensor

Fig.3 Control scheme of floor vibration feedforward

Fig.4 Floor vibration caused by air compressor

ただし、文献(4)では速度信号を検定コイルの出力より検出したが、検出感度が不足するため、ここでは図1太線部のように変位信号を微分演算する。

2・2 周波数特性 3章の実験で使用する絶対変位センサの周波数特性を図2に示す。同図を参照して、3信号の検出帯域は、ゲイン・位相の両特性がフラット(位相は180[deg])となる領域であり、約2~70[Hz]である。約100[Hz]の共振は、振動子の重力補償用コイルばねに起因する⁽⁴⁾。

3. 絶対変位センサを用いた床振動FF

3・1 制御構成 床振動FFの制御構成を図3に示す。AVAは主に、質量120[kg]の除振テーブル、浮上用アクチュエータの空気ばね、制振用アクチュエータのVCM(帯域:DC~300[Hz])、除振テーブル上部の加速度センサT(JA-40GA)、そして下部の位置センサで構成される。また、床振動の観測には、FF用の絶対変位センサに加えて、評価用の加速度センサF(JA-

40GA)を設置した。

3・2 床振動の発生 床振動FFの効果を確認するには、AVAの設置床の加振が必要である。条件として、高周波外乱は空気ばねの浮上により抑制されるため、AVAの固有振動数(3.2[Hz])周辺で加振する。ここでは、空気ばねへの圧縮空気を生成するコンプレッサが、稼動時に発生する振動を地動外乱と設定する。図4上段に加速度センサFで計測したコンプレッサ稼動時の床振動を、下段に加速度センサTで計測した除振テーブルの振動をそれぞれ示す。ともに、コンプレッサによる約20[Hz]の振動が確認できる。なお、図4では、AVAのフレームの機械振動と考えられる約100[Hz]の振動も観測されたが、固有振動数から離れていることと、絶対変位センサの検出帯域外であるため、これは検証の対象とはならない。

3・3 床振動FFの投入 除振テーブルへの床振動の伝播は、AVAの粘性比例係数と機械剛性に比例した外乱項の和である。これらは、それぞれ速度と変位信号のFF投入によって、主にAVAの固有振動数周辺で抑制できる。絶対変位センサとVCMを用いた床振動FFの効果を、図5上下段のそれぞれ加速度センサFとTで計測した床と除振テーブルの振動で示す。同図左側1番目がFFなしのとき、2番目が速度信号のみをFFしたとき、3番目が変位信号のみをFFしたとき、そして4番目が速度と変位信号を同時にFFしたときの評価用加速度センサで計測した加速度信号である。まず、図5上段を参照すると、床は各FF投入時で同様の加振状態である。次に、これを下段と比較すると、各FF時で除振テーブルの加速度の方が床の加速度よりも小さい。これは、除振テーブルが空気ばねにより浮上状態であり、除振テーブルの高周波外乱が除振されるためである。最後に、下段の除振テーブルの加速度をそれぞれのFF時で比較すると、FFなし<速度FF<変位FF=速度・変位の同時FFの順に、床振動FFの除振効果が大きく得られている。ここで、速度FFの効果が小さい理由は、速度信号を変位信号の擬似微分演算で求めたことで、高周波ノイズを増幅したためである。よって、速度FFの投入ゲインは、十分に調整できていない。

さらに、図5のような定常的な加振ではなく、床に打撃振動を与えたときの床振動FFの効果を図6に示す。同図上段を参照すると、各FF時の時刻0[s]において、同様の打撃振動が床に与えられている。FFの効果を確認するため、下段の除振テーブルの加速度をそれぞれのFF時で比較すると、FFなし<速度FF<変位FF<速度・変位の同時FFの順に、除振効果が

Fig. 5 Implemented results of floor vibration feedforward in steady state

Fig. 6 Implemented results of floor vibration feedforward with hitting the floor

大きい。

4. 結 論

線形性に優れる VCM をアクチュエータとして用いて、産業応用を目指す絶対変位センサを床振動の FF センサとして、AVA にはじめて適用した。このとき、定常および打撃振動の発生時における速度、変位、そして両信号の同時 FF をそれぞれ投入した。結果、除振テーブルの振動は、FF なしのときより抑制され、FF の効果を確認できた。

今後の課題は、絶対変位センサの検出感度と帯域の改善、速度の FF 投入ゲインの最適調整、そして同ゲインの投入順序の明確化である。

謝 辞

本研究は、平成 22 年度科学研究補助金 (基盤研究 (C) : 20560212) の研究助成を受けた。記して謝意を表します。

文 献

- (1) Nishimura, H., Yoshida, K., Shimogo, T., Optimal Active Dynamic Vibration Absorber for Multi-Degree-of-Freedom Systems, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (C)*, Vol. 55, No. 517 (1989), pp. 2321-2328.
- (2) Yasuda, M., Osaka, T., Ikeda, M., Study of Active Isolation system with Feedforward control, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (C)*, Vol. 58, No. 552 (1992), pp. 2381-2387.
- (3) Wakui, S., Application of Feedforward Control for an Air Spring Type Isolated Table, *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. D*, Vol. 116, No.11 (1996), pp. 1181-1182.
- (4) Wakui, S., Kojima, D., Negishi, Y., Realization of Displacement Sensor Using Calibration Coil, *Journal of the Japan Society of Precision Engineers*, Vol. 73, No.3 (2007), pp. 393-397.
- (5) Wakui, S., Kojima, D., Takahashi, M., Yamamoto, K., Application of Absolute Displacement Sensor to Anti-Vibration Apparatus, *Journal of the Japan Society of Precision Engineers*, Vol. 73, No. 10 (2007), pp. 1169-1170.
- (6) Kai, T., Wakui, S., Control of Air Type Anti-Vibration Apparatus with Two Degrees-of-Freedom Using Absolute Displacement Sensors (Vibration Control Using Voice Coil Motor), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (C)*, Vol. 76, No. 766 (2010), pp. 1489-1495.