



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

佐久間亮太¹⁾, 平木剛史²⁾

- 1) 筑波大学 情報学群 情報科学類 (〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, 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: 振動子を用いた触覚ディスプレイにおいて、その振動は、振動子に接している構造全体に伝播してしまうため、構造の特定部位のみを局所的に振動させることは難しかった。そこで本論文では、硬い構造による振動伝播構造と柔軟な構造による振動吸収構造を、3D プリンタを用いたマルチマテリアル 3D プリントによって造形することで、構造の特定部位にのみ触覚振動を伝播させる構造を提案する。実験において、提案した構造の振動伝播領域と柔軟な構造の外側に存在する振動減衰領域の振動を測定し、柔軟な構造の外側に存在する領域では振動が減衰していることを確認した。

キーワード: 振動伝播、振動子、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、視覚障害者に対する情報提示、スマートフォンにおける通知やゲームでの効果に広く用いられており、さらに画面の疑似的なクリック感 [1, 2] やテクスチャの提示 [3] にも利用されている。しかしながら、振動刺激は振動を与える振動アクチュエータや piezo 素子が接触している構造全体に伝播してしまうため、振動刺激を構造内の特定の領域にのみ提示することは困難である。これは、タッチインタラクションにおいて、複数指に対して別々の情報を伝達できないという制限や、同一の構造物に複数種のテクスチャ提示を行うことが難しいことの原因となっている。

この問題を解決するために、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提案されている。この手法は、時間的な振動伝播の時間反転 [4, 5] や、それに対応するフィルタ [6] を用いることで、振動子の配置、周波数を決定し実現される。しかし、この手法は、振動子を複数配置することのできる構造の大きさが必要であり、3次元での伝播の計算の複雑であるため、主に大規模な2次元平面を対象とした手法である。一方、近年では構造の曲げ特性を操作することで特定の範囲外への振動伝播を抑制する手法が、構造が大規模でなくても振動減衰が可能である点で注目されている。例えば、振動させるプレートの幅を決定し、伝播する最小の波長を操作する [7] ことで特定周波数領域の振動伝播の抑制を実現している。しかし、既存手法は振動伝播を行う構造の厚みが薄くなければならないため、やはり3次元平面上での振動抑制に対してのみ有効であり、3次元構造への適用は困難であった。

そこで本研究では、3次元構造で特定領域以外の振動減衰を行うことのできる構造を設計、作製する手法を提案する。一般に3次元構造で振動減衰を行う場合、ゴムなど柔軟な素材、バネやダンパなどといった振動減衰を行うことが

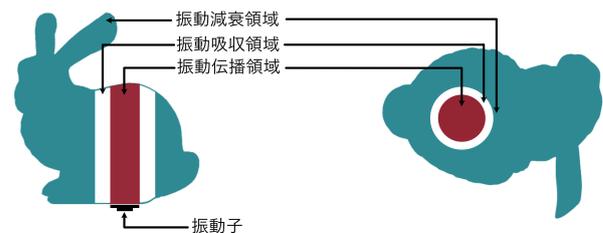


図 1: 3次元振動伝播構造の概要

できる構造によって振動源と減衰させたい構造を分離することで実現している。そこで、図 1 のように 3次元構造内で振動子の振動を伝播させる振動伝播領域、振動を吸収する振動吸収領域、そして振動が減衰されている振動減衰領域を設けることで、振動伝播領域の表面でのみユーザが振動を知覚し、振動減衰領域の表面では知覚しない構造を設計、作製する。具体的には、3D プリンタによって複数素材を同時に印刷するプリント技術を用いて、振動伝播領域を硬い素材、構造で造形し、その周囲を振動吸収領域として柔軟な素材、構造によって造形することで、目的の構造を作製する。また、実際に作製した構造を用いて振動伝播領域上の表面部位と振動吸収構造の外側に位置する領域の表面部位における振動を測定し、比較を行うことで提案した構造設計の妥当性を確認する。

2. 提案手法

提案する構造は、図 1 で示したように、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。本稿で実際に作製した構造を図 2 に示す。振動伝播領域である中心の円柱は硬質な ABS 素材を用いて作製した。また、振動吸収領域は、厚さ 4 mm の柱上の構造 4つによって振動伝播領域の周囲に構成されており、それぞれ

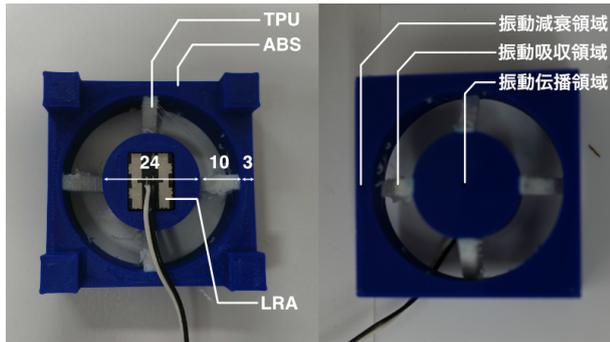


図 2: 作製した振動伝播、吸収、減衰領域によって構成された構造 (左: 底面図、右: 上面図)。図中に数字で示された長さの単位は mm である。

上面から底面側に、等間隔に接続されている。振動吸収領域の作製においては、柔軟な熱可塑性ポリウレタン (TPU) 素材を用いた。振動減衰領域は振動吸収領域の外側に構成され、作製においては振動伝播領域と同じく ABS 素材を用いた。

構造の作製においては、2 種類の材料の同時造形が可能な熱融解積層式 3D プリンタ (Ultimaker S3) を利用した。また、ABS 素材のフィラメントとして Ultimaker ABS (青色) を、TPU 素材のフィラメントとして Ultimaker TPU 95A (白色) をそれぞれ使用して造形を行った。また、振動伝播構造に振動を加えるための振動子として、リニア共振アクチュエータ (LRA) (LD14-002, 日本電産コパル) を使用した。LRA は振動伝播領域である円柱の底面の中心に、両面テープ (No.5000NS, 日東電工) で接着することで配置した。

3. 実験

特定の表面領域のみに振動を伝播させ、その他の領域で振動を減衰させる 3 次元構造となっているかを明らかにするために実験を行った。そのために、提案した構造における振動伝播領域と振動減衰領域における表面振動について測定、比較した。

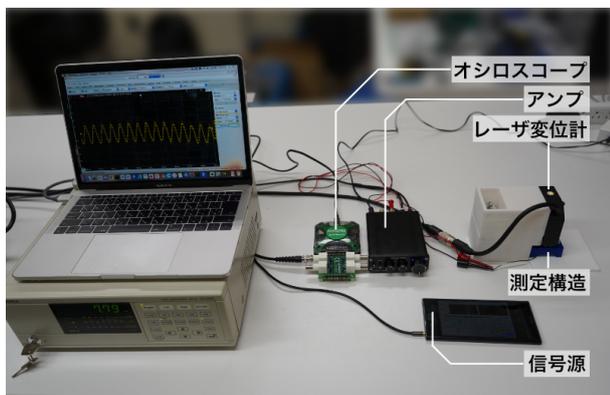


図 3: 測定を行った実験環境の様子

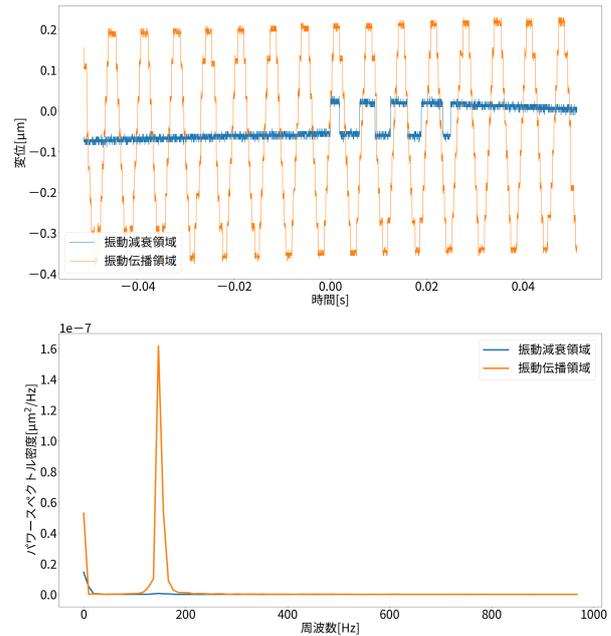


図 4: 測定結果：(上) 変位、(下) パワースペクトル密度

3.1 測定条件

振動の計測は、振動伝播領域の表面上と振動減衰領域の表面上の 2 ヶ所を測定点とし、前項で作製した構造を用いて行った。測定を行った実験環境の様子を図 3 に示す。振動の測定は、構造表面から 10 mm 上方に設置したレーザーヘッド (LC-2420, キーエンス) を接続したレーザ変位計 (LC-2400, キーエンス) を用いて行った。レーザ変位計のアナログ出力値はオシロスコープ (Analog Discovery 2, Digilent) によって計測し、USB 経由で接続した PC にそのデータを記録した。オシロスコープのサンプリング周波数は 80 kHz であった。また、振動を計測する地点にはレーザ変位計からの測定光を反射させるためにアルミ箔テープ (No.AL-50BT, 3M) を貼り付けた。また、スマートフォン (Xperia XZ Premium, SONY) のアプリケーションであるファンクションジェネレータから出力された信号波形をデジタルアンプ (FX-2020A+ CUSTOM, FX-AUDIO-) によって増幅した上で、構造に埋め込まれている LRA に入力することで振動を提示した。振動信号の波形は正弦波とし、周波数は使用した LRA の共振周波数である 150 Hz に設定した。

3.2 測定結果

実験で測定した構造表面における振動の変位とパワースペクトル密度の変化を図 4 に示す。変位の様子より、振動伝播領域の表面においては振動が観測できている一方で、振動減衰領域の表面においてはほとんど振動していないことが見て取れる。また、パワースペクトル密度の様子より、振動伝播領域においては入力信号である 150 Hz 付近の振動が観測されているが、振動減衰領域ではほとんど観測されていないことが見て取れる。以上より、作製した構造が同一構造上で特定の表面領域のみに振動を提示することが可能

であったと言える。

4. まとめ

本稿では振動伝播構造と振動吸収構造が一体的に構成された構造を用いることで、特定の表面部位にのみ触覚振動を提示させることができる構造を提案し、設計した構造について、2種類の材料の同時造形が可能な3Dプリンタを用いたマルチマテリアル3Dプリントを行うことで作製した。実験においては、振動伝播領域と振動減衰領域における表面振動をレーザー変位計を用いて測定し、提案構造を用いることで同一構造上で特定の表面領域にのみ振動を提示することが可能であることを明らかにした。今後の展望として、提案構造についてより複雑な3Dモデルへの適用とその自動生成、構造設計の最適化手法について検討を行っていく。**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).