超強力磁性材料を応用した振動変位の アクティブ制御システム

ベレデ 呉 進, 安田 悦郎

ヘルツ工業(株) 研究開発室

(〒236-0004 神奈川県横浜市金沢区福浦1-1-1 横浜金沢ハイテクセンタテクノコア)

The Active Attitude Control System by Using the Strongest Permanent Magnet

Jin WU-BEREDER and Eturo YASUDA

R & D Laboratory, HERZ INDUSTRY CO., LTD.

Yokohama Kanazawa High-Tech Center, 1-1-1 Fukuura Kanazawa-ku Yokohama, Kanagawa 236-0004

(Received May 20, 1999)

Using the world's strongest permanent magnet develops an active attitude control system. The system is designed for a wide variety of applications, which rely on pneumatic vibration isolation systems. Its applications range from precision laboratory environment to semiconductor manufacturing equipment, which demands the optimum noise performance and platform stability as well as to improve settling time and increase productivity.

Key Words: NEOMAX permanent magnet, Active attitude control system, Settling time, Control, Transmissibility

1. はじめに

近年、レーザーを用いた光学実験では、光路長の長い実験システムが数多く見受けられる。このため、使用される空気ばね式防振台(以下、防振台という。)も大型になってきている。空気ばね式防振台が大型になると防振台を構成する機器搭載ハニカムベンチの許容外の撓みの発生など、ベンチの剛性が問題となる。これに対する対処の仕方は一般的には、防振台の剛性を維持するために重くするが、重くすると床の荷重制限によって設置できないことがある。床の荷重制限内で防振台を分割して使用することもあるが、それぞれの防振台は変位が一定にならず光軸がずれる。レーザー光を直角または他の角度に光軸を曲げて実験を行う場合も、単一の防振台では対応できないこともある。また、実験室の広さも限界がある。光路長が長いために、複数の実験室の壁にレーザー光を通す穴をあけている実験を行っている研究所もある。レーザー光の発光部と受光部及び光学部品を設置した中間に小型の非防振または防振ゴムを使用した簡易防振の光学ベンチを使用することが多い。やむを得ず非防振のベンチを使用している研究者が多いが、レーザーを用いた光学実験を遂行する上で分割された防振台が求められている。

現状の空気ばね式防振台に装着されているメカニカルオートレベルセンサの不感帯は0.5mmから1mmに設定されており、機器搭載用ベンチの姿勢位置制御を高精度に行う

ことができない。複数の小さな空気ばね式防振台を使用する上で、それぞれの3次元空間における相対姿勢位置を許容精度範囲内に制御できれば空気ばね式防振台が持つ問題は解決する。本稿では、この問題を解決するために筆者らが開発したアクティブ姿勢制御システムについて述べる。

2. アクティブ姿勢制御システムの構成

従来の空気ばね式防振台にFig.1に示す姿勢制御システムを追加し、複数台のベンチの相対姿勢をアクティブに制御することを可能とするシステム開発を行った。

開発にあたって次の3点に留意した。①ベンチを支持する空気ばね周辺に変位センサ及びアクチュエータを取り

Fig.1 The structure of active attitude control system.

付け、ベンチの姿勢位置を常に制御開始時の初期位置と一致するようにシステムを制御する。②高精度な防振性能を損なわず、複数のベンチの相対姿勢位置を制御するためにはFig.2に示す防振域外の周波数域でベンチの姿勢位置を制御しなければならない¹⁾。③防振域内では相対姿勢位置制御は防振制御の相互干渉になり兼ねず、避けなければならない。このような場合は、ローパスフィルタを制御回路に組み込むことが一般的だが、期待する効果が不十分であり、高周波低応答性の電磁式アクチュエータ⁴⁾を開発する。

3. アクチュエータの原理及び構成

一般的に、空気ばね式防振台の機器搭載荷重は数キロから数トンまでである。特に大荷重の場合は大きな推力が必要となる。今回超強力磁性材料のNEOMAX磁石(Nd-Fe-B Magnet)を応用し電磁アクチュエータを製作してみることにした。NEOMAX磁石の特性はサマリウムコバルト磁石に比べ、最大エネルギー積 $(BH)_{\max}$ は量産レベルで約374 kJ/m³とはるかに性能が高い。しかも比重は約7.5g/cm³で、サマリウムコバルト磁石より10%以上軽く、電磁アクチュエータに求められた大出力、小型、軽量化が可能となった。

三次元空間において姿勢を制御する場合、使用するアクチュエータもできるだけ各軸方向において自由度を持っていなければならない。また、NEOMAX磁石は上述の非常に優れた性能を持っていると同時に残留磁束密度 (Br) 及び保磁力 (iHc) の温度係数が大きいので、使用温度に配慮しなければならない。これらを考慮してFig.3に示す磁石とコイルの非接触式の基本構造を持つ電磁式アクチュエータ³⁾を開発した。

電磁式アクチュエータは磁気と電流の間に働く力を利用したものである。静的な場合、電磁力 ΔF は下の式で求められる²⁾。

$$\Delta F = BI\Delta L \sin \theta [N] \quad (1.1)$$

ただし ΔL (m)は導体の長さ、 B (T)はその点の磁束密度、 I (A)は導体に流れている電流、 θ は電流と磁束のなす角である。

実際の応用において、導体は均一磁界中に置かれて、電流と磁束のなす角は90°である。導体に受ける全体の電磁

Fig.2 An example transmissibility of pneumatic vibration isolation systems.

Fig.3 Basic components of electromagnetic actuator.

力 F は

$$F = nBIL[N] \quad (1.2)$$

で計算することができる。ただし、 n は導体の本数である。

Fig.3の導体は実用上はFig.4のようにコイルの形状に作られている。コイルの巻き数 N 、抵抗は R 、自己インダクタンスは L とする。

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} \quad (1.3)$$

一般に、上記コイルの L/R の大小(Fig.5 (a))によって周波数応答特性(Fig.5 (b))が分かる。コイルの L/R 値を適切に設定することによって推力の周波数特性が求められる。

Fig.4 The coil of electromagnetic actuator.

Fig.5 (a) L/R characteristics of coil and (b) frequency response.

4. アクチュエータに関する実験

アクチュエータの磁石側の磁束密度を実際に測定してみた。Fig.6はアクチュエータ取付けの一例である。Fig.7は垂直用アクチュエータに用いた磁石の磁束密度分布状況の実測等高線図である。

Fig.7は、アクチュエータのN/S極の2枚の磁石の中間位置でプローブを固定し、被測定磁石の平面内でアクチュエータを動かしながら、磁束密度を測定したものである。Fig.8は電流の流れる方向に直交する実測磁束密度の分布値を積分し、上記の式(1.2)により推力を算出したものである。

5. 振動変位のアクティブ制御システム

制御の流れは、ギャップセンサからの値をA/D変換後CPUに送る→初期値と比較し、その偏差値を制御偏差量として処理→適切な指令を電磁アクチュエータのドライバーへ送る→アクチュエータ駆動、となる(Fig.1参照⁵⁾)。

実際のシステムにおいて、変位の制御は2段階に分けられ

Fig.6 Actual electromagnetic actuator.

Fig.7 Distribution of magnetic flux density.

Fig.8 The force of the electromagnetic actuator.

る。前半で述べたように、この振動変位制御システムは通常のメカニカルレベルセンサ/バルブ及びギャップセンサを同時に使用している。そのため、変位が発生した場合にメカニカルレベルセンサが振動変位を感知し、空気ばね内の圧力を調整することによって変位を復帰させる。同時にギャップセンサもこの振動変位をキャッチし、一連の処理を経て、アクチュエータにより振動変位をキャンセルする。しかしメカニカルレベルセンサ/バルブとギャップセンサ/アクチュエータの動きは同期しないため、変位キャンセルにおいて抵触現象が起きる。この問題を解決するために、変位制御を“粗”制御と“精密”制御の2段階に分けた。

振動変位が発生した場合、メカニカルレベルセンサの不感帯を超えた場合、まずメカニカルレベルセンサ/バルブによる空気圧の調整で変位を不感帯内まで復帰させる。次にギャップセンサ/アクチュエータのアクティブ制御システムにより変位をさらに2μm以内に復帰させる。

このように試作した振動変位のアクティブ制御システムで実測した結果をFig.9, Fig.10, Fig.11, Fig.12に示す。

Fig.9, Fig.10は、それぞればね上荷重400kgの時の掃引加振による周波数軸の変位応答値である。制御時と非制御時の変位の動的变化の差が著しい。垂直、水平方向の共振点付近における共振倍率が低下していることが確認できた。

Fig.11は200mmの高さから重さ250gの重りを自由落下させた時のアクティブ制御システムのインパルス応答を示す。アクティブ制御システムのインパルス減衰は明らかに早く、かつ変位の復帰精度も良いことが分かる。

Fig.12は、ばね上搭載重量440kgの時、防振台ベンチの端

Fig.9 Displacement responses of passive and active attitude control systems (vertical direction).

Fig.10 Displacement responses of passive and active attitude control systems (horizontal direction).

Fig.11 Impulse responses of passive and active attitude control systems.

Fig.12 Comparison of return accuracy of passive and active attitude control systems.

に6kgの重りを載せた後の復帰精度実験における実測値である。空気ばね式防振台の変位の復帰は $\pm 0.5 \sim 1$ mm範囲内にランダム性があるが、この実験における復帰精度は約120 μm となっているのに対して、振動変位アクティブ制御システムによる復帰精度は $\pm 2\mu\text{m}$ 以内になっており、さらに繰り返し実験によって再現性も確認されている。

Fig.13は、振動変位のアクティブ制御システムを示す。

6. 結 論

超強力磁性材NEOMAX磁石を応用した電磁式アクチュ

Fig.13 General view of the active attitude control system.

エータは振動変位アクティブ制御システムにおいて20Hz前後までの応答性が期待でき、極低周波域において共振倍率の高い空気式防振台のアクティブ制御用に適していることが明らかとなった。振動変位アクティブ制御システムの変位制御の保持精度を $\pm 2\mu\text{m}$ 内に抑えることが出来た。

謝 辞

本研究の基礎技術開発は、神奈川県からの助成金、本研究は横浜市ならびに(財)横浜産業振興公社からの知的所有権担保による開発資金融資により行われたものであり、関係機関の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 崔 衛民, 金光 陽一, 野波 健蔵, 渡辺 和英: 機械学会論文集 **60-575C** (1994) 2227.
- 2) 武藤 高義: アクチュエータの駆動と制御 (1995, コロナ社).
- 3) 岡田 養二, 長坂 長彦: サーボアクチュエータとその制御 (1996, コロナ社).
- 4) 日本工業技術振興協会固体アクチュエータ研究部会: 精密制御用アクチュエータ便覧, フジテクシステム (1994).
- 5) 堀 康郎, 荻原 修哉, 藤澤 二三夫, 中村 満: 機械学会論文集 **63-613C** (1997) 2996.

レーザーワード

アクティブ姿勢制御システム (active attitude control system)

空気ばね式防振システムは機器搭載用ベンチ、空気ばね、防振架台より構成される。また搭載機器の形状や重量分布及び振動によって、架台に対して空気ばねによって支持された機器搭載用ベンチは傾くが、この傾きはメカニカルレベルセンサーによってエアの給排気を行わせ、エアタンクの空気圧を調整することによって一定の水平位置を保つ構造になっている。しかしこのようなメカニカルレ

ベルセンサーによる水平調整の得られる精度は通常 ± 1 mm程度しか得られず、かつ高さ方向に限る。

Active Attitude Controlは従来の空気ばね式防振システムにおける機器搭載用ベンチを初期に設定した位置を目標位置として変位センサーとアクチュエータ及び制御部を用いて3次元空間において制御するシステムである。制御精度は $2\mu\text{m}$ である。
(ベレデ 呉 進)