

電気刺激によって生じる触覚の機械刺激との比較評価

○ヤェム ヴィボル (電気通信大学), 梶本 裕之 (電気通信大学)

Comparative Evaluation of Tactile Sensation Presented by

Electrical and by Mechanical Stimulation

○Vibol YEM (UEC), and Hiroyuki KAJIMOTO (UEC)

Abstract: The advantages of the tactile display using electrical stimulus are small in size and energy efficiency compared to the one using mechanical stimulus. However, the relationship of the sensation of electrical and mechanical stimulus is still not revealed. This study is to compare the tactile sensation presented by electrical and by mechanical stimulation and to examine how to express electro-tactile sensation of anode and cathode stimulus with the sensation of mechanical stimulus.

1. はじめに

皮膚への通電により触覚を提示する電気触覚ディスプレイは、機械刺激に比べて簡便にシステムを構築できる等の利点がある。Bach-y-Ritaら[1]やCollinsら[2]は電気触覚ディスプレイを利用して視覚障害者のための視覚-触覚変換装置を開発している。また梶本[3]は掌全体にバーチャル物体表面触覚を提示する円筒型触覚ディスプレイを開発している。

以上のようなシステムでは機械刺激の代替として電気刺激が利用されており、電気刺激によって多種の触覚を提示できることが示されている。しかし電気刺激の感覚の質について機械刺激と直接的に対比する試みはこれまでほとんど行われていない。

このような背景から本研究は、電気刺激による触覚を機械刺激と比較してその感覚特性を明らかにすることを目的とした。本稿では、陽極刺激と陰極刺激を行った際の生起感覚が機械刺激でどのように表現されるかについて報告する。

2. 関連研究

電気刺激の感覚の質に関しては、まず刺激パルスの周波数に応じて、機械刺激における振動提示と同様の周波数知覚を生じることが知られている[9]。これは機械的な振動1周期に対して神経活動が1回ないし2回生じるというマイクロニューログラムにおける知見[10]と照らしあわせて妥当と思われる。ただし電気刺激の周波数知覚を機械刺激と直接対比した例は筆者らの知る限り存在しない。

電気刺激と機械刺激の組み合わせに関しては、感覚閾値を変化させる試みが報告されている[11]。これは電気刺激によって機械刺激の閾値が、または機械刺激に

よって電気刺激の閾値が低下することを期待したものである。しかし感覚の質に関して機械刺激と電気刺激を比較したものではなかった。

電気刺激には、陽極刺激と陰極刺激の2つの提示方法が存在し[4]、この提示方法によって生じる触覚も異なると報告されている[5]。陰極刺激では主にMerkel細胞の刺激に起因する圧覚が特徴的に生じ、陽極刺激では主にMeissner小体の刺激に起因する振動覚が特徴的に生じる。この傾向は指先において特に顕著であり、身体他の部位では陽極刺激の閾値は陰極刺激に比べて高いとされるが、指先では陽極刺激のほうが閾値が低い。また陰極刺激では皮膚水平方向に走行する神経が主に駆動されるため陽極刺激と異なり感覚生起位置と刺激位置にずれを生じる[6]。

こうした陰極刺激と陽極刺激の違いを利用し、指先に電極を装着すること無く触覚提示を行う触覚ARシステム[7]や、皮膚が対象物に衝突した際の感覚を再現する試みも行われている[8]。

3. 実験

3.1 実験の目的

本実験では、陽極刺激及び陰極刺激を提示した際に生じる振動触覚が機械刺激でどのように表現されるかを確かめた。電気刺激と機械刺激を異なる指に交互に与え、機械刺激のパラメータを被験者に調整させた。

3.2 刺激波形

触覚提示のための電気刺激では、刺激電流をパルス波形とし、パルス幅を20~50 μ sとすることが多い[4]。

また今回の電気刺激のターゲットは皮膚浅部の Meissner 小体および Merkel 細胞であると考えられ、前者が応答する周波数は 10 ないし 100Hz 程度である。これらの事実から本実験ではパルス幅を 50 μ s, パルスの周波数(以降パルス周波数と呼ぶ)を 50Hz に設定した。また刺激の On/Off を 1Hz で切り替え(以降切り替え周波数と呼ぶ), 電気刺激が On の際には後述する機械刺激が Off となるようにした。刺激電流の波形を図 1(上)に示す。

もし被験者がパルスごとの刺激を知覚するならば, パルス周波数 50Hz を知覚するはずであり, またもし被験者が個々のパルスを知覚せず, 全体の刺激を群として知覚するならば, 1 秒間の継続的な触覚を知覚するはずである。これらはそれぞれ, Meissner 小体が刺激されたことによる振動覚と Merkel 細胞が刺激されたことによる圧覚であると考えられる。

機械刺激の提示については, 電気刺激と同様の二種類の振動を組み合わせて以下のように設定した。

$$x = A(-\cos(2\pi f_1 t) + 1)/2 + B\sin(2\pi f_2 t)$$

ここで x は振動距離, f_1, f_2, A, B はそれぞれ切り替え周波数(1Hz に固定)とパルス周波数(50Hz に固定), およびそれぞれの振幅(被験者により調整)である。 t は提示時間であるが, 図 1 に示すように, 電気刺激と機械刺激を同時ではなく, 1 秒間隔で繰り返して提示される。

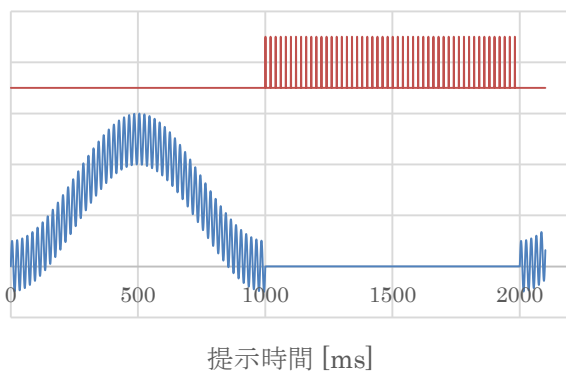


Fig.1 電気刺激のパルス(上)と機械刺激の振動波形(下)

3.3 実験装置

本実験では, 電気刺激を提示するために, 電気刺激キット(図 2)を利用した。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。電極は直径 1.75 mm, 中心間距離 2.5 mm の電極を 3 \times 3 配置

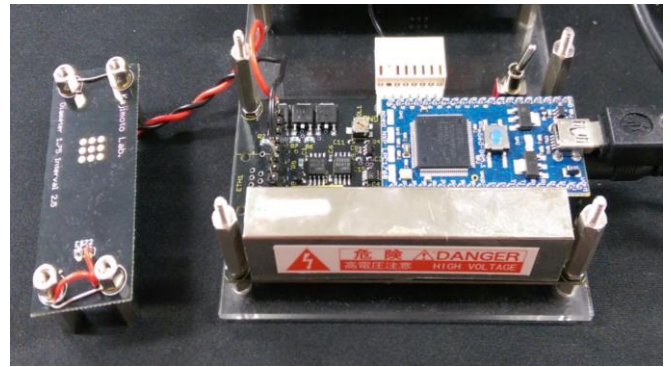


Fig.2 電気刺激キット

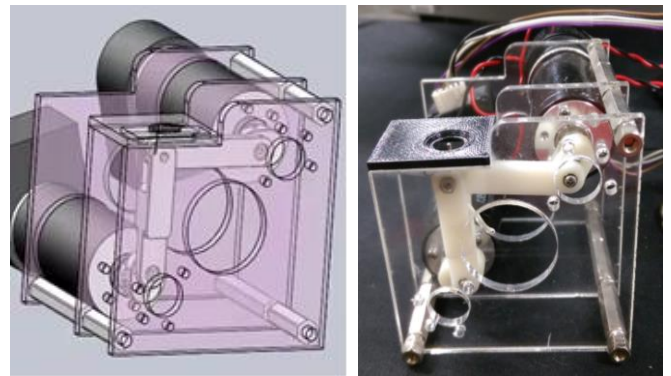


Fig.3 設計図(左)と開発した機械刺激装置

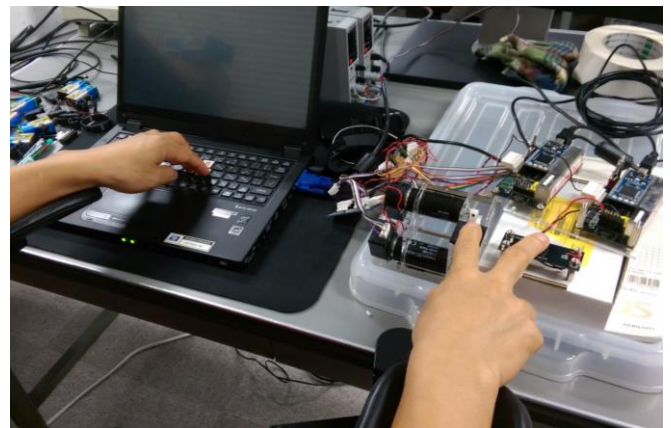


Fig.4 実験様子

し, 中央の電極を刺激電極として, 周囲の 8 つの電極を不関電極として用いた。

機械刺激の装置を図 3 に示す。本装置は 2 つのクラック機構で構成され, 前後および上下の 2 自由度方向に触覚提示が可能であるが, 本実験では皮膚に垂直な方向の振動のみ提示した。電気刺激と同様のマイクロコントローラおよびモータドライバ IC(製品名)によ

り制御される。機械装置の末端（以降エンドエフェクタと呼ぶ）には直径 1 mm のピンが取り付けられており、指先皮膚に振動を伝達する。エンドエフェクタは直径 8 mm の穴の空いた板の中央に配置され、この板が指載せ台として機能する。

以上の電気刺激装置および機械刺激装置の 2 台のマイクロコントローラと PC の間で Serial 通信を行うことで、電気刺激の強度（電流量）及び機械刺激の振動振幅を PC のキーボードで操作できるようにした。

3.4 手順・被験者

被験者は 21 歳～32 歳の 8 名（男性 7 名，女性 1 名，うち 6 名右利き，2 名左利き）であった。実験の手順は以下の通りであった。

- ① 図 4 に示すように、被験者に実験装置の前に椅子の上に座らせ、姿勢を安定させるために腕をサポート台に置くように伝えた。
- ② 右手の人差し指を機械刺激装置のエンドエフェクタ、中指を電気刺激の電極の上に置かせた。
- ③ 電気刺激や機械刺激の感覚を理解し、実験装置の操作に慣れるまでキーボードの操作の練習を行わせた。
- ④ 各試行の冒頭において、電気刺激の閾値を計測するためキーボードを操作して電流を調整させた。
- ⑤ 電気刺激と機械刺激が 1 秒毎に交互に提示されている時、機械刺激の質および強度を電気刺激とほぼ同じになるようにキーボード操作によって調整させた。3.2 で述べたように機械刺激は 50Hz と 1Hz の重畳された刺激波形であり、被験者にはそれぞれの周波数の振幅を調整させた。

実験条件は電気刺激の強度を閾値の 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 倍とした 5 条件，電気刺激の極性を陽極，陰極の 2 条件，計 10 条件とした。各条件を一回のみ行ったため、被験者ごとの試行数は 10 であった。電気刺激の強度をランダムとし、陽極刺激と陰極刺激の順番はカウンタバランスをとった。

4. 実験結果

実験データは一回の電気刺激に対して、被験者が調整した機械的振動の振幅 A, B として得られる。以下の実験データのまとめにおいては、切り替え周波数(1Hz)での振動振幅 A ，パルス周波数(50Hz)での振動振幅 B について電気刺激強度と極性との関係を調べた。

図 5 は、切り替え周波数（1Hz）成分に関する被験者の調整の結果である。陰極刺激と陽極刺激について示

している。横軸は正規化された刺激電流量（1=感覚閾値），縦軸は機械振動の振幅である。

繰り返しあり 2 元配置分散分析（電気刺激強度（1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8）× 電気刺激の極性（陰極刺激，陽極刺激））を行った。その結果，電気刺激強度の要因に主効果，電気刺激の極性の要因に有意傾向がみられた（それぞれ $F(4, 70) = 2.5, p < .001$; $F(1, 70) = 3.9, p = .054$ ）。要因間に交互作用の有意差はみられなかった（ $F(4, 70) = 2.5, p = .86$ ）。回帰分析の結果，陰極刺激と陽極刺激の直線回帰誤差 R^2 はそれぞれ 0.95 と 0.73 となった。

図 6 は、パルス周波数（50Hz）に関する被験者の調整の結果である。陰極刺激と陽極刺激について示している。軸の説明は図 5 と同様である。

（空行不要）切り替え周波数の場合と同様に、繰り返しあり 2 元配置分散分析（電気刺激強度（1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8）× 刺激電極（陰極刺激，陽極刺激））を行った。その結果，電気刺激強度の要因には主効果がみられたが，電気刺激の極性にはみられなかった（それぞれ $F(4, 70) = 2.5, p < .001$; $F(1, 70) = 3.9, p = .16$ ）。それぞれの要因間に交互作用はみられなかった（ $F(4, 70) = 2.5, p = .92$ ）。回帰分析の結果，陰極刺激と陽極刺激の直線回帰誤差 R^2 はそれぞれ 0.95 と 0.98 となった。

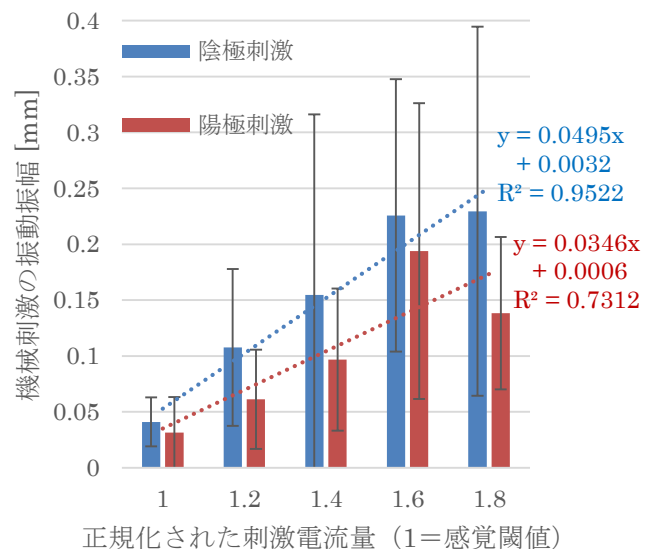


Fig.5 電気刺激強度および極性と機械刺激振動振幅との関係（切り替え周波数成分）

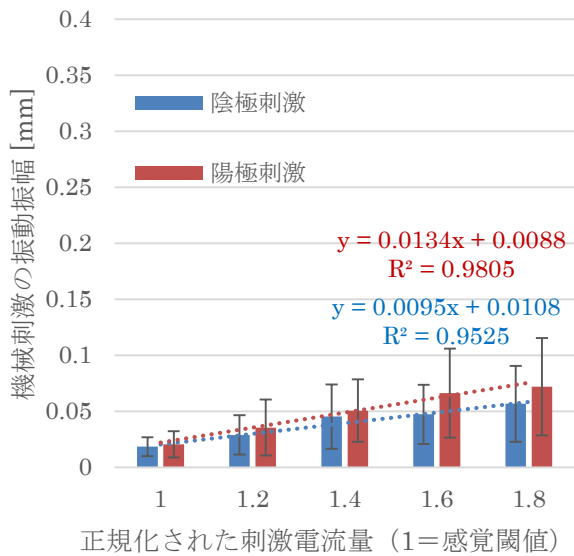


Fig.6 電気刺激強度および極性と機械刺激振動振幅との関係（パルス周波数成分）

5. 考察

実験の結果、低周波の切り替え周波数成分においては陰極刺激が陽極刺激よりも強く感じられていることが分かった。また逆に高周波のパルス周波数成分においては、極性による有意差は見られなかったものの、すべての刺激電流量の条件において陽極刺激が陰極刺激よりも強く感じられていることが分かった。

以上の結果は、「陰極刺激が Merkel 細胞に由来する圧覚を生起しやすく、陽極刺激が Meissner 小体由来する振動感覚を生起しやすい」という従来知見[9]と一致しており、この従来知見を機械的の刺激との直接対比によって検証できたとと言える。

また電気刺激の強度と機械刺激の振動振幅との関係については、低周波成分、高周波成分ともに、電流の極性にかかわらず直線的な関係にあることも判明した。この関係は今後、電気刺激のボリューム調整や、機械的振動を記録して電気触覚ディスプレイで再生するような状況で利用できると考えられる

6. おわりに

本研究は、電気刺激によって生起する触覚の質を機械刺激との直接対比によって検証する実験を行った。実験では電気刺激の量および極性を変えた条件下で 50Hz のパルスを 1Hz 周期で与え、対応する機械刺激の振幅を、高周波と低周波のそれぞれについて分析した。その結果、低周波成分については陰極刺激をした場合に有意に大きく回答し、高周波成分については有意差

は見られないものの陽極刺激をした場合に大きく回答する傾向が見られた。これは従来「陰極刺激が圧覚を生起しやすく、陽極刺激が振動感覚を生起しやすい」という知見と一致している。また電気刺激の強度と機械刺激の振動振幅との関係について明らかとなった。

以上の結果から、電気刺激が機械刺激のどのような感覚に対応するかが一部明らかになったといえる。今後は本知見を踏まえ、機械刺激と電気刺激を併用した新たな触覚提示アルゴリズムを開発していく。

謝辞

本研究は JST-ACCEL「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた。

参考文献

- [1] P. Bach-y-Rita, K.A. Kaczmarek, M.E. Tyler, and J. Carcia-Lara, "Form perception with a 49-point electro-tactile stimulus array on the tongue," J. Rehabilitation Research Development, Vol.35, pp. 427-430, 1998.
- [2] C.C. Collins, "Tactile Television: Mechanical Electrical Image Projection," IEEE Trans. Man-Machine System, Vol. 11, pp. 65-71, 1970.
- [3] H. Kajimoto, "Design of Cylindrical Whole-hand haptic Interface using Electrocutaneous Display," Proc. EuroHaptics2012, Springer Part II, pp. 67-72, 2012.
- [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, pp. 940-941, 1994.
- [5] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, S. Tachi, "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation", 9th International Conference on Artificial Reality and Telexistence(ICAT99), 1999.
- [6] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, S. Tachi, "Electro-Tactile Display with Force Feedback," World Multiconf. on Systemics, Cybernetics and Informatics(SCI2001), 2001.
- [7] S. Yoshimoto, Y. Kuroda, M. Imura, O. Oshiro, "Development of a spatially transparent electrotactile display and its performance in grip force control," Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC

2011), pp. 3463-3466, 2011.

- [8] K. Sato, and S. Tachi, "Design of Electrotactile Stimulation to Represent Distribution of Force Vectors," IEEE Haptics Symposium 2010, pp.121-128, 2010.
- [9] H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, "Electro-Tactile Display with Tactile Primary Color Approach," Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems(IROS), 2004.
- [10] W.H. Talbot, I. Darian-Smith, H.H Kornhuber, V.B. Mountcastle, "The sense of flutter-vibration: comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey hand.," J Neurophysiol. Vol.31, No.2, pp.301-334, 1968.
- [11] S. Kuroki, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, "Proposal for Tactile Sense Presentation that Combines Electrical and Mechanical Stimulus," 2nd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (World Haptics), 2007.