

# 光学テーブルの進歩が高感度アプリケーションで振動を和らげる

スティーヴ・ライアン

新技術により空気アイソレータサポートをアクティブ除振ハードマウント上にスタックできるようになり、影響を受けやすいマルチフォトンイメージングや単一分子研究向けに安定した光学テーブルが実現されている。

すべてのフォトニクス研究所のバックボーンは光学テーブルである。複雑なオプトエレクトロニックシステムは、剛性、減衰、平坦性、清浄度、ネジ穴アレイ、均一な熱膨張係数を含む光学テーブルの特性を必要としている。しかし最も重要な特性は、極めて静かで安定した作業面である。

光学テーブルは、非常に剛性の高い、構造減衰スチールハニカムトップと、低周波空気圧防振支持台を組み合わせることで床の振動から隔離されている。これにより6次自由度(DOF)質量・スプリング・ダンパシステムが実現する。ハニカムトップは理想的な、無限に硬い質量として機能し、防振支持台は減衰スプリングとして機能する。

質量・スプリング・ダンパは、振動を増幅する特性共振周波数( $f_n$ )を持つ。約 $1.4 \times f_n$ 以上で、隔離が始まり、周波数が増すとアイソレーションロールオフが改善する。共振増幅とアイソレーションスロープは、アイソレータ(防振材料)減衰係数の関数である。一般的な支持台は、3~4Hz以上で床の振動からの隔離が始まる。効果的なトップ(上面)は非常に硬く、最初の曲げモードは100Hz以上であり、そのモードはハニカム構造内にマウントされた構造ダンパにより効果的に減衰されている。

100Hzを超える共振周波数では、アイソレータあるいは他のパスを通して

トップに届く振動は、オプトエレクトロニックデバイスが最も敏感な、つまり0.5~30Hzの臨界周波数域で増幅されることはない。とはいえ、振動減衰が問題なのではない。アイソレーション支持台をスタックした新しい光学テーブル設計が、こうした低周波振動を隔離することで臨界領域でテーブルの安定性を改善している。従って、最も敏感なマルチフォトンイメージングや単一分子生物物理学の研究が実施できるのである。

## 減衰 vs. 隔離

振動減衰と隔離は、異なる特性であるが、不正確に互換使用されることがよくある。減衰は、機械的エネルギーの熱への変換であり、これはテーブルトップ構造と振動隔離支持台の両方に適用する。隔離された構造に到達するエネルギーは放散されなければならない(熱に変換される)。テーブルトップ構造に組み込まれた質量・スプリング・ダンパは、トップの最初の曲げモード以上(100Hz以上)でトップの曲げを減衰させる。光学テーブルシステムが乱されたときには、空気アイソレータがその共振周波数(1~3Hz)で活性化される。空気アイソレータ内部に構築された開口部、ダッシュポットおよび他のデバイスが、このエネルギーを熱に変換するに従い、この動きは消散する。

それに対してアイソレーションは、アイソレータ支持台の機構によって達成される、ペイロードに届く床の振動の低減である。トップに組み込まれた電気機械デバイスによるトップ構造のアクティブダンピングは、ダンピング(減衰)と考えられるべきであり、アイソレーションではない。つまり、それはトップに届く振動を防ぐのではなく、それを減衰させるからである。

歴史的に、光学テーブルの振動パフォーマンス改善は、トップの構造的減衰を強めることに向けられた。目標はスチールハニカム技術によって達成される超高剛性対重量比と高い構造的減衰および小さな共振増幅の組合せである。

一般に、これは成功を収めた。現在、最高のトップは最低共振周波数で臨界減衰を達成している。これが大成功を収めている限りでは、さらなる改善で得るところはほとんどない。つまり収穫逡減である。最近まで、床の振動からトップを支持するアイソレーションシステムにほとんど進歩はなかった。

## 低周波アイソレーション問題

研究者やエンジニアが、計測を行い、これまでにない微小スケールの分解能を達成しようとしているので、光学テーブルのアプリケーションは、ますます低周波床振動の影響を受けやすくなる。そのような0.5~30Hzの範囲は、最高度に硬く、ベストの減衰トップでも減衰されない。

隔離された表面に届くこの周波数域の振動はトップの剛体運動になるだけ

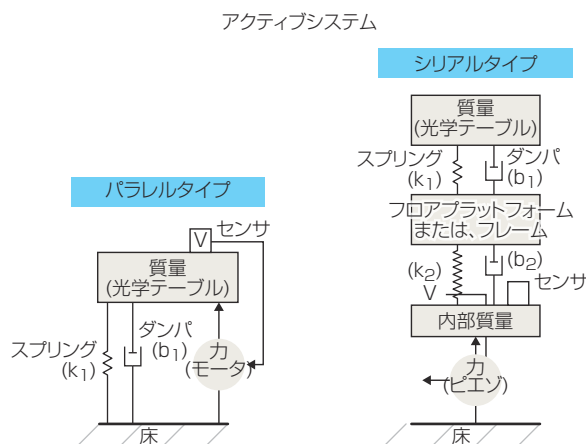
である。それどころか、この周波数域の振動を効果的に減衰するには、それがトップに届かないように隔離しなければならない。ベストの振動隔離支持台は、この周波数範囲では限定的なアイソレーションしか提供しない。一般にそれらは、パッシブなセルフレベルング・エアアイソレータで構成されている。これらは、1～4Hz範囲の床振動を増幅し、4Hz以上を隔離する垂直および水平低共振周波数のエアアイソレータである。

低周波アイソレーション改善のために、アクティブフィードバック制御技術が光学テーブル振動隔離支持に適用されている。「アクティブ」という語は、さまざまな制御系を記述するために業界用語で漫然と使われている。これには、エアアイソレータの機械的セルフレベルングのような単純なフィードバック機構が含まれる。この場合は、圧力調整器と機械的結合機構を結びつけている。

明確にするために、ここでは「アクティブ」と言う時、特に慣性フィードバックアクティブシステムを指す。そのシステムでは、受振器あるいは加速度器(それぞれ、速度または加速度を計測する)などの慣性センサからの信号が条件づけられ、増幅され、究極的にはクローズドループフィードバックで使われて、電気機械もしくは他のタイプのアクチュエータを通じて不要な振動をキャンセルする。

### 慣性フィードバック能動システム

慣性フィードバックアクティブシステムの初の具現化はパラレルタイプ構成だった。そこには慣性センサが隔離された面にマウントされており、またキャンセルアクチュエータは隔離面を支持するスプリング(エアアイソレータ



支持)と平行にマウントされている。このアプローチは、1～4Hz域で支持のエアアイソレータの共振増幅を効果的に抑制することができる。

とはいえ、このアプローチによって幅広い帯域で隔離することは困難である、センサがトップの剛体運動と、隔離されたペイロード上の構造の共振とを分けることができないからである。制御システムは、両方を相殺しようとするので、システムが不安定になる。妥協案は、そのようなシステムの帯域を<8Hzに制限し、エアアイソレータの共振増幅を効果的に抑制し、安定性を改善することだが、それは0.5～30Hz域の広い範囲では振動隔離を改善することはない。

代替アプローチは、連続タイプ構成を使って開発された。ここでは、支持スプリングは相殺アクチュエータと連続的に設置されている。センサは、硬い15～20Hzのスプリングでペイロードを支持する超剛性内部質量にマウントされている。アクチュエータは、内部質量を完全にサポートしている(図1)。

このアプローチでは、シリアルタイプ構成のアクチュエータが、トップ(上面)の静重量を支持しなければならないので、リニアモータや他の従来タイプのアクチュエータは適さない。しか

図1 パラレル及びシリアルタイプアクティブ振動制御システムを示している。ここでは、支持スプリングとキャンセル(相殺)アクチュエータが、パラレルまたはシリアルいずれかになっている。

し、ピエゾアクチュエータ技術の進歩により、ピエゾが、シリアルタイプ構成の理想的な選択肢になっている。今では、それらは大きな静的質量を支持するように設計することができ、また非常に低い転位に対して優れた応答特性を持つように設計することができる。

この具現化では、床振動は硬いアクチュエータを通して伝搬されるので、内部質量で感知される。アクチュエータがフロアノイズを「フィルタリング」(フィルタで取り除く)して内部質量に届かなくするので、フィードバックループは内部質量で閉じている。つまり、フロアが上方に動くときアクチュエータが収縮し、フロアが下方に動くときアクチュエータは拡大する。

3軸デザインは、この制御挙動をすべての6DOFに広げる。そのようなシステムは、本質的にロバストである、ペイロード共振が、硬いスプリングによって内部質量に届かないようにフィルタリングされ、またセンサが内部質量にマウントされているからである。内部質量は、>1000Hzが必要な高剛性を達成するように設計することができる。従って、利得設定は、頻繁に到達する最大150Hzまでの帯域でアグレッシブにすることができるので、不安定性リスクはほとんどなく、非常に高

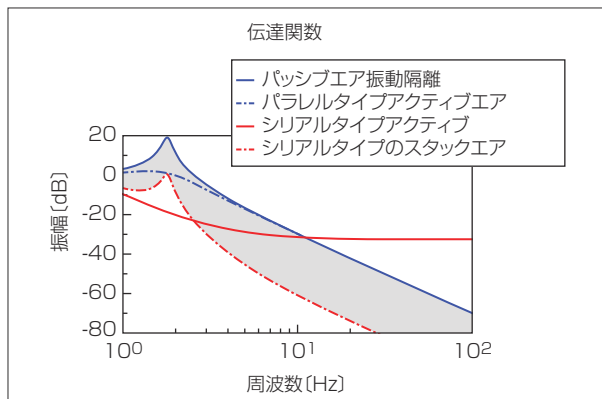


図2 振動隔離システムがスタックされる際に、伝達関数は加法的になる。モデルの網掛け領域は、パッシブエアから、シリアルタイプアクティブシステムのスタックエアへの改善を示している。

る(図2)。またシリアルタイプアーキテクチャはアクティブハードマウントであるので、アイソレーションシステム間で不安定性あるいはクロストークのリスクなしでスタックすることができる。15～20Hzハードマウントスプリングは、2Hzパッシブエアスプリングと比べると十分なインピーダンスマッチングを達成できるほど硬く、安定性を保証している。

残念ながら、スタッキングシステムのDIYアプローチは不便で煩わしい。よりよいアプローチは、統合された、2ステージ、パッシブ・オーバー・アクティブシステムである(図3)。そのようなシステムが現在、6次自由度(DOF)パフォーマンスのものが、市販で入手可能であり、両方の世界のベストが得られる。エアアイソレータとピエゾアイソレータの減衰は付加的であるので、2ステージの振動隔離の本質的に安定したアーキテクチャからのアグレッシブな低周波振動キャンセルとなる。

最もセンシティブなアプリケーションの中には、パッシブ・オーバー・アクティブシステムが採用されるようになってきているものもある。単一分子生物学、マルチフォトンイメージング、原子間力顕微鏡、共焦点顕微鏡、大きなサンプルの干渉計法による研究などである。ここでは、サブナノメートル、サブオングストローム分解能さえ切望されている。かつてなく小さなスケールで分解能が求められているので、振動アイソレーションの急速な進歩が、床振動が臨界制限要因とならないように保証している。

著者紹介

スティーヴ・ライアンはTMCの部門副社長。TMCは米AMETEK Ultra Precision Technologies社の一部門。  
e-mail: steve.ryan@ametek.com  
URL: www.techmfg.com

いレベルの振動減衰が実現する。

このアプローチは特に低周波で効果的であり、1～3Hz範囲のパッシブエアアイソレータに対して最大2ケタの改善が実現される。加えて、オフボードビーム源に関しては、ペイロードの位置安定性維持という付加的な利点がハードマウント支持から得られる。これはソフトエア支持では実現不可能である。

シリアルタイプアプローチからは、非常に低い周波数では飛躍的な改善が得られるが、もっと高い周波数ではほとんど恩恵は得られない。パッシブ支持スプリングは、従来のパッシブエアスプリングよりも著しく硬いので、高い周波数ではあまり防振できない。10～30Hz域では、シリアルタイプアクティブシステムは、パッシブ、セルフレベリ

ングエアアイソレーション支持と比べると振動減衰はよくない。

10Hz以上の  
隔離用スタックシステム

常に、より画期的なソリューションを探究しているので、研究者は、シリアルタイプのアクティブシステムをパッシブエアアイソレータの下に設置してスタッキングシステムの実験を行ってきた。伝達関数が加法的となるので、そのようなシステムからは各サブシステムの統合隔離が得られる。

実際、このアプローチから二段階の隔離が得られる。1つはアクティブ、もう1つはパッシブである。たとえば、10Hzアクティブで30dB減衰および10Hzパッシブで30dB減衰とすれば、10Hzでトータル60dB減衰が達成され

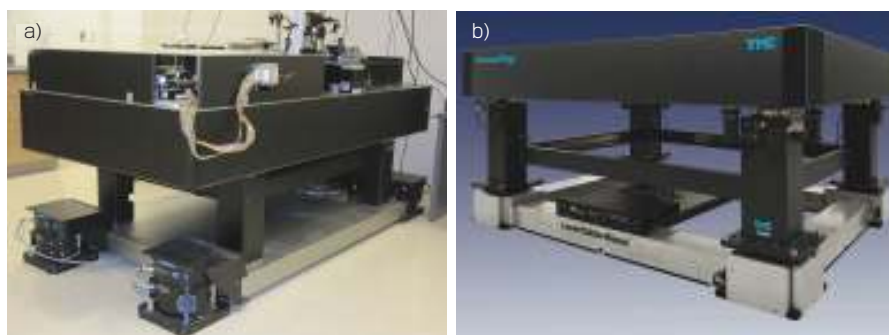


図3 研究者は、アクティブ、ハードマウント支持(a)の上にパッシブ光学テーブルアイソレータをスタックしてパフォーマンスを改善しようとしている。とはいえ、市販の2ステージ、パッシブ・オン・アクティブシステム(b)からは、広い周波数範囲で20～30dB以上のアイソレーションが得られる。