



機械-熱刺激を独立に提示する 超音波駆動パッシブ触覚デバイスの予備検討

森崎汰雄¹⁾

Tao MORISAKI

1) NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (〒 243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1, tao.morisaki@ntt.com)

概要: 物体の触覚再現には硬さ感など機械的情報に加え温度感も必要である。本研究では、超音波の音響エネルギーから簡便かつ小型の機械構造(テコ、吸音材)のみを用いて機械刺激と熱刺激を同時に取り出し、これらを指腹に同時提示できる軽量な触覚デバイスを開発する。機械刺激は超音波の集束点に生じる放射力をテコ構造で増幅することで、熱刺激は布による超音波の吸音で提示する。

キーワード: パッシブ触覚デバイス, 熱刺激, 機械刺激, 集束超音波

1. 緒言

物体の接触感やテクスチャに加えその温度感も再現すれば、没入感の高いバーチャルリアリティ体験が実現できる。これまでに、温度情報を提示することで材質感を提示する触覚ディスプレイが提案されている [1]。しかし圧力や振動といった機械触覚刺激と熱刺激の提示には個別の素子と駆動回路が必要になる。このため、これら多感覚をカバーする触覚デバイスは重たくかさばる傾向にある。

本研究では集束超音波で遠隔駆動するパッシブな熱-機械刺激提示デバイスを提案する。このデバイスは簡単な機械構造(吸音材、テコ)のみで駆動回路、配線、バッテリーレスに構成でき、このため軽量かつ小型に作られる。超音波を布などの吸音材に照射することで熱を、テコに照射することで 0.1 N と強い振動と圧力を提示できる。集束超音波は超音波振動子をアレイ状に並べた超音波フェーズアレイで生成する [2]。各刺激提示の原理は 2. 章で説明する。

本論文は吸音材とテコを一体化したデバイスの実用的なデザインを示し、これが機械-熱刺激を同時に提示できるかシミュレーションと物理測定を通じて予備的に確認する。吸音材での熱提示は Kamigaki らによって [3]、テコでの強力な力と振動の提示は Morisaki らによってそれぞれ確認されているが [4, 5]、これらを一つの小型デバイスにまとめた多感覚デバイスとして用いた例はない。また、実用的に使用できる音響エネルギー(例えば 10 W)の範囲で機械-熱刺激をどの程度提示できるかも検討されていない。

2. 原理

本章では先行研究によって示された集束超音波の布への照射による熱提示、及びテコ機構を用いた放射力の増幅(力と振動の提示)について説明する。これらを組み合わせて機械-熱刺激を提示するパッシブ触覚デバイスを開発し、4. 章でその物理特性を評価する。

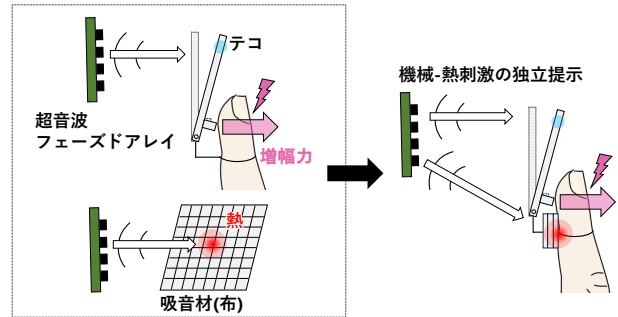


図 1: 機械-熱刺激を独立に提示するパッシブデバイスのコンセプト図。機械刺激はテコによる増幅、熱は布による吸音で提示する。超音波焦点の提示位置を変えることで提示刺激を切り替える。

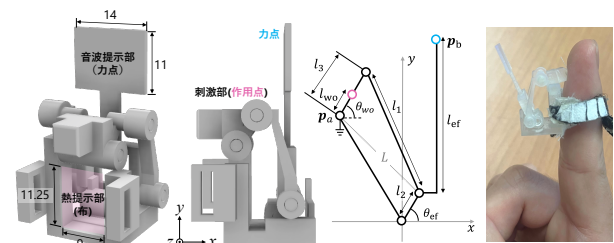


図 2: パッシブ触覚デバイスの 3 次元 CAD、模式図、及び装着時の写真。

2.1 布による熱提示

集束超音波を布に提示するとその提示音波が吸収されるため、布の提示部の温度が上昇する。Kamigaki らは装着した軍手に超音波焦点を提示することで、遠隔に熱刺激を提示する触覚ディスプレイを開発した [3]。超音波照射によって得られる温度分布形状は超音波の音場分布に従うことが実験的に確認されているため、この手法では軍手の一部を局所的に加熱できる。例えば焦点パターンを布に提示した

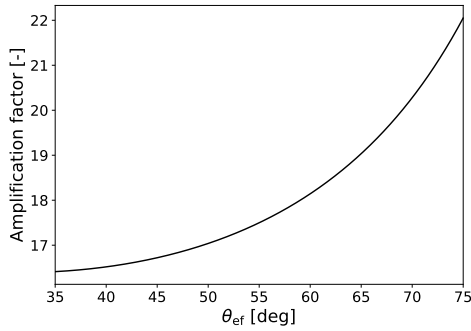


図 3: 増幅率の理論値。力点と作用点の回転速度の比を用いている。

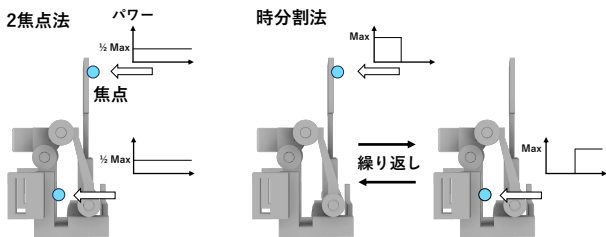


図 4: 熱-機械刺激の同時提示のための駆動方法。2焦点法では2つの焦点を熱提示部と力点の両方に提示する。時分割法では、単一焦点を熱提示部と力点に交互に打ち分ける。

場合、その焦点形状におおむね一致する局所的に高い温度分布が得られる。

2.2 力と振動の提示

Morisaki らはテコ的一种である four-bar 構造に超音波焦点を照射することで、0.7 N の力と振幅が 0.1 N 以上である 2-30 Hz の振動をとりだせることを示した [4, 5]。超音波焦点には音響放射力と呼ばれる数十 mN の非接触力が生ずる。この放射力は音速で提示されるため、その力学的パワーは高くとれる。すなわち、テコを用いて増幅した場合でも、その増幅率は高速に皮膚に伝えることができる(高速に皮膚を押し込むことができる)。Morisaki らの研究では入力放射圧を 35 倍にまで増幅しており、また 2-30 Hz の低周波振動提示も行っている。

3. 開発デバイス

本章では開発したデバイスのハードウェア構成とその駆動アルゴリズムについて説明する。

3.1 システム構成

図 2 に開発したデバイスの 3 次元 CAD と実際の写真を示す。このデバイスは four-bar 機構を用いて開発しており、指腹に熱-機械刺激を提示する。この増幅率は 17.5 倍に設計されており、これは次章で導出する。このデバイスには放射圧を加えるためのサイズ 1.54 cm² の受け皿部(力点)と、超音波を透過するための 1.01 cm² の穴が開いている。また回転軸から力点までの距離 l_{ef} は 3.2 cm、作用点までの距離 l_{wo} は 3.5 mm である。この透過部と指の間には熱提示のための厚さ 1 mm であるポリエステル布が張り付けてある。

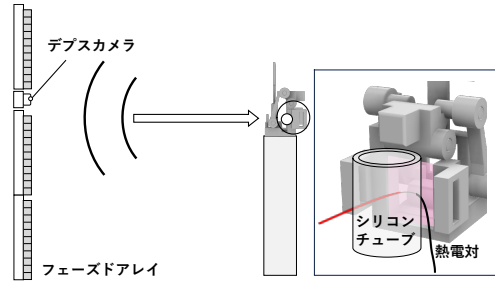


図 5: 温度特性の測定セットアップ

以降、この布が張られた箇所を熱提示部と呼称する。透過した集束波はこの布部に吸収され、布の温度が上昇することで皮膚に対する熱刺激となる。このデバイスは光造形 3D プリンター (Formlabs Form 3+) を用いて製作しており、その材料にはヤング率は 2.77 GPa の樹脂 (Formlabs クリアレジン V4) を用いた。また、その重量は 3.6 g である。

3.2 デバイス動作

本章ではデバイスの動作を定式化し、増幅率の設計値が 17.5 倍であることを示す。図 2 に定式化のための模式図を示す。本構造では、作用点の軸周りの位置 $\mathbf{p}_{wo} \in \mathbb{R}^2$ と力点の位置 $\mathbf{p}_{ef} \in \mathbb{R}^2$ の移動速度の比が増幅率となる。まず、 $\mathbf{p}_{ef} = (x_{ef}, y_{ef})$ が与えられた時の \mathbf{p}_b は以下である。

$$\begin{cases} x_b = l_2 \cos \theta_{ef} \\ y_b = l_2 \sin \theta_{ef} \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta_{ef} = \tan^{-1} \frac{y_{ef}}{x_{ef}} \quad (2)$$

この時、作用点の位置 $\mathbf{p}_{wo} = (x_{wo}, y_{wo})$ は以下である。

$$\begin{cases} x_{wo} = x_a + l_{wo} \cos \theta_{wo} \\ y_{wo} = y_a + l_{wo} \sin \theta_{wo} \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta_{wo} = \cos^{-1} \frac{L^2 + l_{wo}^2 - l_2^2}{2Ll_{wo}} + \tan^{-1} \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \quad (4)$$

ここで、 l_{wo} は固定軸から作用点までの距離、 l_{ef} は力点までの距離である。また、 $\mathbf{p}_a = (x_a, y_a)$ は力点側の固定点と作用点側の固定点の位置関係を示す。

この関係式を用いて計算した放射圧の増幅率を図 3 に示す。この計算では角度 θ_{ef} を 35-75 deg の範囲で変化させた。デバイスにとって θ_{ef} の初期値(力点である音波の受け皿が地面に対し垂直となる角度)は 55 deg であり、この角度において増幅率は 17.5 倍であった。

3.3 熱と機械刺激の同時提示

本章では熱と機械刺激を同時に提示する超音波の照射パターンを 2 種類提案する。それぞれ 2 焦点法と時分割法と呼称する。各提示方法のコンセプトを図 4 に示す。

3.3.1 2 焦点法

2 焦点法では、2 つの焦点を熱提示部と力点の両方に提示する。この方法では機械刺激(力、振動)と熱を同時に提示できるが、それぞれに用いる音響パワーは半分となる。

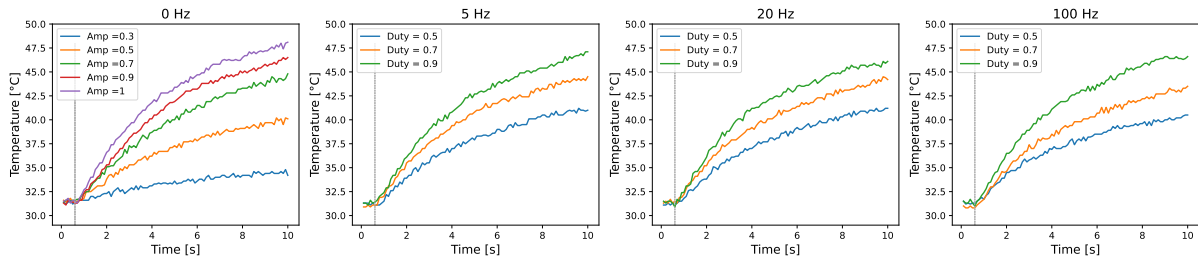


図 6: 温度特性の測定結果。超音波の提示タイミングをグレーの点線で示す。

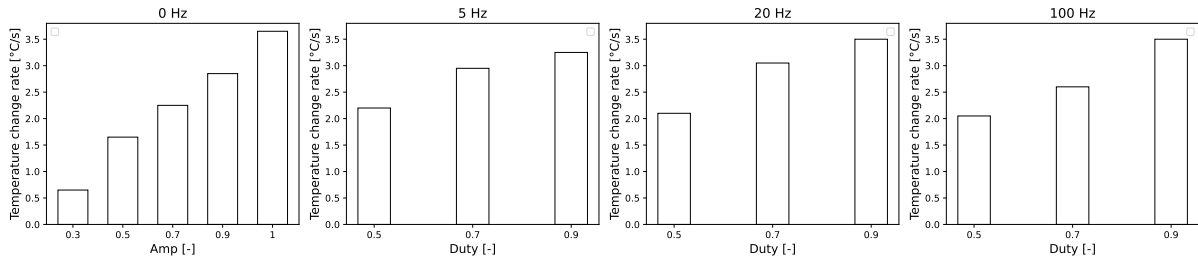


図 7: 音波照射後 2 秒間における温度上昇率

3.3.2 時分割法

時分割法では、単一焦点を熱提示部と力点に交互に打ち分ける。この方法では、熱刺激を同時提示した場合でも、振動提示に利用する音響パワーを減じることなく、最大出力で提示できる。一方、各提示部への入力音響パワー（放射圧）が時間変動するため定常的な力は提示できない。本来振動提示には入力放射力の変調が必要であるため、必然的に入力放射力（音響パワー）が 0 となるタイミングがある。この時分割法では、この振動時に減じた音響パワーを熱提示に利用している。また、時分割法は熱提示部と力点それぞれから見ると矩形に変調された放射圧（音響パワー）の提示に相当する。この矩形波の duty 比を制御することで熱提示と振動提示に割り振る音響パワーを制御できる。

4. 評価実験

本章では、開発したパッシブ触覚デバイスデバイスを二焦点法と時分割法でそれぞれ駆動し、その際の熱特性と力学的特性を評価する。

4.1 温度特性

4.1.1 実験手順

図 5 に実験装置を示す。超音波フェーズドアレイ 6 台（1494 個の 40 KHz 超音波振動子 [6]）の前に開発したパッシブ触覚デバイスが固定されており、熱提示部に超音波焦点が提示される。またデプスカメラ（Intel RealSense D435）で熱提示部の 3 次元位置を測定した。3 次元位置は、熱提示部の近傍に貼ったカラーマーカの位置を撮影画像にバイナリフィルタを適用して検出した。

事前測定により、本システムにおいて提示できる最大の放射圧は 18 mN である [5]。したがって、デバイスが提示できる最大の力は 0.315 N である。熱提示部には布と内径

5 mm のシリコンチューブで熱電対センサを挟み込んでおり、布の中心部の温度変化を測定した。

本実験では、一定振幅及び矩形変調した超音波焦点を熱提示部に提示した。本実験で与えた超音波の放射圧プロファイル（音響エネルギーに比例）を F_r を以下の様に定式化する。

$$F_r = A_{\max} A f(t) \quad (5)$$

ここで A_{\max} は提示放射圧の最大値、 $A \in [0, 1]$ は出力を決定する係数、 $f \in [0, 1]$ は放射圧を変調するための周期関数である。本実験では、まずデバイス出力を振幅一定 ($f = 1$) のまま $A = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1$ と変化させた。また、 $f(t)$ を 5, 20, 100 Hz の矩形波としたパターンも提示した。この変調パターンにおいては常に $A = 1$ であり、矩形波の duty 比を 0.5, 0.7, 0.9 で変化させた。これらはそれぞれ 2 焦点法と時分割法の状況を再現するために設定している。本実験で測定するのは温度特性のみであるため上記条件に沿った単一焦点が熱刺激部のみ提示された。

4.1.2 実験結果

図 7 に測定したシリコンチューブ温度の時間変化を示す。各グラフに音波の照射タイミング (0.5 s) をグレーの点線で示す。全条件に対する音波照射から 2 秒間の温度変化率を図 7 に示す。この変化率には 2 秒間の温度データに対する線形回帰直線の傾きを用いた。回帰は最小二乗法で行った。

0 Hz の場合、最大の温度変化率は $3.73 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 、最小では $0.67 \text{ }^\circ\text{C/s}$ であった。また、振幅が減衰するとともに温度変化率も小さくなることが示された。5, 20, 100 Hz 駆動の場合、いずれの周波数においても duty 比 0.9 の場合に変化率最大となり、最も高いのは 100 Hz 駆動で $3.56 \text{ }^\circ\text{C/s}$ であった。

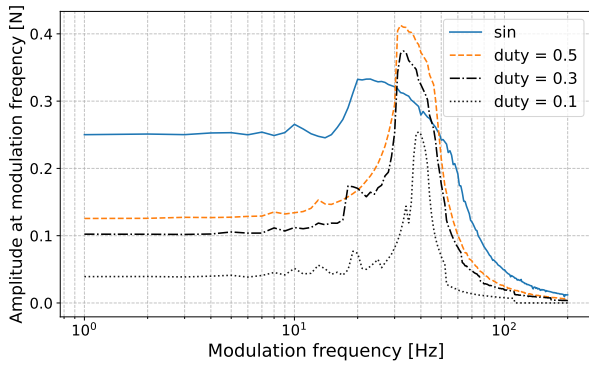


図 8: 正弦波と矩形波を入力した場合の振動特性シミュレーション結果。方形波の duty 比は 0.5, 0.3, 0.1 で変化。

4.2 振動特性シミュレーション

本章では、熱特性に用いた正弦波、及び矩形波を入力した場合のパッシブデバイスの振動特性をシミュレーションする。シミュレーションにおいては、均質な棒のリンクにばね定数が 6000 N/m のばねが結合されていると仮定した。このばね定数は先行研究で用いられたゲルシートの硬度をもとに決定した [5]。このばねは装着した際に用いる指腹の弾性を模擬するために用いたため、その接続位置は図 2 に示した模式図の作用点 (回転軸から 3.5 mm 離れた位置) である。各リンクの質量は実測を基にバー 1, 2, 3 をそれぞれ 0.6, 0.5, 0.4 g とした。各バーの番号は図 2 で示したものの (l_1, l_2, l_3) に対応している。入力放射圧 F_r は 2-200 Hz の正弦波及び方形波とした。方形波の duty 比は 0.1, 0.3, 0.5 で変化させた。この設定は熱特性評価時に用いた duty 比 0.9, 0.7, 0.5 にそれぞれ対応している。

シミュレーションはラグランジュの運動方程式に基づいて行った。以下に用いた式を示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{ef}} - \frac{\partial L}{\partial \theta_{ef}} = T \quad (6)$$

ここで、 L はシステム全体のラグランジアン (運動エネルギーと位置エネルギーの差)、 T は力点に与えられたトルクである。本シミュレーションにおいては力点の先端に最大 18 mN の変調された放射圧が加えられたと仮定したため、その最大値は $T = 18 \times 0.032 = 0.576$ mN・m であった。

図 8 にシミュレーションの結果を示す。duty 比が 0.3, 0.1 の場合は 0.5 の場合に比べ、そのピーク振動振幅がそれぞれ 0.9, 0.63 倍となることが分かった。また、振幅がピーク値をとる周波数もシフトすることが示された。

4.3 議論

これらの実験結果より、焦点位置を力点と熱提示部で交互に入れ替える時分割法を用いることで、強力な振動と熱刺激を指先に提示できる可能性が示された。duty 比を 0.9、すなわち音響パワーのうち 9 割を熱提示に用いた場合、温度上昇率は 3.49 °C/s 以上と温覚提示に十分であった。この場合でもシミュレーションの結果によれば、得られる最大振幅は 0.63 倍までしか減衰せず十分高い振幅が得られる

ことが示唆された。提示放射圧に対し線形に出力振幅が減衰することを考えれば、振動刺激を提示する場合は単純に音響パワーを振り分ける 2 焦点法よりも時分割法が効果的だといえる。今後はこの振動振幅を実測し、得られた圧力刺激、振動刺激、熱刺激の知覚強度を評価する。

5. 結言

本論文では、超音波で駆動するパッシブな熱-機械刺激提示デバイスを提案、開発した。このデバイスは指先に 17.5 倍に増幅した放射圧と熱刺激を提示する。また、熱刺激と機械刺激を同時に提示するための駆動方式である 2 焦点法を時分割法を提案し、その性能を熱特性の実測、振動特性のシミュレーションを基に予備的に評価した。実験結果より、音響エネルギーを時分割的に熱、機械刺激提示に振り分ける時分割法を用いることで、3.49 °C/s と温覚提示に十分な温度上昇率を達成しつつ、その提示振幅は最大値の 0.63 倍に維持されることが示唆された。

今後は振動特性についても実測し、さらに得られた圧力刺激、振動刺激、熱刺激も評価することで触覚デバイスとしての実用性を検証していく。

謝辞 本研究は JST ACT-X JPMJAX21KJ の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] H.-N. Ho and L. A. Jones, “Development and evaluation of a thermal display for material identification and discrimination,” *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, vol. 4, no. 2, pp. 13–es, 2007.
- [2] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, “Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010.
- [3] T. Kamigaki, S. Suzuki, and H. Shinoda, “Noncontact thermal and vibrotactile display using focused airborne ultrasound,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2020, pp. 271–278.
- [4] T. Morisaki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Ultrasound-driven passive haptic actuator based on amplifying radiation force using simple lever mechanism,” in *SIGGRAPH Asia 2022 Emerging Technologies*, 2022, pp. 1–2.
- [5] T. Morisaki, T. Kamigaki, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Airborne ultrasound-driven passive haptic device presenting low-frequency vibration and static force,” in *IEEE World Haptics Conference, Work-in-Progress*, 2023, p. 1.
- [6] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, “Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display,” *IEEE Transactions on Haptics*, 2021.