圧電バイモルフビームで防振機能を強化

トーステン・バーテル

多機能要素を統合すると、複雑さが緩和された、よりコンパクトな、コスト効果が高い振動制御デザインが可能になる。たとえば、圧電バイモルフビームマウントは、アクチュエータとセンサの両方の要求を満たす。

今日のエレクトロニクスおよびオプトエレクトロニクス機器やシステムでは、軽構造、高スループット、さらに高い生産分析、加工精度が求められている。振動は、機能に影響し、精巧な機械やコンポーネントに損害を与えることさえあるので、研究、開発、製造段階ではその影響を慎重に検討しなければならない。振動解析や制御技術は、ナノメートルあるいはサブナノメートルスケールで動作しなければならない。例えば、半導体産業では、低振動製造、テスト環境が求められる。

従来のパッシブ振動アイソレーション法（単純なバネや減衰エレメント）は、こうした要求には適合しないので、アクティブ振動アイソレーションシステム（素早く振動を消去するための電気的フィードバック回路付）の普及が進んでいる。温度と湿度が十分にコントロールされ、強固な土台で安定していることに加えて、研究者やエンジニアは様々なアプリケーション領域で高感度装置が確実に適切な機能を発揮するように低振動環境を作る必要がある。

低周波圧電振動アイソレーション

十分な振動アイソレーションには、外乱源と絶縁される構造との間の機械的な経路の設計が、一定の周波数範囲で振動低減が生ずるようになっていなければならない。これは剛性要素k、減衰要素d、それに、必要なら、アクチュエータ要素Aを加えて振動アイソレーションシステムを作ることによって達成できる（**図1**）。

外乱と振動分離コンポーネント間のパッシブアイソレーションシステムの伝達率に関して、一般的な振幅応答が観察される。例えば、無減衰防振材料は、マススプリングシステムの応答を超える周波数域で10年に−40dBの振動アイソレーション増加に影響を及ぼす。しかしながら、欠点は共振周波数付近の振幅増幅である。また、この増幅は振動減衰エレメントの統合によって減らせるが、このダンパーもより高い周波数域ではアイソレーション効果が弱まる。

パッシブアイソレーションの範囲を超えたところでは、アクティブ振動アイソレーションが、減衰システムと非減衰システムの長所を統合する。共振を超えた周波数に残る広帯域アイソレーションにより、共振における振動増幅がダンピングエレメントの効果に匹敵する量まで減衰できる[1]。これを行うために利用できる制御策は数々ある。例えば微分変位フィードバックループ、あるいはモデルベースコントロールなどである。

ほとんどのアクティブ振動システムは、独立に構築されたアクチュエータとセンサを持つ純粋に機械的な構造に基づいている。しかし、構造、アクチュエータ、センサの特性を1つの多機能エレメント、圧電セラミックなどに統合すると、複雑さが緩和され、よりコンパクトな設計が可能になる[2]。

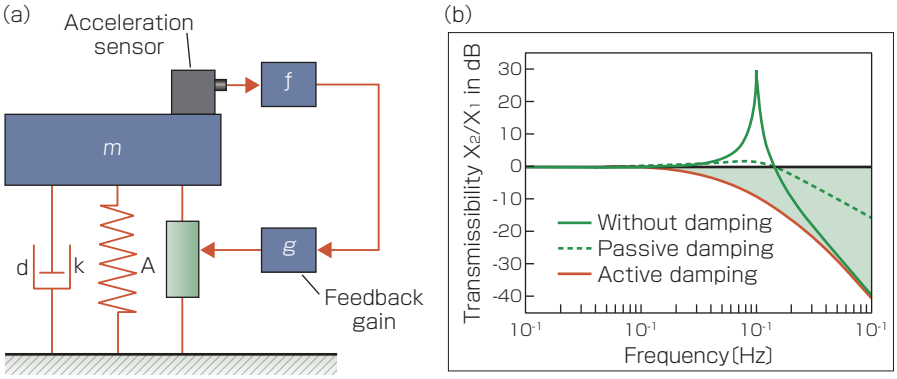


図1　質量mの高感度システム向けアクティブ振動アイソレーション設定は、パッシブスプリングk、ダンパーd、力発生エレメントA、センサ、制御回路、この場合は速度フィードバック（a）で構成されている。アクティブダンピング（減衰）により、非無減衰システムの共振は、伝達率プロットに示されているように、パッシブダンピングの効果を超えて減衰できる。0dB以下のグリーン領域は、剛性連結（b）と比較したアイソレーション（分離）量を示している。

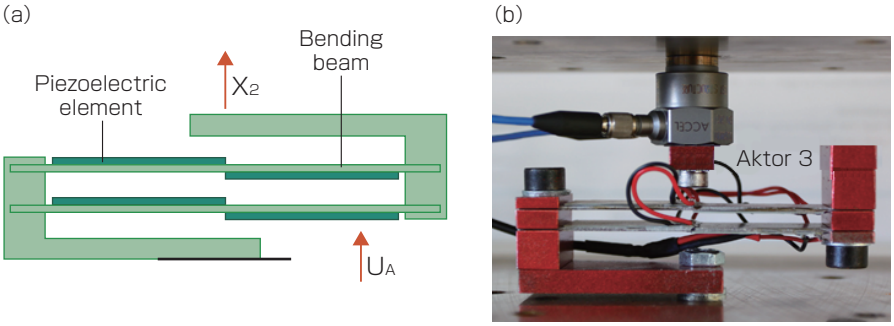


図2　このアクティブ振動アイソレーションマウントは基本的に、圧電アクチュエータを取り付けた2つの曲りビームで構成されている。圧電素子の電圧UAが、マウント自由端の変位×2に影響を与える(a)。マウントの長所は簡素であること、したがってコンパクトで経済的に優れた設計となる(b)。

圧電ベンディングビーム(梁)、いわゆるバイモルフは基本的に、2つ(もしくはそれ以上)の活性層(一般に圧電材料と金属)を持つカンチレバー(片持ち梁)である。このバイモルフは、高感度装置向けのアクティブ振動アイソレーションシステムでアクチュエータとセンサの両方の役割を満たす。特に、低剛性と低構造減衰を必要とするシステム向けである。

圧電バイモルフを使うことの圧倒的なメリットは、簡素な設計である。両面固定バイモルフデバイスは、互いに圧電モジュールを使用したベンディングビームで構成されている(**図2**)。電圧を印加すると、圧電モジュールにより曲げモーメントが引き起こされ、デバイスの自由端が反る。平行機構を利用することで、連結点の角度変位はほぼ避けられ、対応するハードウエア構成は簡素、コンパクト、及びコスト効率よくできる。

3軸および6軸アイソレーションプラットフォーム

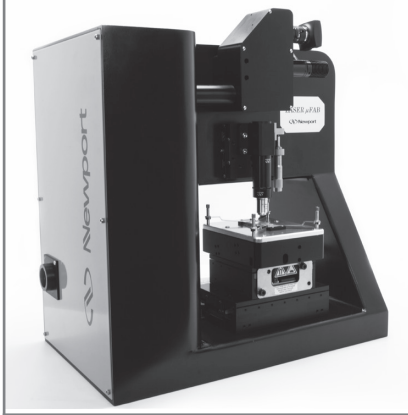
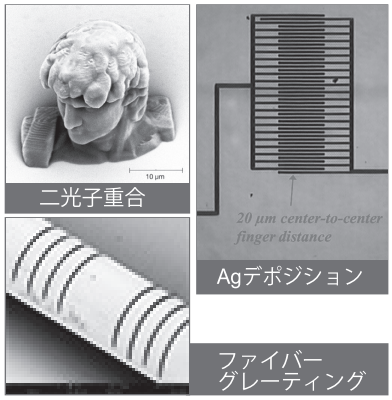
高感度装置のアクティブアイソレーションプラットフォームは、分離(アイソレーション)性能、分離される質量、対象となる周波数範囲に適合しなければならない。圧電バイモルフアクチュエータで構成されるそのようなプラットフォームの設定は、開発過程に新たな要求を生み出す。

設計過程で重要なことは、周波数依存の構造的挙動だけでなく、マウントの剛性と作動力との相互依存性の理解である。したがって、マウント仕様の実現は一定の段階を踏まなければならない、有限要素シミュレーションによる特性評価による解析モデルの最適化から始まって、作製されたハードウエアの実験検証に至るまでがある。

柔軟な数値システムシミュレーション環境に支援されて、要求仕様は設計過程中にどんな段階でも観察することができる。数値モデルは、単一システムのコンポーネントをドラッグ＆ドロップで交換するだけで、分析的、数値的、実験的データによってアップデートできる。

他のパラメータに加えて、速度スペクトル(振動の速さと方向)は、系統的に振動アイソレーション開発過程への重要な入力になる。オフィスや工場など、異なる環境の標準的な速度振幅スペクトル、高精度装置向けの推奨速度振幅スペクトルは、高精度装置の加工精度とその構造的力学に基づいた一定のガイドラインで与えられる[3]。

一方、達成されるべき速度が利用す

Newport
Experience | Solutions
2D/3D レーザー微細加工用
ワークステーション
μFAB
高性能ステージ
任意のレーザーと組み合わせ
微細加工用ソフトウェア提供

アプリケーション
◆マイクロ3Dプリンター(二光子重合)
◆レーザーアブレーション、表面改質
◆バイオ応用
(ナノサージェリー、マイクロダイセクション)
フェムト秒レーザー
微細加工サンプル

二光子重合
20 μm center-to-center finger distance
Agデポジション
ファイバー
グレーティング
http://www.newport-japan.jp/
E-mail:newport@japanlaser.jp
JLC JAPAN LASER 株式会社日本レーザー
本　社　〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1
TEL: 03-5285-0853(直)
大阪支店　TEL: 06-6323-7286
名古屋支店　TEL: 052-205-9711

るセンサの設計基準を規定する。センサは、許容範囲の信号対雑音比(SNR)で計測された速度を検出しなければならないからである。他方、(実験施設での)発生速度がアクチュエータの設計要求を決める。このような速度振幅の縮小のために必要な力を生成できなければならないからである。

統合された典型的な振動アイソレーションシステムの実験的セットアップには、4つの圧電マウントで支持された定板が含まれる(**図3**)。各マウントは、2つの圧電ベンディングビームで構成されている。4個の加速度センサが各マウントの上に配置されている。このような機能部品の他に、静的荷重補償、ストロークリミッタ、4個の小型圧電増幅器、デジタルコトンローラがシステムに組み込まれている。また、全ての必要な電源も含まれる。

実験的評価のために、プラットフォームを振動台に乗せ、その伝達率を受動および能動の場合で計測する。質量とともに、プラットフォームの剛性が一次共振周波数18Hzの原因となる。すでにパッシブの場合は、計測された透過曲線は、25Hzよりも高い周波数では0dB以下にある、したがってこの周波数レンジではパッシブなアイソレーションを提供する。

18Hzで起こる共振振幅の一般的な欠点は動的に補償できる。動的減衰効果により、アイソレーションの周波数範囲は2Hzまで下げることができ、共振周波数で18dBのアイソレーションが達成可能である。実験結果も数値予測の正確さを証明している(図3)。

アクティブ振動アイソレーションシステムのこれら数値的な結果は、予想される受動的および能動的挙動の予備的予測の質を示している。両方の場合、アイソレーション性能はマウントと定板の弾性モードによって制限される。つまり、システムをさらに改善するために効果的な制御に替えることができる。

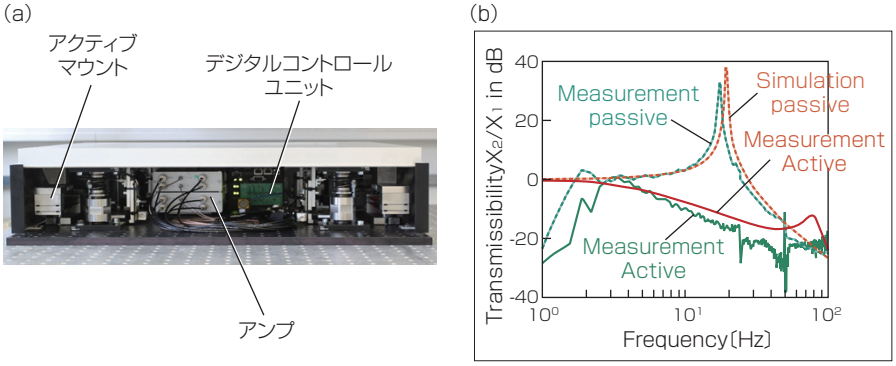


図3 3軸アクティブ振動アイソレーションシステムのセットアップに含まれるのは、マウント、アクチュエータアンプ、デジタルコントロールユニット、センサ、機械的な機構(a)。底板と定板との間の伝達性は、システムの広帯域アクティブアイソレーション効果を示しており、数値予測に一致している(b)。

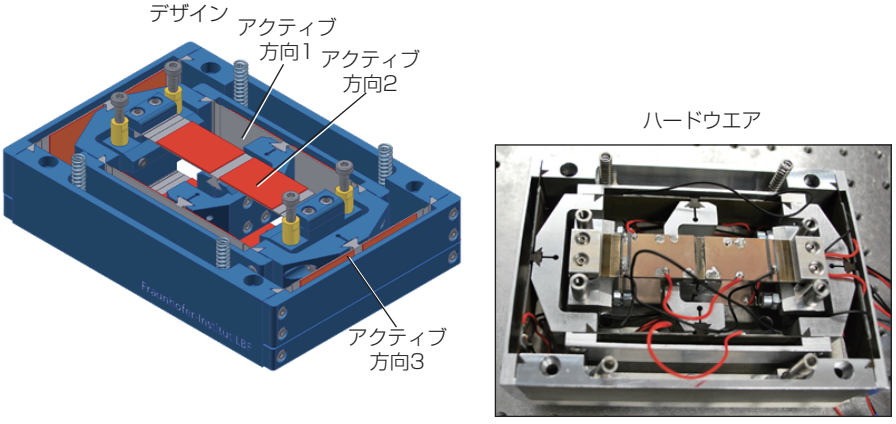


図4 アクティブな3方向を持つ取付ユニットの設計とハードウエア実現を示す。それぞれ2つの平行ガイド圧電ベンディングビームで構成されている。

同じ動作原理を使用するので、3つのアクティブ方向をもつマウンティングユニットは簡単に設計、製造ができる(**図4**)。この設計では、圧電ベンディングビームの3つの平行運動が連続して直角接続されている。各マウントは、全ての方向に、2Nの阻止力と40μmのフリーストロークを生み出すことができる。また、マウントあたり20kgの質量で共振周波数は12Hzとなっている。多数の多軸型マウントを用いることにより、搭載構造の6つの自由度すべてが制御可能になる。

参考文献

(1) A. Preumont, Vibration Control of Active Structures: An Introduction, Kluwer Academic Publishers (now merged with Springer-Verlag), Heidelberg, Germany (2002).

(2) J. Bös et al., J. Acoust. Soc. Am., 123, 3873 (2008); http://dx.doi.org/10.1121/1.2935763.

(3) C. G. Gordon, "Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment," Proc. SPIE, 1619, Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology, San Jose, CA (Nov. 1, 1991).

著者紹介

トーステン・バーテルは、フラウンホーファー研究所、構造耐久性とシステム信頼性(Fraunhofer LBF)の研究者。e-mail: torsten.bartel@lbf.fraunhofer.de URL: www.lbf.fraunhofer.de

LFWJ