

研究終了報告書

「パッシブ構造を用いた超音波の放射力増幅に基づく非拘束な力覚提示」

研究期間： 2021年 10月～ 2024年 3月

研究者： 森崎 汰雄

1. 研究のねらい

これまでに、触れた/触れられた感覚である触覚提示技術が多く提案されている。身近な用途としては、ゲームコントローラーに搭載された振動子が挙げられる。この振動子はゲーム映像に合わせた振動提示による体験の没入感向上に利用されている。触覚提示は体験の拡張だけでなく、体のさまざまな場所に強力な力を提示することにより、ユーザに対し直観的に所定の動作を支持することも提案されている。これまでに、ピアノ演奏など技能習得に向けた動作の教示、騒音環境下でも気付ける危険の通知などを行うことができる。しかし、より強い力の提示には出力に合わせた駆動電源も必要でその提示装置は大掛かりになる。触覚提示にはユーザの身体と装置が接触している必要があり、提示装置の複雑化はユーザの自然な動作を阻害する。また、全身への触覚提示には複数の触覚デバイスを同時使用する必要もあり、配線の複雑化も問題となる。

この課題に対し、本提案では、集束超音波で遠隔に駆動するパッシブな(電子部品レスな)触覚デバイスを開発し、手軽に強力な触覚提示を使える環境を構築する。超音波を集束させると、音響放射力と呼ばれる数十 mN(数 g)の非接触な力が生じる。提案するパッシブ触覚デバイスにはプラスチック製のテコが内蔵されており、このデバイスに(テコに)印加された放射力を数十倍まで増幅し強力な力としてユーザに提示する。このパッシブ触覚デバイスはプラスチックだけで数 g と軽量に作れ、また配線も必要ないため複数デバイスの同時使用も容易である。放射波の放射力はそのままでは弱い、その力は音速で提示されるためその力と速度の積である力学的パワーは数ワットと高くとれる。これまでも磁気やレーザーで遠隔駆動するパッシブアクチュエータは提案されていたが、本提案が初めて高出力、高応答性、広いワークスペースを両立させた。

ACT-X での研究期間を通して、まずこのデバイスのコンセプトを実証するため、指先に強い力を提示するパッシブ触覚デバイスを開発し、その開発基盤と基本理論を構築した。また、シミュレーションと実測を通じて、このデバイスが 0.7N の力と 30 Hz 以下の振動を提示できることを定量的に確認した。また、このデバイスを発展させ、空間分布を提示できるパッシブなピンアレイデバイスや熱と振動を同時に提示できるパッシブデバイスとその駆動アルゴリズムも提案し、その検証を行った。今後は、開発したデバイスの柔軟化を目指し、触覚デバイスとしての付け心地や設計の自由度向上を目指す。さらに、触覚デバイスとしてだけでなく、柔軟なパッシブアクチュエータとしてより一般的な応用を目指していく。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究期間では、提案した超音波駆動のパッシブ触覚デバイスについて、その原理検証を行うとともに触覚デバイスとしての性能向上に努めた。具体的には、触覚提示における基本的な要素である力、振動、熱の 3 点を提示できることを確認した。このうち力と振動については、その空間分布も制御できるピンアレイ式デバイスの開発にまで着手できた。

成果 1 では、four-bar 構造で 17.5 mN の入力放射力に対し指先に 0.7 N の力と 30 Hz 以下の振動を提示できるパッシブ触覚デバイスを開発した。このデバイスの増幅率は 35 倍であり、この増幅特性と周波数特性の実測値がシミュレーションと一致することも確認した。また、そのワークスペースと知覚強度も評価し、強力な触覚提示に十分実用可能であることを確認した。

成果 2 では、振動と力に加え、熱感も提示できるパッシブデバイスを開発しその駆動アルゴリズムを提案した。前成果をもとに小型化したパッシブデバイスを開発し、さらに吸音部を付与した。この吸音部とテコ部に超音波焦点を時分割的に(交互に)提示することで、振動振幅は最大出力の 60%を維持したまま 3.4 °C/s の熱刺激を同時提示できた。

成果 3 では、より単純で小型化できる機構として、押しピン構造を用いて皮膚の刺激面積を小さくとり、提示圧力を増大する機構も提案した。このデバイスは押しピン型の構造がシリコン膜に貼り付けられており、面積の広い側に超音波焦点を提示する。被験者実験を行い、超音波焦点を皮膚に提示するよりも知覚閾値が下がることを示した。このデバイスを並べることで触覚刺激の空間分布に向けたピンアレイデバイスのプロトタイプも開発した。

(2) 詳細

成果 1: 指先に力と振動を提示するプロトタイプの開発

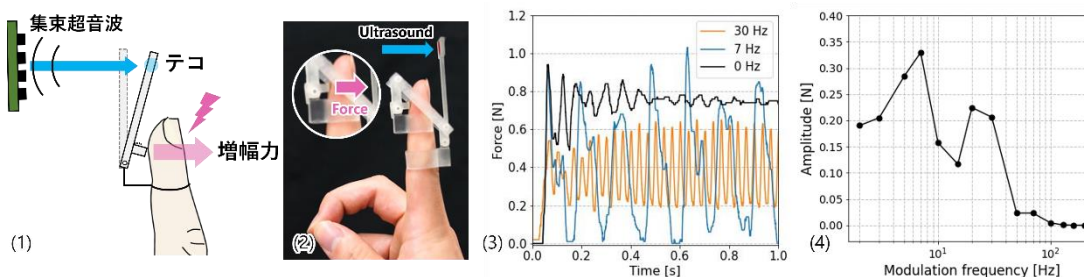


図 1: 1) テコ増幅デバイスのコンセプト図、2) 指先に 0.7 N の力と 2-30 Hz の振動を提示するパッシブ触覚デバイス、3) 実測波形、4) 周波数特性

成果 1 では、まず提案のプロトタイプとして、指先に装着するパッシブ触覚デバイスを開発した。コンセプト図と開発したデバイスを図 1 の(1)-(2)に示す。このデバイスは Four-bar 構造を用いており、入力放射力を 35 倍に増幅し、0.7 N の力を指腹に提示する。また、入力放射圧を変調することで、1-30 Hz の低周波振動を 0.1 N 以上の振幅で提示できる。このデバイスについて物理評価、モデル化、心理物理評価、デモを行ったため以下にそれぞれ説明する。

まず、物理評価とモデル化について説明する。まず、このデバイスは均質な棒の 4 節リンクとしてモデル化した。また、皮膚との接触部はばねとしてモデル化した。このモデルを用いて増幅率を計算すると 35 倍であった。実際の測定結果も 0.02 N の放射力に対して 0.7 N であり、

理論値と一致することを確認した。また、このモデルを用いて振動特性も計算し、また負荷部にひと肌ゲルを配置することで、実際に指に提示される振動も測定した。図 2 に測定

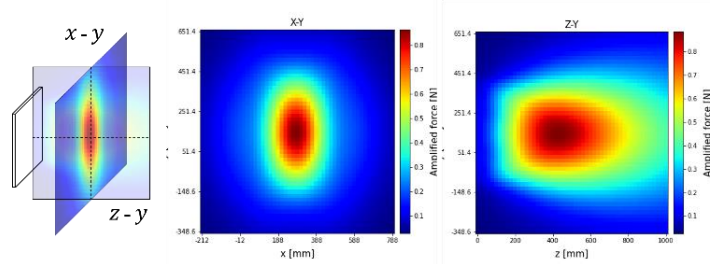


図 2: シミュレーションによるワークスペースの評価。

示す。この結果より、このデバイスが 1-30 Hz の振動を皮膚に対し、0.1N 以上の振幅でもって提示できることが明らかになった。また、デバイスのワークスペースのシミュレーションも行い、この出力は超音波音源(フェーズドアレイ)から 1 m 離れた場合でも 30%を維持することを確認した。

次に、このデバイスを用いて行った知覚強度の評価とデモについて説明する。このデバイスによって提示された増幅力の知覚閾値を階段法で評価した。この結果より、超音波フェーズドアレイの出力を-7.7 dB まで絞った場合でもユーザがその刺激を感じられることが分かった。また、このデバイスを用いて国際会議 SIGGRAPH ASIA 2022 の Emerging Technology, 及び Asiahaptics 2022 において弾力のある弾性体の触感を再現するデモを 100 人以上に対して行い、高い評価を得た。このうち Asiahaptics では Honorable Mention Award を受賞した。

本成果は前述の様に国内、国際会議発表と特許出願を行った。またこの成果は触覚分野のトップ誌である IEEE Transactions on Haptics に採録された。

成果 2: 機械-熱刺激を同時提示できるパッシブ触覚デバイス

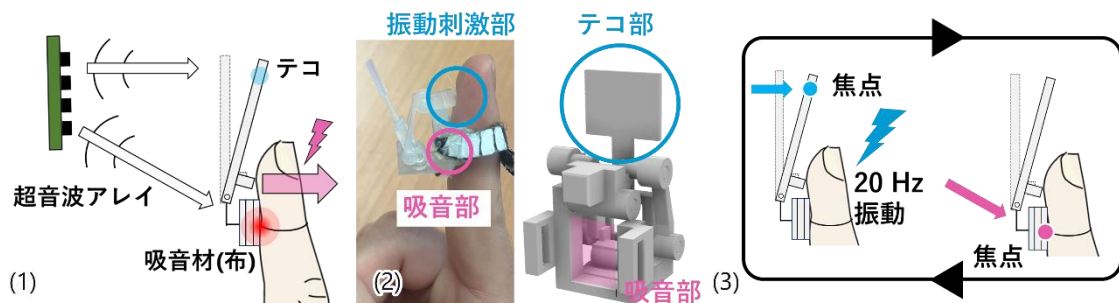


図 3: 1) 熱-機械刺激を提示するパッシブデバイスの概念図、2) 指先に 3.49°C/s の熱刺激と振動を同時に提示できるデバイス、3) 熱-振動の同時提示のための時分割駆動法。

成果 2 では、吸音構造を触覚デバイスに設け、全成果までで行ってきた力と振動の提示に加え、熱感も提示できるパッシブデバイスを開発した。図 3-(1), (2)に開発したデバイスまた、音響パワーを時分割提示するアルゴリズムを提案し、超音波フェーズドアレイを増設することなく、十分な強度をもって振動と熱感を同時提示できることを実験とシミュレーションを通して確認した。以下、提案したアルゴリズムの詳細と評価結果について紹介する。

図 3-(3)に熱と機械刺激(振動と力)を同時提示するために提案した時分割法の概念図を示す。2 つの焦点を熱提示部と力点にそれぞれ生成すれば熱と機械刺激を同時に提示できるが、この方法では、それぞれに用いる音響パワー(提示力)は半分になってしまう。この問題を解

決するため、単一焦点を熱提示部と力点に交互に打ち分ける時分割法を提案した。この方法では、熱刺激を同時提示した場合でも、(その duty 比が 0.5 であれば)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。また、強い振動触覚を提示する場合にはその瞬時値だけを高くとればよいので、知覚が十分強い範囲でその duty 比を変化させより強力な熱刺激を提示することもできる。

実験では、この焦点移動の駆動波形の duty 比を変化させた場合に提示できる熱刺激を実測した。また、その際に提示できる振動振幅についても成果 1 で構築したモデルを用いて求めた。図 4 に、20 Hz の矩形焦点移動を、その duty 比を 0.5 から 0.9 まで変化させた場合の熱提示部における温度変化を示す。また、その際に得られた周波数特性(振動振幅)も図 4 に示す。これらの結果より、音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。本成果は国際会議 IEEE Haptics Symposium 2024 で発表しており、また特許出願も行った。

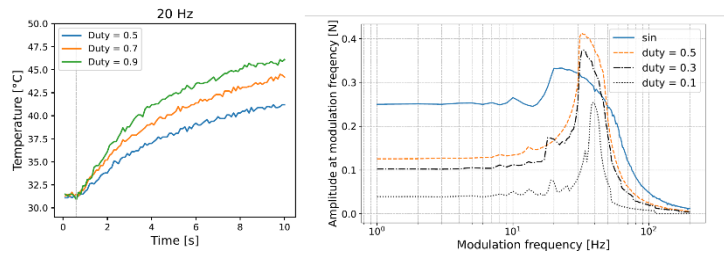


図 4: duty 比を変化させた場合の温度上昇の変化とその際の振動特性のシミュレーション結果。

成果 3: 押しピン構造を用いた放射圧増幅機構による単純パッシブ触覚デバイス

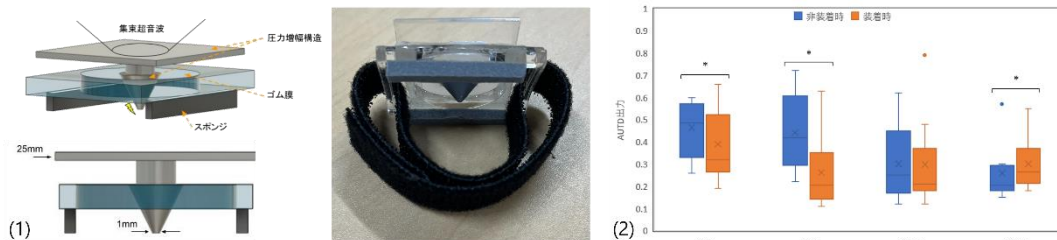


図 5: 1) 押しピン構造を用いたパッシブデバイス、2) 知覚閾値の評価結果。

成果 3 ではより単純で小型化な構造として、押しピン構造で皮膚の刺激面積を小さくとり、提示圧力を増大する機構も提案した。被験者実験でより強い刺激が提示できることを確認し、さらにこれまでのテコ機構と組み合わせたバッテリーレスなピンアレイデバイス開発につなげた。

図 5-(1)に開発した指輪型圧力増幅デバイスを示す。このデバイスは押しピン型の構造がシリコン膜に貼り付けられており、面積の広い側に超音波焦点を提示する。この入力圧力は面積比(数十倍)に増幅して皮膚に提示される。

実験では、この構造を用いて指輪型触覚デバイスを開発し、超音波刺激に比べ知覚強度が増幅できるか階段法を用いて調べた。図 5-(2)に階段法で評価した知覚閾値を示す。この結果より、200 Hz 以外のすべての場合でこの押しピン構造が強い触覚を提示できることが明らかになった。現在はこの押しピン構造をもとに、増幅力を 2 次元的に提示できる 3×3 の指先装着型ピンアレイ状デバイスの開発を行っている。この成果は国内会議で発表した。

3. 今後の展開

今後は、これまで開発してきたパッシブアクチュエータの柔軟化とその応用展開を考えている。応用例としては、まず付け心地の良いパッシブ触覚デバイスとして発展させることを考えている。これに加え、より大きくかつ社会的インパクトのある研究として、完全可食アクチュエータとしての発展を考えている。

4. 自己評価

新しい原理のパッシブ触覚デバイスを提案し、具体的なデモが可能なデバイスを実現させたことは高く評価できると考えている。バッテリーレスな触覚デバイスはこれまでに多く提案されていたが、そのすべてが抱えていた問題を解決し、最高性能(高出力、高応答性、軽量、高ワークスペース)のものを作ることができ、学術的には高いインパクトを与えることができたと自負している。国内、国外と多くの場所で発表したが、いずれでも高く評価された。実際に 100 人以上にデモを行い、理論、データだけでなく、そのデバイスの効果を多くの人が実感できることを示した。また、その成果は分野トップ誌である IEEE Transactions on Haptics に採録されている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1件

1. Tao Morisaki, Takaaki Kamigaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, “UltLever: Ultrasound-Driven Passive Haptic Actuator Based on Amplifying Radiation Force Using a Simple Lever Mechanism”, IEEE Transaction on Haptics, Early Access, 2024.
Four-bar 構造を用いて、入力放射力を増幅し、力と振動を指腹に提示する提示するパッシブ触覚デバイスを開発した。このデバイスはバッテリーや電子部品を内蔵しておらず、軽量かつ小型に作ることができる。また、同刺激を耳たぶに提示するイヤリング型デバイスも開発した。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, “Ultrasound-Driven Passive Haptic Actuator based on Amplifying Radiation Force using Simple Lever Mechanism”, SIGGRAPH ASIA 2022, Emerging Technologies.
2. Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, “Ultrasound-Driven Fingertip-Mounted Passive Haptic Device Using a Simple Lever Mechanism,” AsiaHaptics 2022, pp 1-2, Nov. 12, Tokyo, Japan.
3. Tao Morisaki, Takaaki Kamigaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda,

“Airborne Ultrasound-Driven Passive Haptic Device Presenting Low-Frequency Vibration and Static Force,” IEEE World Haptics 2023, WIP.E1.8 (Work-in-Progress papers), July 10–13, 2023, Delft, the Netherlands.

4. Tao Morisaki, “Preliminary Evaluation of Ultrasound-Driven Thermal-Mechanical Passive Haptic Display Using Acoustic Material and Lever Mechanism”, IEEE Haptics Symposium 2024.
5. 森崎汰雄, 藤原 正浩, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “テコ機構を用いた放射力増幅に基づく超音波駆動のパッシブ触覚デバイス,” 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 3B2-4, 札幌市立大学 芸術の森キャンパス, 北海道, Sept. 12–14, 2022.
6. 関口葵葉, 荒川岳斗, 森崎汰雄, 神垣貴晶, 牧野泰才, 篠田裕之, “圧力増幅構造を用いた空中超音波による振動触覚提示”, 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2A2-08, 東京, Sep., 2023.
7. 森崎汰雄, “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,” 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2A2-08, 東京, Sep., 2023.
8. (受賞) Honorable Mention of AsiaHaptics 2022 Tokyo Satellite Best Demonstration Award. (Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda).