



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 (第二報) : 感覚の質に関する評価

Enhancement of Subjective Mechanical Tactile Intensity via Electrical Stimulation(II): Evaluation of Sensation Quality

水原遼¹⁾, 高橋哲史¹⁾, 梶本裕之¹⁾

Ryo MIZUHARA, Akifumi TAKAHASHI and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 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, {mizuhara, a.takahashi,kajimoto}@kajilab.jp)

概要: 機械刺激による触覚提示は, 実物体が肌に接触するため自然な触覚提示ができるが, 一定以上の強度の刺激は肌に痕が残る可能性がある. 対して電気刺激による触覚提示は感覚神経の直接刺激により, 皮膚を傷つけずに強い感覚提示が可能だが, 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, 強度と自然さを両立した触覚提示手法を提案する. 本稿では刺激の増強と電気刺激特有のビリビリ感の防止の両立が可能か検証した.

キーワード: 触覚, 電気刺激, 機械刺激

1. はじめに

バーチャルリアリティ空間上で, 物体との接触時に適切な触覚フィードバックを付与することは体験の没入感を向上させるために重要である. また, エンタテインメントとしてVR体験を活用する場合, 物体を把持したり, 物体をなぞるといった感覚だけでなく, 斬られる, 叩かれるといった緊張感のあるシチュエーションに対しても適切な触覚を提示する必要がある. この際, 提示する触覚は緊張感を維持するために強度が大きく, かつ自然なものでなければならない. その一方で, 肌を傷つけない安全なものでなければ, エンタテインメントとして不適切である.

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 (例: 針などによる鋭利な刺激[1]).

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[2]-[4]. エンタテインメントへの応用としては, Matoba らの指先への触覚を提示するタッチディスプレイ[5]や, Kataoka らの痛覚提示[6]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感覚提示が

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・欠点が存在し, それら単体では所望の要件を満たす触覚を提示できない. 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.

我々は前報にて電気刺激を機械刺激に付与した際に触覚の主観的強度が増強することを確認した. 本報では提案手法の有効性検証の次の段階として, 電気刺激による機械刺激の主観的強度の増強と, 機械刺激による電気刺激特有のビリビリ感の防止の両立が可能か検証する.

2. 関連研究

機械刺激によって, 電気刺激の感覚に何らかの変化をもたらす研究はいくつか行われている. Yem らは振動刺激を用いて電気刺激による振動覚と圧覚のうち, 振動覚をマスキングすることを試みた[7]. 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[8]. 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・電気刺激のビリビリ感のマスキング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[9]が挙げられるが、電気刺激及び機械刺激は独立して痛覚を提示しており、二つの刺激は互いの感覚の質に影響を及ぼさない。

また、同じく電気を用いた触覚/力覚提示手法として、筋電気刺激 (EMS) があり[10][11], Lopes らはソレノイドによる機械刺激を提示するとともに EMS によって腕を後ろに倒すことによって大きな衝撃を再現している[12]. この研究では電気刺激は筋肉を刺激することを目的にしている。

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。

3.1 機械刺激装置

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木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 3mm の木板が落ちることにより機械刺激を提示する。また、アルミフレームにはフォトリフレクタが 2 つ取り付けられており、木板の落下速度を検出し、電気刺激が機械刺激の提示タイミングと同時に提示できるようになっている。

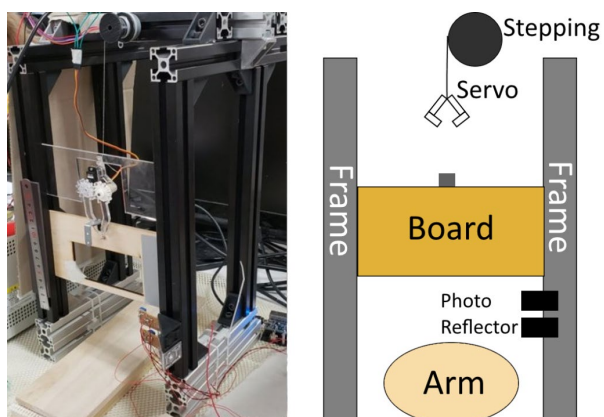


図 1 開発した機械刺激装置

3.2 電気刺激装置

電気刺激を提示するための電気刺激キット[13]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 (図 3) 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取りつけたもの、陽極側は導電性粘着ゲル (日本光電社, ディスポ電極 F ビットロード) である。

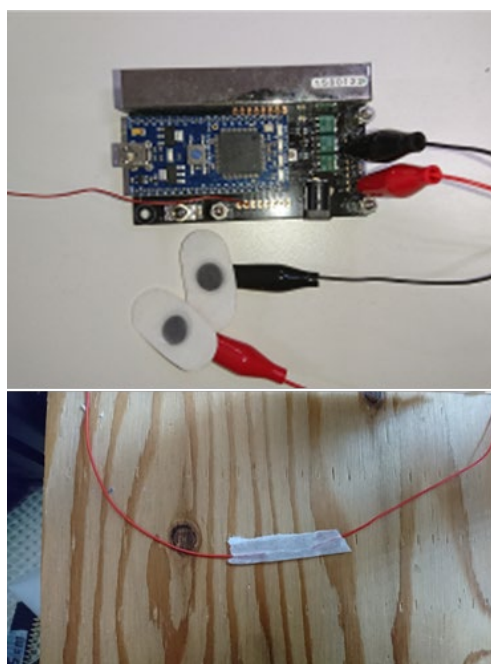


図 2 (上) 刺激キット (下) 刺激電極

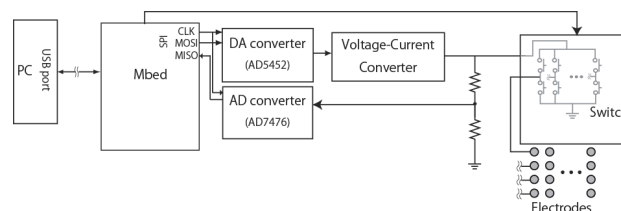


図 3 電気刺激装置の回路

4. 実験

4.1

機械刺激と電気刺激の同時刺激によって、触覚の主観的強度の増強と電気刺激特有のビリビリ感 (以下、電気刺激感) のマスキングが同時に達成できるか検証を行った。

4.1.1 実験手順

実験の様子を図 4 に示す。被験者に実験装置の前に椅子の上に座らせ、手のひらを上にした状態で腕を木の台に置かせた。木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。木板が当たる位置に目印をつけ、その上に陰極を設置し、そこから手首側へ 5cm 離れた場所に陽極を設置した。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。

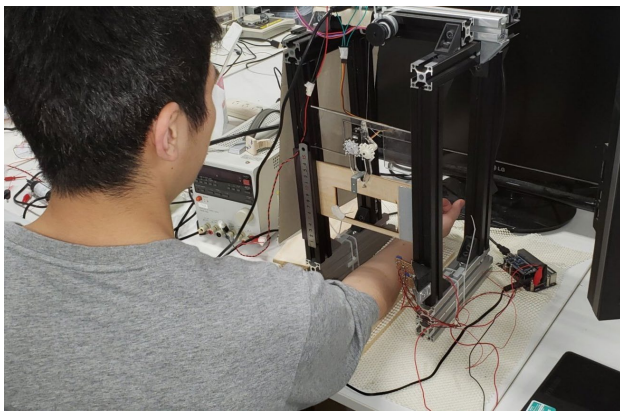


図 4 実験環境

その後、基準刺激と比較刺激を提示し、比較刺激について以下の2点を回答させた。

1. 基準刺激の主観的強度を10としたときの主観的強度（マグニチュード推定法）
2. 電気刺激感（7段階リッカートスケール、1：全く電気刺激でない、7：電気刺激そのもの）

基準刺激は4cmからの機械刺激とし、比較刺激として以下の4つを用意した。各刺激の順序はラテン格子によって決め、それぞれを一回ずつ提示した。

1. 高さ4cmからの機械刺激（基準刺激と同一）
2. 高さ6cmからの機械刺激
3. 電気刺激
4. 高さ4cmからの機械刺激+電気刺激

今回電気刺激は10mAの強度で、500usの矩形波を機械刺激と同タイミングで一回提示した。被験者は12人（男性12人）で、年齢は21~25歳であった。

5. 実験結果

以下に実験結果を示す。各結果はFriedman検定とHolmの多重比較により統計処理を行った。結果の図中におけるM4は高さ4cmからの機械刺激、M6は高さ6cmからの機械刺激、Eは電気刺激、M4+Eは高さ4cmからの機械刺激+電気刺激を示す。

5.1 各刺激条件における主観的強度

図5に各刺激条件における主観的強度を示す。各条件における中央値はM4で10、M6で11、Eで10、M4+Eで12.5であった。統計処理により、以下の条件の組み合わせにおいて有意水準5%で有意差が見られた。

- 4cmからの機械刺激と4cmからの機械刺激+電気刺激($p=0.013$)
- 6cmからの機械刺激と4cmからの機械刺激+電気刺激($p=0.049$)
- 電気刺激と4cmからの機械刺激+電気刺激($p=0.031$)

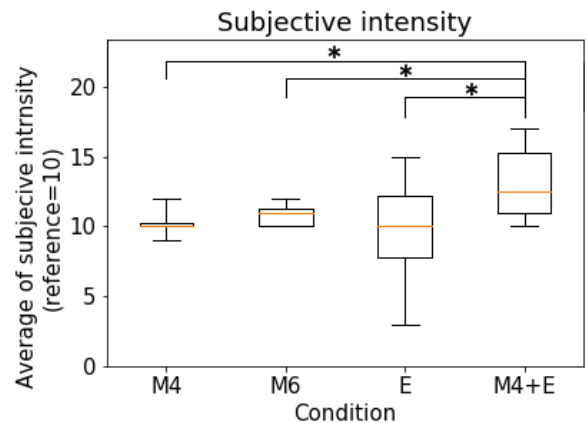


図 5 各刺激条件における主観的強度

5.2 各刺激条件における電気刺激感

図6に各刺激条件における電気刺激感を示す。各条件における中央値はM4で1、M6で1、Eで7、M4+Eで3.5であった。統計処理により、以下の条件の組み合わせにおいて有意水準5%で有意差が見られた。

- 4cmからの機械刺激と4cmからの機械刺激+電気刺激($p=0.0092$)
- 4cmからの機械刺激と電気刺激($p=0.0092$)
- 6cmからの機械刺激と4cmからの機械刺激+電気刺激($p=0.0070$)
- 電気刺激と4cmからの機械刺激+電気刺激($p=0.0048$)
- 6cmからの機械刺激と4cmからの機械刺激+電気刺激($p=0.010$)

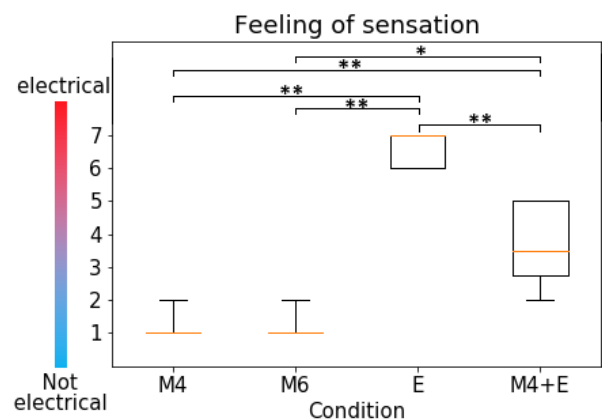


図 6 各刺激条件における電気刺激感

6. 考察

6.1 主観的強度の増強

4cmからの機械刺激に電気刺激を加えた際の主観的強度は、それぞれを単体で提示した時よりも有意に大きくなった。このとき、全被験者平均で3割程度主観的強度が増加している。しかし被験者の中には7割程度主観的強度が増強したと回答した者もいれば、全く増強しなかったと回答しなかった者もいた。12人の被験者のうち、電気刺激に

よって3割以上主観的強度が増強した者は半分の6人に留まった。またこの6人の主観的強度の増強の割合は5.5割であった。つまり、電気刺激による感覚増強手法が有効なグループとそうでないグループが存在する可能性がある。今回は機械刺激として落下する木板を用いたが、機械刺激の手法や電気刺激のパラメータなどを見直した上で、手法の有効性についてさらなる実験を行う必要がある。

6.2 電気刺激感の減弱

一方で、4cmからの機械刺激に電気刺激を加えた際の電気刺激感については、全被験者が電気刺激単体で提示された際よりも低く回答した。つまり、機械刺激による電気刺激感の防止については、程度の差はあれど達成されたといえる。機械刺激と同時に提示された際の電気刺激がどのように知覚され、結果的に電気刺激感が減弱しているかについては更なる調査が必要であると考えられる。

6.3 同時刺激による触覚の質

機械刺激に電気刺激が付与された際の触覚がどのようなものであったかについて、被験者は「基準刺激よりも高い所から板が落ちてきたように感じた」「木板よりも重いものが落ちてきたように感じた」「板が落ちた部分からじわりと広がるような感覚が追加された」などと報告した。機械刺激と電気刺激の同時刺激による触覚の質について調べることも今後の課題である。

7. おわりに

電気刺激と機械刺激を組み合わせ、強度と自然さを両立した触覚提示手法を提案し、その有効性検証の第二段階として主観的強度の増強と電気刺激特有のビリビリ感の防止の両立が可能か検証した。ビリビリ感の減弱については達成されたが、主観的強度の増強については個人差が大きく、その改善および現象の詳細な調査が今後の課題となる。

また、将来は主観的強度の増強度合を高め痛覚を含めた強い感覚提示が可能な撃力ディスプレイに応用し、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。

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] H. Egekvist, P. Bjerring, and L. Arendt-Nielsen, "Pain and mechanical injury of human skin following needle insertions," *Eur. J. Pain*, vol. 3, pp. 41–49, 1999.
- [2] V. Yem and H. Kajimoto, "Comparative Evaluation of Tactile Sensation by Electrical and Mechanical Stimulation," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, no. 1, pp. 130–134, 2017.
- [3] F. A. Saunders, "Information transmission across the skin: high-resolution tactile sensory aids for the deaf and the blind," *Int. J. Neurosci.*, vol. 19, no. 1–4, pp. 21–28, 1983.
- [4] K. A. Kaczmarek, M. E. Tyler, and P. Bach-y-Rita, "Electrotactile haptic display on the fingertips: Preliminary results," in *Proc. 16th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 1994, vol. 2, pp. 940–941.
- [5] Y. Matoba, H. Eto, T. Sato, K. Fukuchi, and H. Koike, "Biri-biri: Pressure-sensitive touch interface with electrical stimulation," in *13th Virtual Reality International Conference*, 2011.
- [6] Y. Kataoka, S. Hashiguchi, F. Shibata, and A. Kimura, "Psychophysical influence on sense of pain by mixed reality visual stimulation," in *7th Korea-Japan Workshop on Mixed Reality*, 2014.
- [7] V. Yem and H. Kajimoto, "Masking of electrical vibration sensation using mechanical vibration for presentation of pressure sensation," in *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 2017, pp. 501–506.
- [8] S. Kuroki, H. Kajimoto, H. Nii, N. Kawakami, and S. Tachi, "Proposal for tactile sense presentation that combines electrical and mechanical stimulus," in *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, 2007, pp. 121–126.
- [9] T. Reiff and V. Morawe, "PainStation," 2001.
- [10] P. Lopes, S. You, L.-P. Cheng, S. Marwecki, and P. Baudisch, "Providing Haptics to Walls & Heavy Objects in Virtual Reality by Means of Electrical Muscle Stimulation," in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2017, pp. 1471–1482.
- [11] M. Kono, T. Miyaki, and J. Rekimoto, "In-pulse: Inducing Fear and Pain in Virtual Experiences," in *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2018, pp. 40:1–40:5.
- [12] P. Lopes, A. Ion, and P. Baudisch, "Impacto: Simulating physical impact by combining tactile stimulation with electrical muscle stimulation," in *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, 2015, pp. 11–19.
- [13] H. Kajimoto, "Electrotactile display with real-time impedance feedback using pulse width modulation," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 5, no. 2, pp. 184–188, 2012.