



# 機械刺激と電気刺激の組み合わせによる触覚提示の強調

水原遼<sup>1)</sup>, 高橋哲史<sup>2)</sup>, 梶本裕之<sup>2)</sup>

1) 電気通信大学 情報理工学部 (〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1, mizuhara@kaji-lab.jp)

2) 電気通信大学 大学院情報学専攻 (〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1, {a.takahashi,kajimoto}@kaji-lab.jp)

**概要:** 機械刺激による触覚提示は、実物体を肌に物理的に接触させるという原理ゆえ自然な触覚提示ができるが、一定以上の強い触覚を与える強度の機械刺激は肌に痕が残る等の問題を生じる可能性がある。対して電気刺激による触覚提示は感覚神経を直接刺激するため、皮膚を傷つけずに強い触覚提示が可能だが、実物体を触る体験に比べその自然さは減じる。そこで、電気刺激と機械刺激を組み合わせることで、自然さと強度を兼ね備えた触覚提示手法を提案する。

**キーワード:** 触覚, 電気刺激, 機械刺激

## 1. はじめに

近年, Virtual Reality (VR)がエンタテインメントの分野でも広く使われるようになってきている。エンタテインメント用の VR 環境において, オブジェクトとの接触時に自然な触覚をフィードバックすることは, 体験の没入感の向上という点で重要である。

触覚を提示する際には, 感覚の質[5][6], 刺激部位や空間的分布[7][8], 強度[1]の 3 つを少なくとも決定しなければならない。このうち強度に関しては, エンタテインメント応用の場面を考えると強く鋭い触覚, 例えば叩かれた・ぶつかった時のような触覚を提示する必要があるが, 指先や道具で叩く状況が多数研究されているのに対して受動的な叩かれている状況の提示の試みは少ない。その理由の一つは, そのような触覚が皮膚に痕を残す, ないし著しい場合には怪我につながる可能性があるためと考えられる。そこで, 本研究は自然かつ安全でより大きいインパルスの触覚を提示することを目的とする。

触覚を提示する手法は大別して皮膚の物理的変形によるものと神経活動を直接生じさせるものの二つに分けられる。前者の代表的なものは機械刺激である。機械刺激による触覚提示は実物体を肌に物理的に接触させるという原理ゆえに自然な触覚提示が実現されるが, 強い触覚提示のために刺激を強くする場合, 前述のように強度によっては肌に痕が残る等の問題を生じる可能性がある。

後者の代表例は電気刺激であり, 皮膚表面に電流を流すことにより知覚神経を刺激し触覚を提示する[9][10][11]。エンタテインメントへの応用としては, 衛藤らの指先への

触覚を提示するタッチディスプレイ[2]や, 片岡らの痛覚提示[12]が挙げられる。電気刺激による触覚提示は感覚神経を直接刺激するため, 皮膚を傷つけずに強い触覚提示が可能である。しかし実物体を触る体験に比べその自然さは減じる。実際前述のエンタテインメント応用の多くは, 電気的な感覚 (いわゆるビリビリ感) を直接利用していた。

このように, 機械刺激による手法と電気刺激による手法にはそれぞれ利点・欠点が存在する。そこで, 電気刺激と機械刺激を組み合わせ, 感覚の自然さを機械刺激によって, 強さを電気刺激によって確保することでこの問題の解決に取り組む。

今回我々は電気刺激と機械刺激を併せた触覚提示装置を開発し, 主観的強度が電気刺激によって強調できるかどうかの検証を行った。

## 2. 関連研究

機械刺激と電気刺激を併用した研究はいくつか行われている。Yem らは, DC モータの回転・振動及び陽極・陰極電気刺激を併用することにより指先に圧覚, 低周波振動覚, 高周波振動覚及び皮膚せん断変形覚を提示できる FinGAR を開発した[3]。FinGAR は各触覚受容器を効率よく刺激する刺激方法として四つの機械刺激及び電気刺激のパターンを採用し, 組み合わせることで様々な触感表現を試みた。Kuroki らは電気刺激とピンによる機械刺激を指に同時に提示し機械刺激による電気刺激の閾値の変化について検証を行った[4]。しかし, これらの研究において今回目的とする機械刺激による触覚強度の増強という点では議論されていない。

また, 機械刺激と電気刺激を用いたエンタテインメントの一例としては PainStation[1]が挙げられるが, 電気刺激及び

機械刺激は独立しており、個々に痛覚を提示している。

### 3. 実験装置

実験装置は、機械刺激を提示するためのギロチン型装置と電気刺激装置によって構成されている。機械刺激の装置を図 1 に示す。本装置はアルミフレームとアクリル板によって構成され、鉛直上向きに置かれた 2 つのフレームの溝に沿って厚さ 5mm のアクリル板が落ちることにより機械刺激を提示する。片方の溝にはアクリル板が一定の高さで止まるようにストッパーが付けられている。また、アクリル板には加速度センサが繋がれたマイクロコントローラ (ESP32-DevKitC, Espressif Systems) が取り付けられており、アクリル板と肌の衝突を検出し、電気刺激が同時に提示できるようになっている。

また、電気刺激を提示するための電気刺激キット[7]を図 2 に示す。このキットにはマイクロコントローラ (NXP Semiconductors, mbed NXP LPC1768)、高速 D/A 変換及び電圧電流変換回路が利用され、刺激電流の波形を制御することができる。電極は陰極側が縦 0.5cm、横 3cm の導電性ゲルに電線をとりつけたもの、陽極側は導電性粘着ゲル (日本光電社, ディスポ電極 F ビトロード) である。陰極を刺激電極として、陽極を不関電極として用いた。



図 1 開発した機械刺激装置

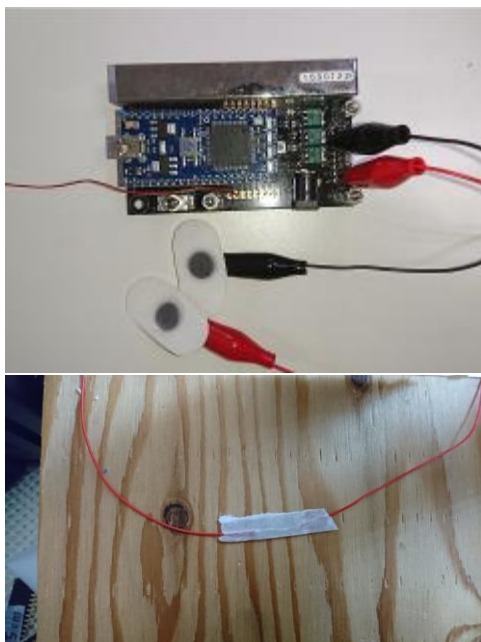


図 2(上)刺激キット(下)刺激電極

### 4. 実験

学内の男女 10 名 (うち男性 9 名) を対象に被験者実験を行った。年齢は 21~24 歳であった。

#### 4.1 実験準備

実験の様子を図 3 に示す。被験者に実験装置の前に椅子の上に乗らせ、手のひらを上にした状態で腕を木の台に置かせた。アクリル板が肘と手首の中間にあたるように腕の位置を決定した。アクリル板が当たる位置に目印をつけ、その上に刺激電極を設置し、そこから手首側へ 5cm 離れた場所に基準電極を設置した。その後、常に腕から 2cm の高さよりアクリル板が落ちるようにストッパーの位置を調整した。電気刺激と機械刺激をそれぞれ独立に提示し、それぞれの感覚を確認させた。

#### 4.2 実験手順

提案手法の有効性の検証のため、極限法により電気刺激と機械刺激の同時刺激により生起する触覚と大きさが釣り合う触覚を生起させる機械刺激の強度を求めた。以下、「基準刺激」を下記各実験条件での電気刺激と一定の機械刺激を同時に与える刺激、「比較刺激」を強度に変化をもたせた機械刺激のみの刺激とする。比較刺激の大きさの変更はアクリル板の重さを変えることにより行った。重さの変更には図 4 に示す錘をアクリル板に付けることにより行った。錘は 30g 刻みで 30g から 180g までの 6 つを用意した。アクリル板の重さは 133g であったので、錘によってアクリル板の重さは 133g から 313g まで変化した。

各試行において基準刺激を提示した後に比較刺激を提示した。その後、被験者にどちらの刺激が強かったかを強制二択によって回答させた。比較刺激は、錘をつけない状態から一定間隔で大きくする上昇系列と、基準刺激に対し十分に大きい強度から一定間隔で小さくする下降系列をこの順で行った。上昇系列で得られた閾値と下降系列で得られた閾値の平均を記録した。



図 3 実験環境



図 4 比較刺激強度を変えるための錘

実験条件は電気刺激の強度（電流パルスの高さ）を閾値の 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 倍とした 5 条件とした。それ以外の電気刺激に関するパラメータは同一で、パルス幅 200us、周波数 50Hz とした。一回の機械刺激に対して同時に提示したパルスは 5 つであり、電気刺激は 100ms 間提示された。各条件において、上昇系列と下降系列は各 1 回ずつ行った。実験条件の実施の順番はランダムとした。

## 5. 実験結果

今回の実験結果について、基準刺激における電気刺激の強度（被験者ごとの閾値を基準にした倍率で表現）を横軸、比較刺激の強度を変えていき基準刺激と釣り合う強度になった際にアクリル板に付けていた錘の重さ（以下、錘の重さと表現）を縦軸にしたグラフを作成した。図 5 は被験者全員の平均のグラフであり、エラーバーは標準偏差である。

平均値のみに注目したとき、増加傾向があるように見受けられるが、相関係数を求めた結果、その値は 0.2 であり、これら二つの量に相関があるとは現時点では言えなかった。

また、被験者ごとにみても、基準刺激における電気刺激の強度が上がるにつれて錘の重さが増加傾向にあったのは 3 人のみであった。

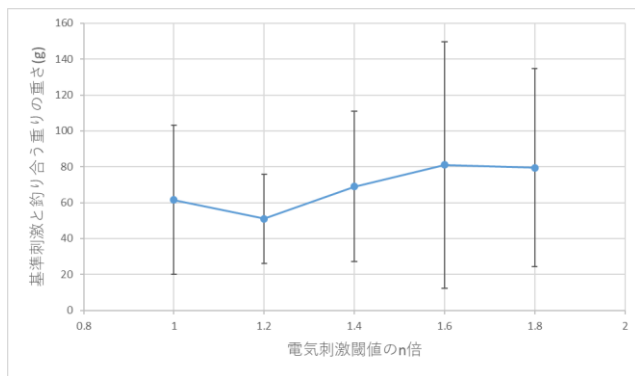


図 5 実験結果

## 6. 考察

今回の実験においては、被験者 10 人中 3 人が電気刺激強度の増加に伴い錘の重さが増加傾向にあった。しかしながら有意な結果を得ることはできなかった。

この理由として、実験の設定が不適切であった可能性が考えられ、問題点としては次の三つが挙げられる。

1. アクリル板の落とし方
2. 電気刺激に関するパラメータ

### 3. 機械刺激の強度変更の手法

以下にて各問題点の詳細を述べる。

#### 6.1 アクリル板の落とし方

今回の実験においては、アクリル板は実験者が板に繋がった糸を離すことにより落とされた。しかし、糸を離す際に力の抜き方がそろわず、結果的にアクリル板の落下速度にばらつきが生じていた可能性が考えられる。この問題を解決するためには、アクリル板を自動で落とす機構を用意する必要がある。

#### 6.2 電気刺激に関するパラメータ

今回の実験では電気刺激としてパルス幅 200us、周波 50Hz の波形を 5 周期分、アクリル板が肌に接触すると同時に提示した。被験者に実験の感想を聞いたところ、「(電気刺激が) 長すぎる」「電気刺激と機械刺激とがずれて感じられた」などの回答があった。そこで、電気刺激の波形や機械刺激とのタイミングを見直す必要があると考えられる。

#### 6.3 機械刺激の強度変更の手法

今回の実験では機械刺激の強度を変えるためにアクリル板に錘を付けた。

確かにこの方法によって機械刺激の強度を大きくすることができたが、錘をアクリル板に付けることによってアクリル板の重心が傾いてしまった。これが実験結果に影響を及ぼしたと考えられる。そこで重心が傾くことなく、かつ 6.1 で述べた自動化に向いている手法として、アクリル板の重さではなく落ちる高さを変えることによって機械刺激の強度を変える手法を検討する必要がある。

また、今回の実験設定では基準刺激よりも軽い比較刺激を用意しておらず、これが正しい閾値検討にならなかった原因の一つと考えられる。今後重さではなく高さ調節によって実験をする際にこの問題も同時に解決できる見込みである。

#### 6.4 今後の展望

今後は今回の実験をベースに、前述した 3 つの問題点を踏まえて修正を加え、電気刺激で機械刺激の強度を補強できるかも一度検証を行う。

同時に自然な触覚提示のために、機械刺激により電気刺激特有の痺れ感覚をマスキングできるかの検証も行う。

さらに、将来は痛覚を含めた強い感覚提示が可能な撃力提示ディスプレイなどに応用し、ゲームの緊張感を高める用途に用いるなど、コンテンツ開発を行っていく。

## 7. おわりに

機械刺激と電気刺激を同時に刺激することによって、自然さと強度を兼ね備えた触覚提示手法を提案し、その検証の予備的段階として電気刺激による機械刺激の強度の増強が可能かどうかを実験によって確かめた。今回の実験では有意な差としてそれを示すことができなかったが、問題点を改善した上でもう一度同様の実験を行っていく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP15H05923 の助成を受けた

ものです。

### 参考文献

- [1] Morawe, V., Reiff, T.: PainStation, [www.painstation.de/](http://www.painstation.de/), 2001
- [2] 衛藤春菜, 的場やすし, 佐藤俊樹, 福地健太郎, 小池英樹, 梶本裕之: 指先への電気刺激により触覚提示を行うタッチディスプレイ技術, インタラクション 2012, 2012
- [3] Yem, V., Okazaki, R., Kajimoto, H.: FinGAR: combination of electrical and mechanical stimulation for high-fidelity tactile presentation, Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, Article No. 7, 2016
- [4] Kuroki, S., Kajimoto, H., Nii, H., Kawakami, N., Tachi, S.: Proposal for tactile sense presentation that combines electrical and mechanical stimulus, 2nd Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems(WHC), 121-126, 2007
- [5] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A., Harrison, C.: TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces, Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology, 283-292, 2010
- [6] Minamizawa, K., Kakehi, Y., Nakatani, M., Mihara, S., Tachi, S.: TECHTILE toolkit: a prototyping tool for design and education of haptic media, Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference, Article No. 26, 2012
- [7] Kajimoto, H.: Electrotactile Display with Real-Time Impedance Feedback Using Pulse Width Modulation, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 5, No. 2, 184-188, 2012
- [8] Uematsu, H., Ogawa, D., Okazaki, R., Hachisu, T., Kajimoto, H.: HALUX: projection-based interactive skin for digital sports, Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies, Article No.10, 2016
- [9] Yem, V., Kajimoto, H.: Comparative evaluation of tactile sensation by electrical and mechanical stimulation. IEEE transactions on haptics, Vol. 10, No. 1, 130-134, 2017
- [10] Saunders, F. A.: Information transmission across the skin: high-resolution tactile sensory aids for the deaf and the blind. International journal of neuroscience, Vol. 19, No. 1-4, 21-28, 1983
- [11] Kaczmarek, K. A., Tyler, M. E., Bach-y-Rita, P.: Electrotactile haptic display on the fingertips: Preliminary results, Proceedings of the 16th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc, Vol. 2, 940-941, 1994
- [12] 片岡佑太, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: 複合現実型視覚提示が痛覚刺激の知覚に及ぼす影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, 275-283, 2014