



構造の部分的置換を用いた 3次元構造内での局所的振動減衰の基礎検討

佐久間亮太¹⁾, 平木剛史²⁾

1) 筑波大学 大学院人間総合科学研究院 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, sakuma@pml.slis.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 図書館情報メディア系 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, hiraki@slis.tsukuba.ac.jp)

概要: 振動子の接触した3次元構造において、振動は構造全体に伝播してしまうため、構造の一部の表面にのみ振動を提示し、その他の振動を減衰させることは難しかった。そこで、振動を伝播させたい構造内の領域の周囲の構造を、ばねの役割を持つ柔軟な繰り返し構造に置換し、その他の構造から独立させることによって振動を減衰する手法を提案する。本稿では、円柱型の構造において、振動を伝播させたい領域と振動を減衰させたい領域の振動をレーザ変位系を用いて測定した。結果として、振動を減衰させたい領域の振動が減衰していることが確認された。

キーワード: 振動伝播、デジタルファブリケーション、触覚

1. はじめに

振動刺激は、タンジブルインタフェースやゲームなどのコントローラからのフィードバック、画面の疑似的なクリック感 [1, 2] やテキストの提示 [3] に幅広く利用されている。しかし、例えば振動提示デバイスを把持している際、特定の指にのみ刺激を提示するといった、同一構造内の特定の範囲のみ振動刺激を提示し、その他の範囲の振動を減衰させることは難しい。これは、振動が振動子の接触している構造全体に伝播するためである。

そこで、構造の一部の範囲のみ振動が伝播し、その他の範囲の振動が減衰するような手法の研究が行われている。その1つとして、複数の振動子からの振動を重ね合わせ、特定の範囲にのみ振動提示を行う手法が挙げられる [4, 5, 6]。しかし、振動子を並べる性質上、この手法は十分広い2次元平面上での振動のみが考慮されており、3次元構造内での振動の重ね合わせは考慮されていない。そこで、構造が大規模でなくても振動減衰が可能である手法が提案されている。この手法では、構造の曲げ特性を操作することで、構造を伝播するカットオフ周波数を操作し、知覚可能な周波数領域の特定範囲以外への振動の抑制を実現している [7]。しかし、この手法は振動伝播を行う構造の厚みが薄い状態でのみ考慮されており、こちらの手法も3次元構造において適用することは考慮されていない。

そこで本研究では3次元の同一構造内において、構造の一部の範囲のみ振動が伝播し、その他の範囲の振動が減衰するような構造を設計、および作製することを目的とする。具体的には、まず柔軟な素材によって振動源と振動を減衰させたい領域の間に挟み込むことによって振動を分離する手法と、柔軟性をはじめとした構造の特性を、特定の構造

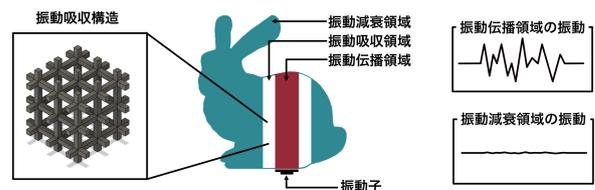


図 1: 局所的な振動減衰を実現する構造の概要

パターンを単位としてそれを繰り返し連結させた、繰り返し構造を用いて変調させる手法に着目する。そして、図1のように振動させたい領域の周囲の構造を、特定の構造パターンを単位としてそれを繰り返し連結させた、柔軟な繰り返し構造に置換する。これによって振動源とその他の構造を分離するような局所的な振動減衰が可能な構造設計手法を提案する。この手法によって、例えば、複数指でものを触っている場合、同一構造内でも複数指にそれぞれ違った振動刺激を提示することが可能になる。これまでの研究では、振動源とその他の構造を分離する際、適した減衰構造を振動減衰を埋め込みたい構造の形状ごとに個別に設計することによってこれを実現していたが [8]、本稿では、振動減衰構造である繰り返し構造の充填を行うことのみによってこれを実現する。本稿では、提案する設計手法に基づいて、振動提示したい領域と振動を減衰させたい領域が分離された円柱状の構造を作製した。さらに、その構造の振動提示したい領域と振動を減衰させたい領域の2地点の振動を測定し、比較を行うことによって提案する設計手法の有効性を検証した。

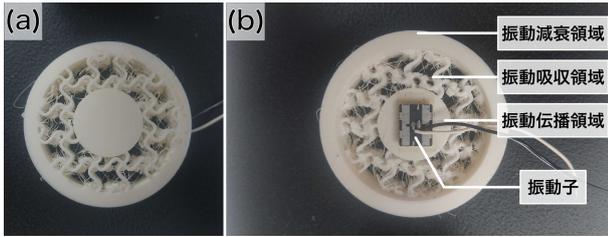


図 2: 作製した円柱状の振動減衰構造

2. 提案手法

本研究では、図 1 のように、振動させたい領域の周囲の構造を、特定の構造パターンを単位としてそれを繰り返し連結させた、柔軟な繰り返し構造に置換し、振動源とその他の構造を分離することによって局所的振動減衰を実現する。ゴムなどの柔軟な素材によって作製されたブッシュ等を振動源と振動を減衰させたい領域の間に挟み込むことによって、振動する構造に接触している別の構造から振動を分離することは、多くの機械製造の工程において取り入れられている。一方で、構造物の作製においては通常同一の材料を用いるため、構造内の硬軟は一様であり、先述した手法を取り入れるには製造後の工程が必要となる。そこで、本研究ではメタマテリアルに代表されるように、最適な構造を設計することによって巨視的に硬軟などの特性を変調させる技術に着目する [9]。この技術を応用し、同一構造であっても領域ごとに硬軟さを変化させることによって、振動源と振動を減衰させたい領域の間に挟み込む柔軟な構造を作製し特定範囲のみの振動伝播を実現する。

本稿では、先述した設計手法に基づいて、図 2 のような円柱状の局所的振動減衰構造を作製した。作製した構造は、振動伝播領域、振動吸収領域、振動減衰領域の 3 つの領域によって構成されている。この振動吸収構造によって振動伝播領域の振動が分離され、振動減衰領域の振動が減衰する。この際、振動吸収領域の構造が単位構造パターンが繰り返された構造に置換されている。

繰り返される単位構造は、図 3 のような正弦波の組み合わせによって表現される細い構造とした。伸張および、圧縮に必要な力の強さと比較して曲げに必要とする力の強さが十分少ないため、この構造は構造全体が伸張および、圧縮の際に発生する力を曲げ方向に変換する正弦波の形状を採用している。この単位構造は 1 辺 10 mm の立方体の中心を原点とした際に、以下の不等式群のいずれかを満たす領域 (x, y, z) を結合したものである。

$$\begin{cases} |x + 2 \sin \frac{y\pi}{5}| \leq 0.5 \wedge |z| \leq 0.5 \\ |y - 2 \sin \frac{x\pi}{5}| \leq 0.5 \wedge |z| \leq 0.5 \\ |x + 2 \sin \frac{z\pi}{5}| \leq 0.5 \wedge |y| \leq 0.5 \end{cases}$$

また、3DCAD ソフト (Grasshopper) を用いてこの構造の設計し、3D プリンタ (Ultimaker S3, Ultimaker) を用いて造形を行った。振動伝播領域、振動吸収領域、振動減

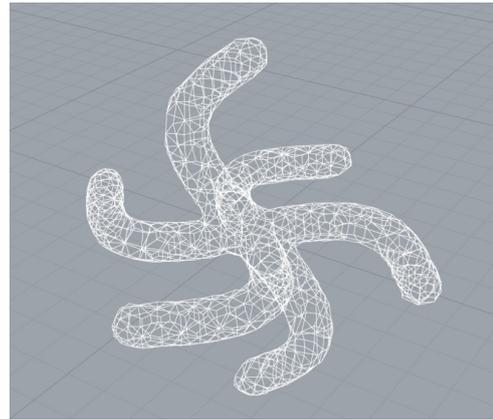


図 3: 円柱状の減衰構造に埋め込んだ繰り返し構造内の単位構造パターン

衰領域の積層には、全て熱可塑性ポリウレタン (TPU) 素材である Ultimaker TPU 95A を用いた。また、振動伝播構造の底面に装着されている振動子には、リニア共振アクチュエータ (LRA) (LD14-002, 日本電産コパル) を利用した。この振動子は、両面テープ (SRE-19, 3M) を用いて構造の底面と固定した。

3. 実験

提案手法に基づいて設計した構造において、特定領域にのみ振動が伝播し、その他の領域の振動は減衰することを確認するため、振動の測定実験を行った。測定実験では、図 4 のように構造に接触した振動子を振動させ、振動伝播領域と振動減衰領域の 2 地点において振動を観測した。

3.1 測定条件

振動測定地点にはレーザーの反射率を高めるために、アルミ箔テープ (No.AL-50BT, 3M) を貼り付けた。円柱状の構造の振動減衰領域の底面は除振台 (VPG2836, ナベヤ) に両面テープ (SRE-19, 3M) を用いて固定した。振動子にはファンクションジェネレータ (FG085, JYE Tech) が接続されており、ファンクションジェネレータから振動子の共振周波数である 150 Hz、振幅 4 V の正弦波を提示した。

振動の測定にはレーザーヘッド (LC-2440, キーエンス) を接続したレーザー変位計 (LC-2400, キーエンス) を用い、レー

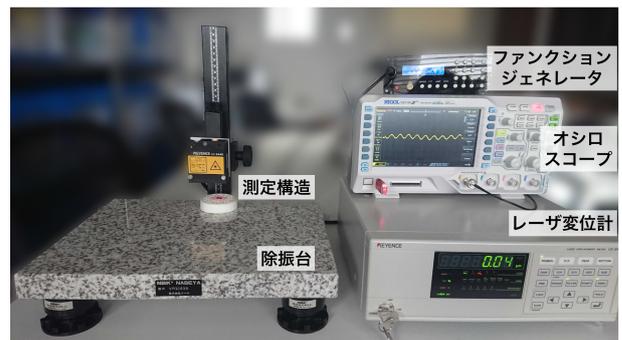


図 4: 測定を行った実験環境の様子

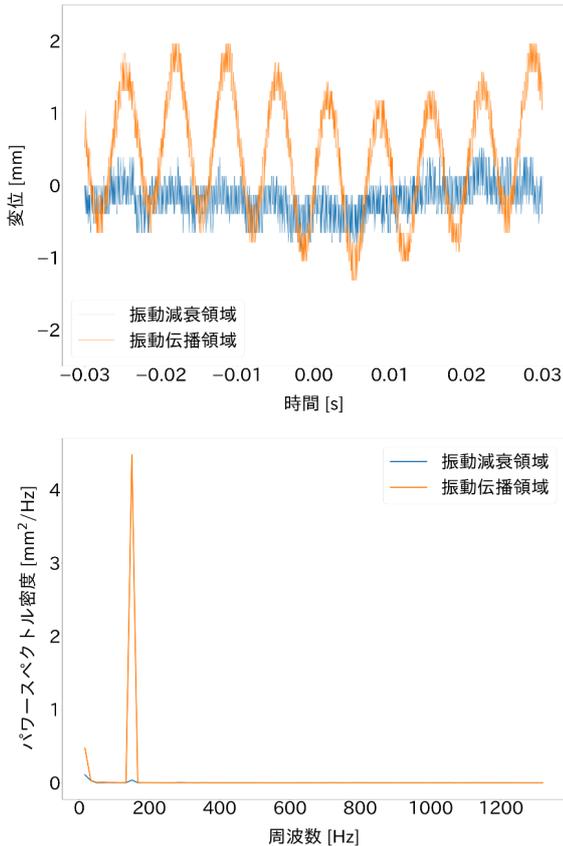


図 5: 測定結果：(上) 構造の鉛直方向の変位、(下) パワースペクトル密度

ザヘッドは測定地点から構造に対して垂直方向に 30 mm 離れた地点に設置した。このレーザ変位計の出力はオシロスコープ (DS1104, RIGOL) を用いて観測した。

3.2 測定結果

測定された振動伝播領域と振動減衰領域の変位とパワースペクトル密度を図 5 に示す。時刻に対する変位を示したグラフから、振動伝播領域において観測されている振動が振動減衰領域において減衰していることが確認できる。加えて、周波数に対するパワースペクトル密度を示したグラフから、振動伝播領域では観測されている 150 Hz 付近の振動が振動減衰領域では大きく減衰していることがわかる。

4. まとめ

本研究では、構造の一部を柔軟な繰り返し構造を用いて置換することによって構造内の一部のみ振動させ、その他の振動を減衰させる、3次元構造内での局所的振動減衰手法を提案した。また、この局所的振動減衰手法の有効性を検証するために、振動を伝播させる領域と振動を減衰させる

領域の 2 領域において、振動子からの振動を測定した。結果として、振動を減衰させる領域の振動は、振動を伝播させる領域よりも十分小さく、振動が減衰していることが明らかとなった。今後は、振動提示範囲に対して、この構造を自動設計する手法、およびそれを用いたデザインアプリケーションについて研究を行っていく予定である。

謝辞 本研究は、JST ACT-X JPMJAX1900 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Fukumoto, M. and Sugimura, T.: Active click: tactile feedback for touch panels, *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '01, pp. 121–122 (2001).
- [2] Kim, S. and Lee, G.: Haptic feedback design for a virtual button along force-displacement curves, *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '13, pp. 91–96 (2013).
- [3] Romano, J. M. and Kuchenbecker, K. J.: Creating Realistic Virtual Textures from Contact Acceleration Data, *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 5, No. 2, pp. 109–119 (2012).
- [4] Wöckel, S., Steinmann, U. and Arndt, H.: Haptics by time reversal of elastic waves, *2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, pp. 1–3 (2016).
- [5] Hudin, C., Lozada, J. and Hayward, V.: Localized Tactile Feedback on a Transparent Surface through Time-Reversal Wave Focusing, *IEEE Trans. Haptics*, Vol. 8, No. 2, pp. 188–198 (2015).
- [6] Pantera, L. and Hudin, C.: Sparse Actuator Array Combined with Inverse Filter for Multitouch Vibrotactile Stimulation, *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 19–24 (2019).
- [7] Dhiab, A. B. and Hudin, C.: Confinement of Vibrotactile Stimuli in Narrow Plates, *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 431–436 (2019).
- [8] 佐久間亮太, 平木剛史.: 3次元硬軟構造の一体印刷を用いた振動伝播構造設計の基礎検討, 第 26 回 VR 学会大会, pp. 1–3 (2021).
- [9] Schumacher, C., Bickel, B., Rys, J., Marschner, S., Daraio, C. and Gross, M.: Microstructures to control elasticity in 3D printing, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 34, No. 4, pp. 1–13 (2015).