

自家製低周波除振システムは、市販製品に匹敵、あるいは上回る

マヤンク・チュー、ゲロ・ヘルムスドルフ

市販除振システムは高価であり、低周波除振が必要な時には、性能がよくないことが多い。機械バネや油浸球を持つ自家製システムは、十二分な置き換えである。

機械の移動や建物の冷暖房装置など日常生活の一部であろうと、地震活動のような極端なケースであろうと、機械的振動は広範囲に存在する。ビル内の機械的振動は、1Hzから数百Hzの範囲であり、さまざまな振動源から生ずる。人々の動き(1~5Hz)、昇降機(≤40Hz)など多くの他の擾乱から生ずる。例えば、重いドア、機械、換気扇あるいはエアコン、変圧器、風や海の波、自動車、列車あるいは飛行機を含む近隣の輸送形態(7~350Hz)もある⁽¹⁾。

周波数百Hz以下の長波長振動では、そのような振動は、普通の研究室ビルでは十分に減衰されないことがある。従って、計測、ナノファブリケーション、顕微鏡など、さまざまな領域で、高精度計測の操作は、干渉フリーの計測をするために除振を必要としている。

独チュービンゲン大(University of Tübingen)植物分子生物学センター(ZMBP)では、顕微鏡アプリケーション向け光学テーブルに焦点を当てている。光学テーブル向け除振システムは、計測されるナノスケール物体の重要な特性と振動が干渉する前に機械的振動を減衰しなければならない。ナノスケール顕微鏡や単一分子イメージングには、再現性のある正確で高分解能計測のために光学テーブルの十分な除振が必要不可欠である。

一般的な除振システムは空気制振テーブル、バンジーコード、振り子システム、パッシブシステム、フィードバック回路付アクティブシステムを含むが、多くの市販製品は高価であり、低周波領域では性能がよくない^(2~7)。手頃な価格では、バンジーコードが最良の選択であるが、その構成部品として使用されているゴムは、クリープという材料特性のために、長期的には信頼度がなくなる。

最近、比較的簡素で低コストの機械的コンポーネントを使って、当研究室が特注除振システムを開発し、特性を明らかにした。これは、低周波減衰用の市販システムに匹敵し、ある意味では凌駕している。

除振原理の適用

特注除振システムは、標準天井高(2.5m)フォーマットで鋼バネ懸架システムである。言い換えると、それはシリコンオイルで減衰を強化したフックバネシステムである。

通常、天井からのフックバネ懸架システムでは、共振周波数は主にスプリングの伸展性によって制限される。従って、クリープ(上述の材料特性、持続的機械応力による永久歪)の傾向があるラバーバンジーコードを使う天井懸架セットアップは、静止長を長くする必要があり、従って、十分な減衰のために高い天井(約4m)が必要になる。

クリープで変わらない標準的な天井高で高性能除振システムを開発するた

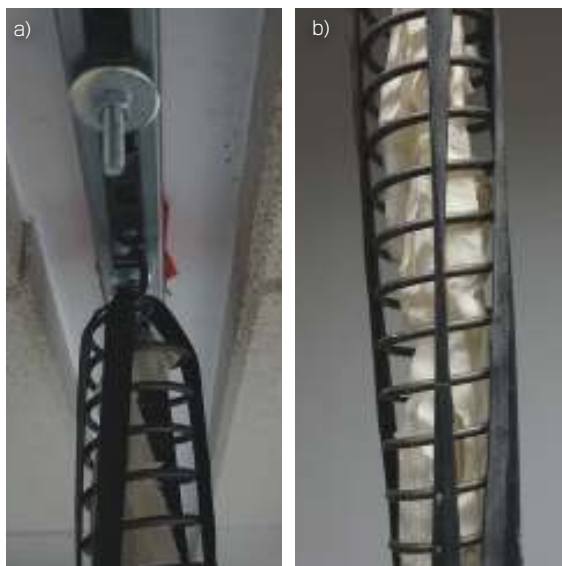


図1 自家製除振システムは、鋼バネを使って天井から吊り下げられている(a)。付加的減衰はラテックスグラブで提供される(b)。

めに、鋼バネを利用することを選択した。鋼バネは、短い静止長と耐たわみ値により素晴らしい代替として機能する。とはいえ、そのようなシステムは、さらに除振装置を必要とする。高粘度シリコンオイルと組み合わせた鋼バネは、すべての自由度で振動を減衰させる方策の重要要素になることが分かった。

ZMBPでの顕微鏡実験はビルの地下で実施される。部屋は、振動減衰フォームの上に鋼板を使ってビルそのものから分離されている。鋼板の上のレンガの壁、コンクリートの天井で作られたその部屋は、遮音のための防音ドアで補完されている。

その自家製除振システムは、共振周波数0.5Hz用に設計された。光学テーブル(900×1400×200mm)は、天井の実装レールと光学テーブルに接続した鋼バネを使って天井から吊り下げられている(図1)。鋼バネは、バネ定数0.39N/mm、初期テンション21N、無負荷静止長0.4m、最大伸張1m、重量1.4kgである。この剛性の割には、どんな高周波伝達も、バネ両端と実装レール間の圧迫ゴムパッドで最小化される。

鋼バネの内部共振とその急増をさらに減衰するために、標準ラボ用ラテックスグラフがバネから下げられ、テープを使ってバネコイルを接続した。あるいはまた、自転車タイヤのインナチューブも使える。チューブの長いストリップを切って、バネの内側に実装することもできる。全体として、そのようなシステムは、手頃な価格で、効率的な減衰システムになる。

天井懸架バネ構造の他に、さらなる減衰は、M6糸で光学テーブルの実装レールに鋼球(半径2cm、質量256g)を取り付けることでセットアップに組み込まれた。これら鋼球は、さらに、高さ

と内径が10cmの透明アクリルガラ
スピーカー(図2)に流し込んだシリ
コンオイル(粘性:100Pa·s)に挿入され
た。シリコンオイルは、非常に高粘
度で、あらゆる方向の振動を減衰する。
また、この除振システムで最も高価な
コンポーネントでもある(図3)。

実世界の性能

どんな振動システムの性能評価でも、それが共通の振動基準に従っていることの確認が重要である。自家製除振システムは、これらの基準に対して評価されるとともに、その性能は、他の共通除振システムと比較された。

一般に振動基準は、平均振動速度の平方根として示される(自乗平均つまりrms)。ここでは速度は、光学テーブル上の振動分析器のパワースペクトル密度で測定される。前述の顕微鏡研究室に格納された3つのウォークインチャンバに、垂直方向rms速度を異なる除振システムを持つ3つの光学テーブルで比較し、すべてのテーブルに同等の振動入力があることを確認した。2つのテーブルは、最先端のアクティブ及びパッシブ除振システムを装備しているが、第3のテーブルは、自家製除振システムを利用していた。

1~10Hzの範囲では、特注システムは、米マイナスケイテクノロジー社(Minus K Technology)と独アキュリオン社(Accurion)の市販システムを凌駕した。10Hz以上では、全3システムが同等であった(図4)。

他の市販システムと同様、自家製除振ステーションは、厳しいNIST-A1基準を上回った。しかし、すべての3システムが、VC-D振動基準を使うと、及ばなかった。VC-Dは、一般にVC-Eよりも2倍高く、走査型及び透過型電子顕微鏡のための厳しい基準要件であるので、それは、言うまでもなく実

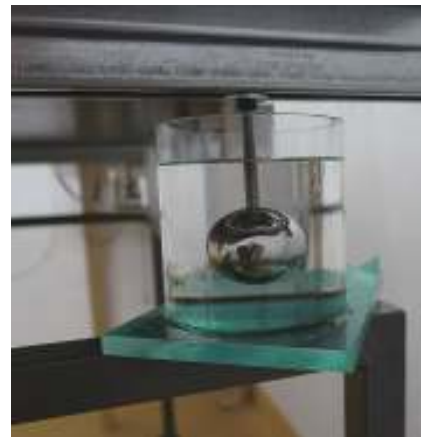


図2 鋼バネ天井懸架に加えて、減衰は高粘度シリコンオイルに沈設した鋼球でも得られる。



図3 自家製除振システムは、低周波とある振動自由度で市販製品を上回っている。

適切である。

自家製システムの除振材料は、高粘性シリコンオイル内の鋼球で構成されているので、振動はあらゆる方向で減衰すると考えられていた。この仮定をテストするために、セットアップは水平方向計測も受けた。すばらしいことに、その安価なセットアップは、1~100Hz範囲で、前述の市販システムを凌駕した。

低周波で、また非垂直自由度では、鋼バネ粘性除振システムは、最先端の

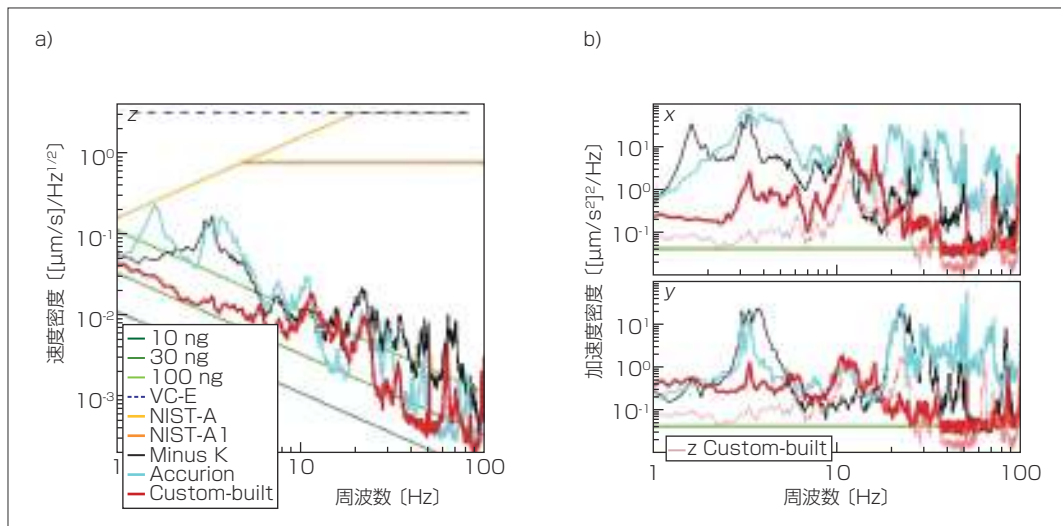


図4 自家製除振システム(赤い線)を、垂直方向の振動rms速度密度に関して、市販のMinus K 500BM-1(黒い線)及びAccurion Halcyonics VarioBasic 90-300システム(ライトブルーライン)と比較(a)。凡例には、影響を受けやすい装置、重力加速度の単位の基準線のファシリティ向け振動基準(VC-E、NIST及びNIST-A1)が含まれる。同じシステムが、水平加速度源スペクトル密度で比較されている(b)。比較のために、自家製システムの垂直データを薄いピンクラインで示している。

市販アクティブシステムやパッシブシステムを実際に上回っている。さらに、全方向除振は、並進自由度(及び、たぶん、回転自由度も同じ)の間の最小結合を示している。

どんな大学の研究室にも、除振システムのコストは、考慮すべき重要な事柄である。自家製システム鋼球、シリコンオイル、鋼バネ、機械的コンポーネントの材料コストは、約300ユーロ。光学テーブル(約1500ユーロ)を含め自家製システムのコストは、1980ドル(1800ユーロ)である。対照的に、マイナスケイ社やAccurion社の市販セットアップは、2倍以上の価格であり、約5510ドル(5000ユーロ)と9920ドル(9000ユーロ)であり、光学テーブルは除外されている。

アプリケーションに特化した微調整

科学者やエンジニアは、多くのアプリケーションを取り扱う性能と能力に関して、機械的システムを改善しようと努力している。市販のアクティブ及びパッシブ除振システムは、非常にコンパクトで美しく設計されており、光学テーブルの下に簡単に収まるが、時には操作の柔軟性に制限がある。

その代わりに、自家製システムは、極めて安価で、アセンブリが容易であり、各アプリケーション要件に調整可能であるが、天井実装にも依存しなければならず、バネ懸架の十分なスペースが必要になる。それは、あるアプリケーションパラメータに支障をきたすことがあり得る。

超高分解能顕微鏡や電子顕微鏡を使って繊細な計測を行う研究室は、自家製除振システムの適切な支持者となり得る。天井に高さがあれば、チューニング(また除振の改善)は可能である。例えば、4mの天井の高さがあれば、約0.3Hzの共振が可能である。これは、2.5m天井高と0.5Hz共振周波数の現在

の例と比べると、はるかに優れている。

粘性減衰材料も、鋼球のサイズを変えたり、シリコンオイルの粘性を変えたりすることで調整できる。シリコンオイルを含むガラスピーカーの中で球の懸架距離を変えるだけで、減衰係数を約10倍に変えられる⁽⁸⁾。セットアップは、さまざまな実験装置向けに簡単に拡張できる。

低周波範囲、一定の並進及び回転自由度には、自家製除振システムは、最先端の市販システムを上回る。ここに紹介した設計法が動機づけとなって他の人々が、計測や医療などのアプリケーション領域向けに自家製システムを開発することを願っている。

参考文献

- (1) G. L. Hermsdorf et al., Rev. Sci. Instrum., 90, 1, 015113 (2019).
- (2) B. Voigtländer et al., Rev. Sci. Instrum., 88, 2, 023703 (2017).
- (3) See <http://bit.ly/VibrationRef3>.
- (4) M. Stephens, P. Saulson, and J. Kovalik, Rev. Sci. Instrum., 62, 4, 924-932 (1991).
- (5) D. L. Platus, "Negative-stiffness-mechanism vibration isolation systems," Proc. SPIE, 1619, OPTCON '91, San Jose, CA (Feb. 1, 1992).
- (6) J. Richman et al., Rev. Sci. Instrum., 69, 6, 2531-2538 (1998).
- (7) M. Kim, H. Kim, and D. G. Gweon, Rev. Sci. Instrum., 83, 10, 105117 (2012).
- (8) E. Schäffer, S. F. Nørrelykke, and J. Howard, Langmuir, 23, 7, 3654-3665 (2007).

著者紹介

マヤンク・チュウとゲロ・ヘルムスドルフは、独テュービンゲン大植物分子生物学センター細胞ナノサイエンス、国際マックスプランク研究所Ph.Dフェロー。
e-mails: mayank.chugh@zmbp.uni-tuebingen.de gero.hermsdorf@zmbp.uni-tuebingen.de
<https://uni-tuebingen.de>