

機械振動刺激を用いた指先の電気刺激に対する不快感軽減

Reduction of Discomfort in Electrical Stimulation of the Fingertips Using Mechanical Vibration Stimulation

○学 小野田 響 (電通大) 溝口 泉 (電通大)
梶本 裕之 (電通大)

Hibiki ONODA, The University of Electro-Communications, onoda@kaji-lab.jp
Izumi MIZOGUCHI, The University of Electro-Communications, mizoguchi@kaji-lab.jp
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

Electrical stimulation enables high-spatial-resolution tactile feedback but causes discomfort and pain when applied at sufficient intensity. Mechanical vibration stimulation is known to reduce pain and discomfort; however, its effect on electrically-induced pain perception has not been thoroughly verified. This study investigates whether simultaneous mechanical vibration can reduce the discomfort and pain associated with electrical stimulation applied to the fingertips. Participants underwent two conditions: electrical stimulation alone and combined electrical and vibration stimulation. Discomfort and perceived stimulus intensity were each rated on a Likert scale after every trial. Results showed that simultaneously presenting vibration with electrical stimulation significantly reduced discomfort compared to electrical stimulation alone. A similar trend was observed for perceived pain intensity, though the effect was less pronounced. These findings suggest that concurrent mechanical vibration can effectively alleviate discomfort caused by electrical tactile stimulation.

Key Words: Electrical stimulation, Tactile, Mechanical vibration

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ (VR) 環境において視聴覚刺激の提示だけでなく、他感覚刺激の提示も行うことで体験中のリアリティの向上が図られている [1], [2]. これは単一の感覚刺激に比べ、マルチモーダル刺激のほうが体験における没入感やリアリティの向上を可能にするからである. その中でも触覚刺激はスマートフォンやゲームコントローラーといったモバイルデバイスへの実装が比較的容易であり、盛んに研究がおこなわれている [3], [4].

触覚提示手法として広く用いられている代表例は振動刺激である [5]. 振動刺激は特定の周波数の物理的な振動を皮膚ないし筋肉や腱に伝え刺激を提示するもので、提示するための振動子の構造が比較的単純で設計の自由度が高く、低コストで実装可能という利点を有している. 一方で振動子は素子のサイズを小型化することが難しく、例えばハンドヘルド型のコントローラに採用した場合、振動子を通して掌に一樣の刺激を提示してしまい、局所的な刺激や時間変化を伴う刺激を提示するためには不十分であるという課題がある.

このような課題に対し、近年注目されているのが電気刺激である [6]. 電気刺激は電極からの電流によって直接神経を刺激することで触覚を提示する手法であり、刺激電極を細かく配置することで高い空間分解能を実現できる. 一方で高い強度の電気刺激を提示した場合、人間の痛覚閾値に達してしまうという欠点が存在する [7].

一方で振動刺激には痛みやそれに伴う不快感の軽減効果が確認されている [8]. このことから、電気刺激を提示する際に振動刺激も与えることで、電気刺激の課題を解決しようと考えられる. 実際に振動刺激と電気刺激を同時に提示することで電気刺激に伴う特有の感覚を低減できることがわかっている [9]. しかし、電気刺激による痛み知覚や不快感の軽減の有無に関しては検証が行われていない.

そこで本稿では、電気刺激に伴う痛覚刺激と不快感を振動刺激によって軽減可能かを調査する. あらかじめ決めた強度の電気刺激に対して、電気刺激装置の下に設置した振動子から振動刺激を同時に提示することで痛み知覚を軽減できるか調査した.

2. セットアップ

実験装置は制御用 PC、被験者に電気刺激・振動刺激を与えるための電気刺激装置・振動子、振動強度を測定するための加速度センサーで構成されている. 実験中のセットアップを図 Fig. 1 に示す.

電気刺激装置は電気刺激により、被験者に痛み刺激を提示する. 刺激電極は直径 1mm、電極中心間距離は 2.5mm であり、64 点から構成されている. Fig. 1 のように振動子の上に取り付けられており、パソコンから任意のタイミングで刺激を送ることができる.

電気刺激パターンは Fig. 1 の赤で囲まれた 2×2 の電極がほぼ同時に刺激される. 厳密には、一度に一つの電極のみが陽極として選択され、他の全電極が陰極となる. これを高速で切り替えることで刺激が提示される.

振動刺激はフルレンジオーディオスピーカを用いて被験者に振動刺激を提示する. 振動子は直径 50 mm, 25 W であり、Fig. 1 のように電気刺激装置の下に取り付けられており、パソコンから任意のタイミングで刺激を送り出すことができる.

振動の強度についてはあらかじめ指を載せない状態の振動板に加速度センサ (BMX055, Bosch) を貼付して計測することで校正した.

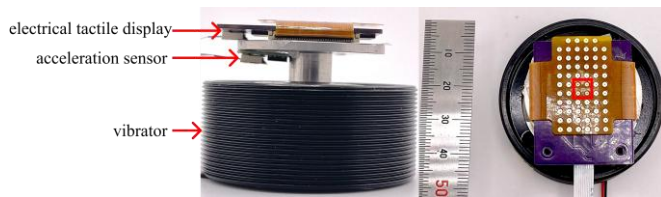


Fig. 1 (Left) side view and (right) Top view of the experimental setup.

3. 実験 1 : 方法

実験の目的は、電気刺激によって生じる痛覚刺激が振動刺激の影響を受けるかどうかの検証である。

22 歳から 24 歳までの被験者 11 名（女性 4 名、男性 7 名）が実験に参加した。本実験は、著者が所属する倫理審査委員会の了承を受けた。実験前に参加者は実験参加に同意を行った。

本実験では実際の条件に移る前にいくつかの作業が行われた。被験者は実験を開始する前にアルコールで指先を乾燥させるよう指示された。その後被験者は右手の人差し指を爪の付け根が電極の中央となる位置に置くように指示された。その後本実験で提示する刺激強度の基準決めが行われた。基準決めでは 2 秒周期で 1 秒間の電気刺激を提示した。この刺激は 0mA からスタートし、2 秒ごとに 0.1mA ずつ強度が上昇していく。また、この時振動刺激提示は行わなかった。被験者は自身が許容できる最大値になったタイミングを回答し、その値を本実験における基準とした。次に被験者はこの刺激強度に固定した状態で 2 秒に 1 回 1 秒間の刺激を計 5 回与えられた。この時与えられた刺激を後述する本実験の不快感に関するアンケートの基準とした。

実験条件は以下の 2 通りである。条件 1 は振動刺激を提示せず、電気刺激のみを提示する。条件 2 では振動刺激と電気刺激を同時に提示する。提示する振動周波数と強度は、予備検討の段階で複数条件で比較検討した結果有意な差が見られなかったため、実験条件中の中央値である 100Hz、0.5G を採用した。これら 2 つの条件を各 3 回、計 6 回ランダムな順序で割り当てた。以降これらの条件を順に nothing, vibration と呼称する。各条件では前述の基準刺激強度に電気刺激強度を固定した状態で、2 秒に 1 回 1 秒間の刺激を計 5 回与えた。

各条件で刺激提示後に以下の刺激に関するアンケートが行われた。すべて 7 段階リッカートスケールが用いられた。

Q1: 刺激の不快感 (1:不快ではない, 7:著しく不快)

Q2: 痛みの強さ (1:全く強くない, 7:著しく強い)

ただし、前述のとおり、刺激の不快感に関しては実試行の前に受けた刺激を回答値の 4 としたうえで各条件の数値を回答させるようにした。

4. 実験 1 : 結果

実験で収集したデータに対し条件間に違いがあるかどうか調べた。各条件における回答値はそれぞれ 3 回ずつ得られたため、それぞれの質問項目の中での中央値をその被験者における代表値とした。そのうえで各質問項目に対して、両側 Wilcoxon の符号順位検定を用いた。

Fig. 2 と Fig. 3 は条件ごとの回答値を質問項目ごとに示している。

刺激の不快感 (Q1) は nothing と vibration 間で有意差が見られた ($p < 0.05$)。したがって電気刺激と振動刺激を同時に提示することで電気刺激による不快感が低減されることが示唆された。

痛みの強さ (Q2) は nothing と vibration 間で有意差は見られなかったものの、有意傾向が見られた ($p < 0.1$)。したが

って電気刺激と振動刺激を同時に提示することで知覚される刺激強度を大幅に低減することはできないが、ある程度低減できる可能性が示唆された。

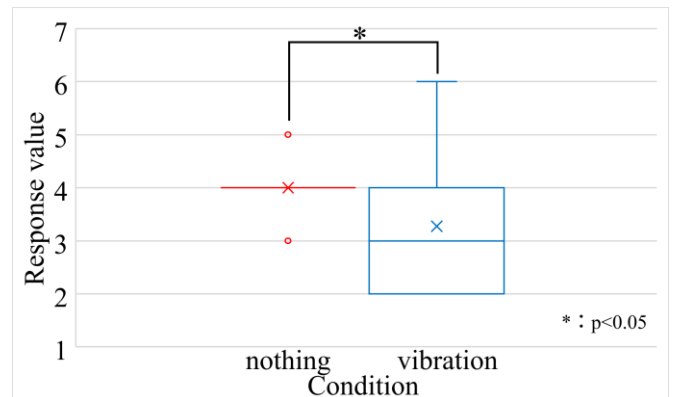


Fig. 2 Ratings of stimulus unpleasantness.

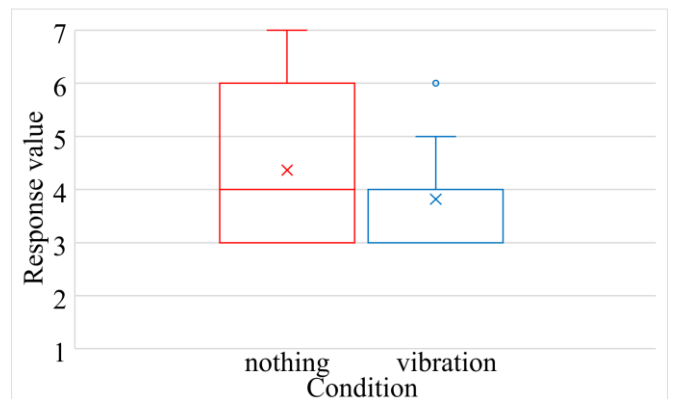


Fig. 3 Ratings of stimulus intensity.

5. 考察

実験の結果から電気刺激と振動刺激を同時に提示することで不快感が軽減される可能性が示唆された。6 人の被験者は条件 vibration のほうが条件 nothing に比べ、不快感が減ったと回答した。

一方で条件間で違いは分からなかったと回答する被験者も存在した。この要因として、以下の 2 つが考えられる。1 つ目は回数による慣れの問題である。被験者のコメントの中にも後半になるにつれ、提示刺激そのものに慣れてしまったというコメントが見られた。この状態になると、知覚される電気刺激の強度が低下してしまい、条件間の差が出にくくなった可能性がある。2 つ目は基準刺激に対する記憶の減衰の問題である。被験者の中には後半になるにつれて基準刺激強度を思い出すことが困難になったというコメントが見られた。これにより一部被験者は後半に提示された条件に関する回答精度が低下した可能性が考えられる。

6. 終わりに

電気刺激に伴う痛覚刺激と不快感を振動刺激によって軽減可能かを調査した。

実験では事前に刺激強度を定めたうえで、電気刺激のみを 5 回提示する条件 nothing と電気刺激と振動刺激を同時に提示する条件 vibration を各 3 回行った。結果として条件 nothing に比べ、条件 vibration は刺激に対する不快感の低下がみられた。一方で刺激強度に関しては優位傾向はみられたものの統計的に有意になるほどの低下は見られなかった。

参考文献

- [1] S. Asano, S. Okamoto, and Y. Yamada, "Vibrotactile Stimulation to Increase and Decrease Texture Roughness," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 45, no. 3, pp. 393–398, Jun. 2015.
- [2] R. F. Friesen and Y. Vardar, "Perceived Realism of Virtual Textures Rendered by a Vibrotactile Wearable Ring Display," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 17, no. 2, pp. 216–226, Apr. 2024.
- [3] H. Benko, C. Holz, M. Sinclair, and E. Ofek, "NormalTouch and TextureTouch: High-fidelity 3D Haptic Shape Rendering on Handheld Virtual Reality Controllers," in *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, in *UIST '16*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Oct. 2016, pp. 717–728.
- [4] I. Choi, E. Ofek, H. Benko, M. Sinclair, and C. Holz, "CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping, Touching, and Triggering in Virtual Reality," in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, in *CHI '18*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Apr. 2018, pp. 1–13.
- [5] E. Whitmire, H. Benko, C. Holz, E. Ofek, and M. Sinclair, "Haptic Revolver: Touch, Shear, Texture, and Shape Rendering on a Reconfigurable Virtual Reality Controller," in *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, in *CHI '18*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Apr. 2018, pp. 1–12.
- [6] L. R. Bobich, J. P. Warren, J. D. Sweeney, S. I. Helms Tillery, and M. Santello, "Spatial localization of electrotactile stimuli on the fingertip in humans," *Somatosensory & Motor Research*, vol. 24, no. 6, pp. 179–188, Jan. 2007.
- [7] C. N. Sang, M. B. Max, and R. H. Gracely, "Stability and Reliability of Detection Thresholds for Human A-Beta and A-Delta Sensory Afferents Determined by Cutaneous Electrical Stimulation," *Journal of Pain and Symptom Management*, vol. 25, no. 1, pp. 64–73, Jan. 2003.
- [8] R. Staud, M. E. Robinson, C. T. Goldman, and D. D. Price, "Attenuation of Experimental Pain by Vibro-Tactile Stimulation in Patients with Chronic Local or Widespread Musculoskeletal Pain," *European Journal of Pain*, vol. 15, no. 8, pp. 836–842, Sep. 2011.
- [9] S. Kuroki, H. Kajimoto, H. Nii, N. Kawakami, and S. Tachi, "Proposal for tactile sense presentation that combines electrical and mechanical stimulus," in *Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, in *WHC '07*. USA: IEEE Computer Society, Mar. 2007, pp. 121–126.