



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

森崎汰雄¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才²⁾, 篠田裕之

Tao MORISAKI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, morisaki@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 触覚提示は駆動誘導など様々な用途があり、より軽量で装着負担の低い触覚デバイスが求められる。本研究では、空中超音波で駆動するパッシブ触覚デバイスを開発する。超音波焦点から生じる音響放射力を単純なテコ機構で増幅することで、強力な触覚を指先に提示する。このデバイスはパッシブなため軽量であり、複数台同時に使う場合でも複雑な配線は必要ない。実験では提示刺激の物理強度を評価する。

キーワード: パッシブ触覚デバイス, 空中超音波, テコ機構

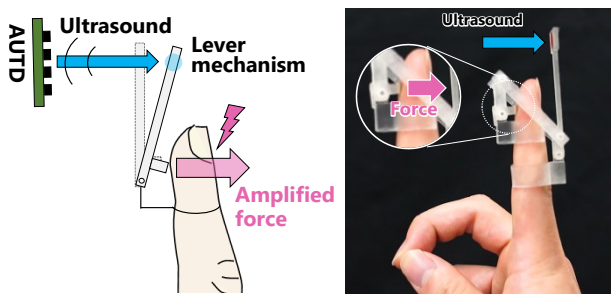


図 1: L) 超音波駆動パッシブ触覚デバイスのコンセプト。R) 指先装着型パッシブ触覚デバイス。テコ部先端に提示された超音波放射力が増幅され、指腹に提示される。

1. 緒言

触覚は有望なモダリティであり、人間の行動誘導 [1] や VR 空間における没入感の向上など多くの用途で利用されている。触覚刺激を提示するためには機械的なデバイスに触れる必要があり、ユーザーの日常的な動きが制限されてしまう。このためユーザーの動きを制限しない、負担の少ない触覚ディスプレイが求められている。

ユーザ負担の低い触覚ディスプレイとして、空中超音波触覚ディスプレイ (Airborne Ultrasound Tactile Display: AUTD) が提案されている [2, 3]。AUTD は独立制御可能な超音波振動子をアレイ状に配置したデバイスである。AUTD を用いて超音波を集束させることで、音響放射力という非接触の力を発生させ、人間の皮膚に触覚刺激を遠隔に提示できる。

しかし、その提示力の弱さから、AUTD で提示できる触感やその提示可能距離は限られている。超音波の放射力は数十 mN と弱いため、AUTD では強い触覚 (例: 硬いものに触れたときの反力、身体を強く押された感覚) は提示できない。また、遠距離の触覚提示も AUTD では困難であ

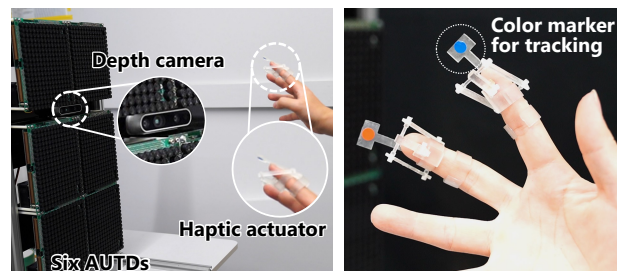


図 2: パッシブ触覚デバイスとその駆動システム。テコ部の先端のカラーマーカ位置を測定、超音波焦点を提示する。

る。AUTD から離れた位置に超音波を集束させた場合、音圧が減衰するだけでなく焦点ブラーも発生するため、もともとの提示力が弱い超音波刺激を知覚することは難しくなる [3, 4]。実用的な提示距離は、AUTD の開口サイズと同程度である。

そこで本研究では、ワークスペースの広い強力触覚提示をユーザ負担が低いままに実現するため、単純-軽量なパッシブテコ機構を用いて超音波の放射力を増幅することを提案する。図 1 に示すように、この増幅器はすなわち、空中超音波で遠隔駆動するパッシブ触覚デバイスである。また、開発した軽量パッシブ触覚デバイス (6.2 g) が指先に 0.39 N と強力な触覚を提示できること、その提示速度が 46 ms 以内と高速であることも実験的に示す。提案デバイスでは放射力を増幅して提示するため、AUTD 単体よりもワークスペースは広い。このデバイスは軽量でバッテリーとの配線も必要ないため、装着時の負担も少ない。例えば、図 2-R のように複数アクチュエータを同時装着時でも複雑な配線は必要ない。

本研究でテコ機構を採用した理由は、その速度と力を変換するという特性が超音波の放射力増幅に適しているため

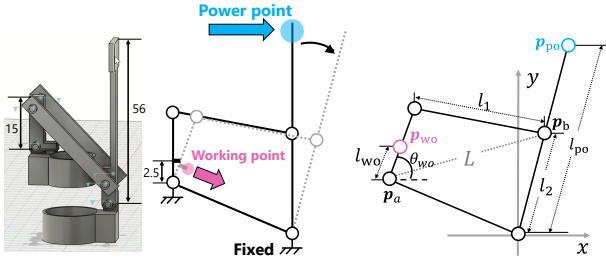


図 3: L) パッシブ触覚デバイスの 3D データと模式図。R) デバイス動作の定式化。

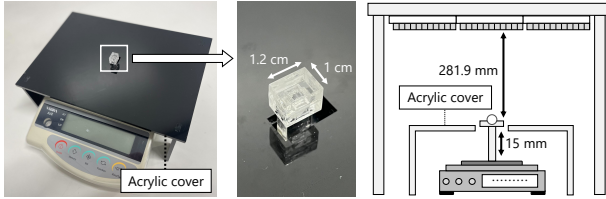


図 4: 放射力測定のセットアップ。

である。超音波の放射力は対象に対して音速で提示されるため、軽量なテコであれば高速で回転させることができる。そのため、テコの増幅率が高い場合でもなお、増幅力は触覚提示に十分な速度で提示される。例えば、超音波が音速の半分である 170 m/s でレバーの力点を回転できた場合、その増幅率が 20 倍であっても、増幅された力の提示速度は $170 / 20 = 8.5$ m/s と高速である。

実験では、指先装着型のパッシブ触覚デバイスを開発し、提示できる増幅力とその提示速度を測定した。また、入力の放射力と比較しその増幅率も調べ、設計値と比較・評価した。提示触覚の知覚強度についてもデモを通じて予備的に評価した。また、本デバイスの応用先として、イヤリング型パッシブ触覚デバイスを開発し、その有効性についても議論した。

これまでも磁気やレーザーを駆動源としたパッシブアクチュエータが提案されているが [5, 6]、本提案のように、高速な応答性 (45 ms) と広いワークスペースを両立した例はない。Lu らは磁力を用いたパッシブ触覚デバイスを開発したが、そのワークスペースは内径が 115 mm の円筒形電磁石の内部に限られる [5]。平木らはレーザーで遠隔駆動できる液相-気相変化アクチュエータを開発したが、その駆動には 3 秒以上が必要である [6]。

2. 指先装着型パッシブ触覚デバイス

2.1 デバイスと駆動システム

図 1-R にテコクランク構造を用いて開発した指先装着型パッシブ触覚デバイスを、図 2-L にその 3 次元 CAD データと概略図を示す。テコ部の先端に超音波を提示することで、指腹に増幅された力が提示される。増幅率の設計値は 20 倍 (次章で定式化) であり、固定点から力点までの距離は 56 mm、作用点までの距離は 2.5 mm とした。このデバイスは光造形 3D プリンター (Formlabs Form 3+) を用いて

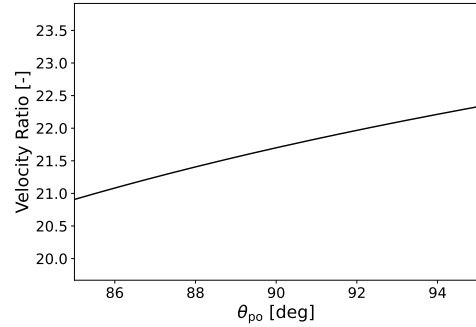


図 5: パッシブ触覚デバイスにおける増幅率の理論計算。

製作しており、その材料にはヤング率が 2.77 GPa の樹脂 (Formlabs クリアレジジン V4) を用いた。また、その重量は 6.2 g である。

図 2-L にデバイスの駆動システムを示す。このシステムは 6 台の AUTD、テコの先端をセンシングするためのデプスカメラ (Intel Realsense D435) で構成される。一つの AUTD には 249 個の超音波振動子が配置され、それらは 40 kHz で駆動される。各 AUTD は EtherCat で通信し、同期的に制御される [7, 8]。

この駆動システムは、テコの先端に貼ったカラーマーカの三次元位置を計測し、そのマーカ位置に超音波焦点を提示する。図 2-R にデバイスに貼ったカラーマーカを示す。焦点位置は 60 fps で更新される。

2.2 動作の定式化

本章では、開発したパッシブ触覚デバイスの動作を定式化し増幅率を計算する。図 3-R に定式化のための模式図を示す。この図における作用点の軸周りの位置 $\mathbf{p}_{wo} \in \mathbb{R}^2$ と力点の位置 $\mathbf{p}_{po} \in \mathbb{R}^2$ の移動速度の比が増幅率となる。まず、 $\mathbf{p}_{po} = (x_{po}, y_{po})$ が与えられた時の \mathbf{p}_b は以下である。

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

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

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_{po} 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。

本論文では、この式を持ちてまず \mathbf{p}_{po} を変化させたときの \mathbf{p}_{wo} の変化を算出し、その計算結果を数値微分することで速度比 (増幅率) を算出した。図 5 に計算した増幅率を示す。この結果より、 θ_{po} が 90 度の場合にはその増幅率は 21.7 倍であった。

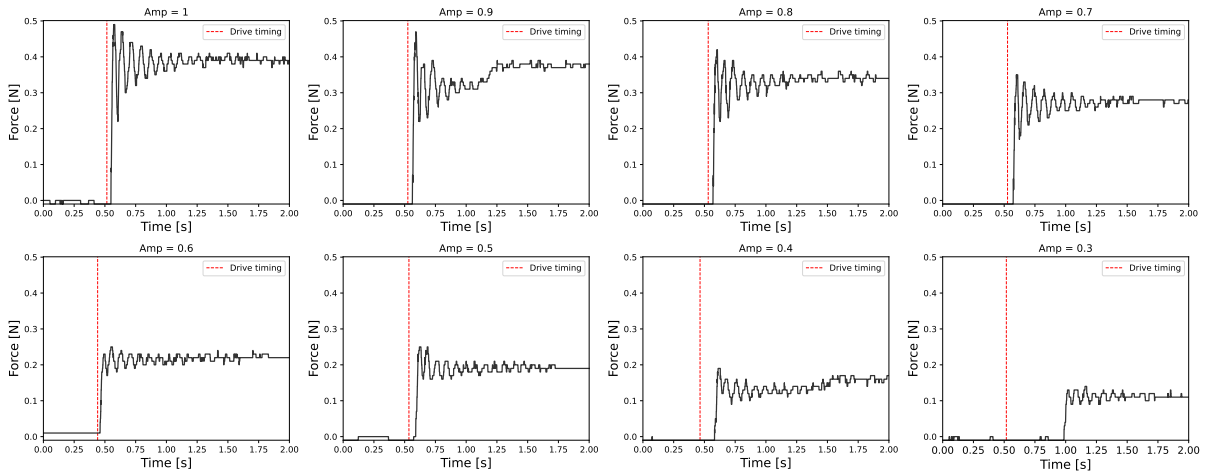


図 6: 実測した増幅力の時間変化。赤い点線で超音波を照射した。超音波の振幅 (Amp で表記) は 0-1 で変化させ、0.2, 0.1 の場合は駆動不可能 (増幅力 0) であったため省略。

3. 評価実験

開発したパッシブ触覚デバイスが提示できる増幅力を測定する。入力された放射力も測定し増幅率を計算する。

3.1 実験手順

実験には図 2 と同様に 6 台の AUTD を用いた。左下の振動子を原点とする。パッシブ触覚デバイスはその先端の位置が (161.7, 354.2, 281.9) mm となるように配置した。テコの先端にはカラーマーカを貼り、その位置に対して超音波焦点が提示される。作用点にはフォースゲージ (IMADA ZTS-50N) を押し当てておき、超音波照射時に得られる増幅力を測定する。フォースゲージと作用点の間は数ミリ間隔をあけた。超音波の振幅は 0 から 1 (最大振幅) まで 0.1 刻みで変化させた。

超音波振幅の変化に対する提示放射力の変化も調べた。図 4 に放射力測定の設定アップを示す。この測定では 6 台の AUTD を下向きに配置した。テコの先端部と同じサイズの亚克力板を電子天秤の上に配置し、その亚克力板だけが受けている力を測定した。サイドローブや亚克力板より外の分布は、上から亚克力のカバーを被せることで除去した。焦点位置は増幅力の測定実験と同様であり、(161.7, 354.2, 281.9) mm に提示された。

3.2 実験結果

測定した増幅力の時間変化を図 6 に示す。赤い点線は超音波の入力タイミングを示す。振動子振幅と放射力の変化を図 7 に、放射力と増幅力の変化を図 8-L に示す。図 8-L における放射力は、測定した放射力の時間変化全体の中央値を採用した。入力放射力が 0.02 N (振幅 1) の時、その提示力は 0.39 N であった。入力放射力 0.005 N (振幅 0.3) では増幅力は 0.11 N であった。放射力 0.0023 N (振幅 0.2) 以下では触覚デバイスを駆動できず、増幅力は 0 であった。

増幅率を求めるため、図 8-L に示した増幅力 F_{out} と入力放射力 F_{in} に対し、最小二乗法を用いて以下のモデルで線

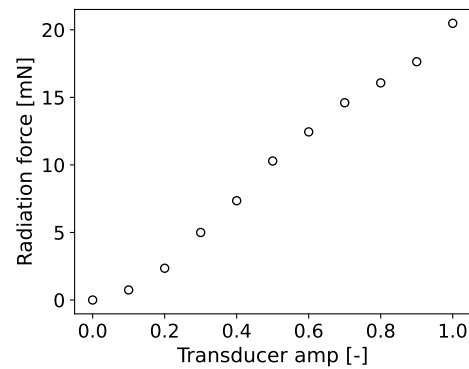


図 7: 振動子の振幅に対する放射力の変化。

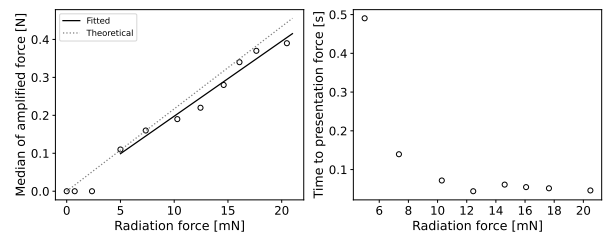


図 8: L) 入力放射力に対する増幅力 (の中央値) の変化。増幅率に相当する回帰直線の傾きは 19.4。R) 入力に対する触覚デバイスの駆動時間 (出力が全体の中央値に達するまでの時間) の変化。

形回帰を行った。

$$F_{out} = RF_{in} \tag{5}$$

回帰結果より、増幅率に相当する傾き R は 19.8 であった。 $F_{in} = 0$ では $F_{out} = 0$ のため回帰直線の切片は 0 とした。

図 8-R に、触覚デバイスの駆動時間と入力放射力の関係を示す。ここで、駆動時間の定義は、図 6 に赤線で示した駆動タイミングから増幅力が初めて全体の中央値に到達する

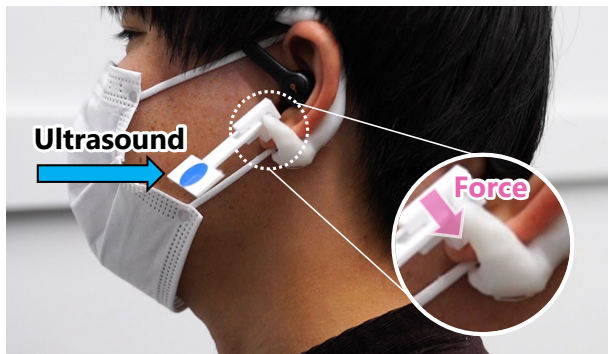


図 9: イヤリング型のパッシブ触覚デバイス。耳たぶに触覚刺激が提示される。

までの時間とした。入力放射力が 0.02 N(振幅 1) の時、その駆動時間は 0.046 s であった。入力がデバイスを駆動できる範囲で最も低い 0.005 N(振幅 0.3) の場合、その駆動時間は 0.49 s であった。

3.3 議論

実験結果より、本論文で開発したパッシブ触覚デバイスの増幅率は 19.8 とほぼ理論値(設計値)と等しく、デバイスが設計通り動作していることが確認された。また、本セットアップでは最大 0.39 N(39 g) の力を 46 ms と高速に提示できることもわかった。これは強力な触覚を提示するのに十分であるといえる。

著者らの主観では、本パッシブ触覚デバイスが提示できる触覚は強く、指を強く押し動かされるような感覚を知覚できた。駆動速度も十分高速であり、刺激を感じるまでにほとんど遅延は感じられなかった。20 人の被験者が本デバイスのデモを体験したが、全員が例外なく、強い力覚を遅延なく知覚できた。

今後は本デバイスが提示できる触覚刺激の知覚強度を定量評価する。また、フェーズドアレイとデバイスとの距離、および角度も変化させ、その際の知覚強度、物理強度の変化についても評価する。

4. アクセサリー型触覚デバイスへの応用

本パッシブ触覚デバイスの応用として、アクセサリー型触覚デバイスが考えられる。アクセサリーは普段身に着けるものであるため、提案したパッシブ構造を用いて、その軽量を維持したまま触覚提示機能を内蔵できれば、ユーザ負担の低い触覚デバイスが実現できる。

図 9 にイヤリング型触覚デバイスのプロトタイプを示す。テコ部に超音波を照射することで、耳たぶに触覚刺激を提示できる。今後はこのデバイスの物理/心理物理的評価を行い、アクセサリー型触覚デバイスの実現可能性を探索する。

5. 結言

本論文では、空中超音波で駆動するパッシブ触覚デバイスを提案し、その性能を物理的に評価した。開発した指先装着型の触覚デバイスでは、超音波の放射力をテコクランク構

造で増幅することにより、ユーザの指腹に触覚刺激を提示する。実験結果より、開発したデバイスは最大 0.39 N(39 g) の力を 46 ms 以内に提示できることが示された。また、その入力放射力に対する増幅率は 19.8 倍であり、理論値(設計値)と一致していることも確認できた。

これらの結果より、超音波の放射力をテコ機構で増幅することで、強力な触覚刺激を提示できる器量パッシブ触覚デバイスを実現できることが示された。今後は提案デバイスのワークスペースや提示刺激の知覚強度と触感について評価する。

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] A. J. Spiers and A. M. Dollar, "Design and evaluation of shape-changing haptic interfaces for pedestrian navigation assistance," *IEEE transactions on haptics*, vol. 10, no. 1, pp. 17–28, 2016.
- [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. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, "Ultrahaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces," in *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*. ACM, 2013, pp. 505–514.
- [4] K. Hasegawa and H. Shinoda, "Aerial vibrotactile display based on multiunit ultrasound phased array," *IEEE transactions on haptics*, vol. 11, no. 3, pp. 367–377, 2018.
- [5] X. Lu, Y. Yan, B. Qi, H. Qian, J. Sun, and A. Quigley, "Contactless haptic display through magnetic field control," *IEEE Transactions on Haptics*, 2022.
- [6] T. Hiraki, K. Nakahara, K. Narumi, R. Niiyama, N. Kida, N. Takamura, H. Okamoto, and Y. Kawahara, "Laser pouch motors: Selective and wireless activation of soft actuators by laser-powered liquid-to-gas phase change," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 4180–4187, 2020.
- [7] S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda, "Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display," in *International AsiaHaptics conference*. Springer, 2016, pp. 99–103.
- [8] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, "Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display," *IEEE Transactions on Haptics*, 2021.