



触感再現のための電気刺激と機械刺激の 相互作用に関する研究

A Study on Interaction between Electrical and Mechanical Stimulation for Tactile Sensation Reproduction

米田悠人¹⁾, 西内信之¹⁾, ヤェムヴィボル²⁾

Yuto YONEDA, Nobuyuki NISHIUCHI, and Vibol YEM

1) 東京都立大学 システムデザイン研究科 情報科学域

(〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, {yoneda-yuto@ed, nnishiuc@}.tmu.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報工学研究群 知能機能システム学位プログラム

(〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yem@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 触覚再現のために電気刺激と機械刺激を併用することが提案されている。しかし、現在ではあらゆる触覚再現のアルゴリズムは未知であり、さらに電気刺激と機械刺激の相互作用の理解が明らかになっていないため、その現象を深く理解する必要がある。本研究の目的は、電気刺激と機械刺激を併用するアルゴリズムを探求するための第一歩としてそれらの刺激の相互影響を見いだす。

キーワード: 指先触覚, 機械刺激, 電気刺激, 相互作用

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 研究分野では、バーチャル物体または遠隔にある物体に触れる感覚を体験者に与えるために様々な触覚再現手法が研究されている[1]。人間は、モノに触れると指先における 4 種類の機械受容器により感触を得ることができ、これらの受容器を選択的に刺激することであらゆる触覚を再現可能だと考えられている。これは視覚の三原色原理のように、網膜に存在する 3 種類の錐体細胞によってあらゆる色情報が知覚されていることに類似している。

指先における機械受容器は、メルケル細胞、ルフィニ終末、マイスナー小体およびパチニ小体の 4 種類が存在すると知られている[2]。これらの受容器はそれぞれ異なる皮膚刺激に反応する。メルケル細胞は圧力、ルフィニ終末は剪断力、マイスナー小体は低周波振動、そしてパチニ小体は高周波振動によって活性化する。また、この四つの機械受容器は、それぞれ時間分解能と機械分解能が異なり、メルケル細胞とルフィニ終末は 0.1~数 Hz、マイスナー小体は 10~100Hz、パチニ小体は 60~800Hz の振動で活性化することが知られている。

著者の研究グループでは、あらゆる触覚再現のために電気刺激と機械刺激の併用を提案し、触覚ディスプレイを開発した[1]。これは、電気刺激はメルケル細胞とマイスナー小体、機械刺激がマイスナー小体とルフィニ終末の

活性化を担っている。しかし、あらゆる触覚再現のアルゴリズムが未知であり、電気刺激と機械刺激の相互作用の理解が明らかになっていないため、その現象を深く理解する必要がある。本研究の目的は、電気刺激と機械刺激を併用するアルゴリズムを探求するために第一歩としてそれらの刺激の相互影響を見いだす。これまでに電気刺激と機械刺激の相互作用について、感覚閾値の付近における現象が調査されていた[3][4][5]。これに対して本研究では、感覚閾値より十分に強く感じる刺激における現象を調査する。

2. 実験 1: 同じ知覚強度の機械刺激による電気刺激への影響

2.1 実験概要

我々の先行研究[5]では、従来研究に基づいて、機械刺激と電気刺激において、感覚閾値よりも高い強度および周波数の異なる機械刺激で、電気刺激は機械刺激を増幅させ、機械刺激は電気刺激を弱くさせるかを検証している。その結果、機械刺激は単独で与えた時よりも電気刺激と機械刺激を併用して与えた時の方が強く感じる。すなわち、電気刺激が機械刺激を増幅させることがわかった。しかし、電気刺激が機械刺激によって弱く感じることは確認できず、機械刺激が電気刺激に影響を与えるかをより深く調査する必要がある。

2.2 実験目的

我々の先行研究では機械刺激と電気刺激の強度を電気刺激の感覚閾値の電流を1.2倍にした電流で刺激する強度と同じようにする条件で実験を行っていた。しかし、それでも機械刺激の強度が感覚閾値の付近であり、この刺激の強度がまだ弱いため、機械刺激による影響が生じなかったと考える。このため本研究の実験1では、主観的に十分に強く感じられる電気刺激を行う場合、同じ強度の機械刺激により電気刺激を弱く感じさせるかその現象を検討する。本実験では我々の先行研究[5]と同様に閾値を計測するのではなく、主観的に電気刺激をはっきり感じられるように調整してもらうことにした。

2.3 実験方法

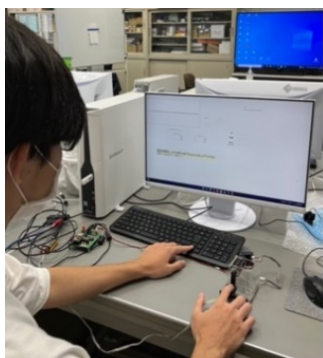


図1. 実験の様子

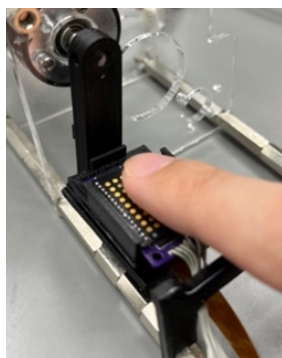


図2. 実験装置

実験中の風景を図1に示す。実験参加者は神経疾患を持たない14名（男性9名、女性5名、 22.0 ± 1.0 歳、21-23歳）であった。また実験装置についてマイクロコントローラ(Espressif Systems, ESP32)を用い、パソコンのキーボードから機械刺激と電気刺激をコントロールできるようにした(図2)。実験参加者は装置のエンドエフェクタに右手人差し指を置き、左手でPCのキーを以下のように操作する。本実験では以下の通りに調整法で行った。

- ① 電気刺激を単独で与え、十分に電気刺激を感じるまで電流を徐々に増加してもらい、その際の電流を測定する。
- ② 機械刺激と①で測定した電流の電気刺激をそれぞれ単独で交互に与え、機械刺激と電気刺激を比較し、電気刺激と同じ強度になるように機械刺激の強度を調整してもらう。その際、機械刺激の入力の正弦波電圧の振幅を測定する。
- ③ ①と②で測定した電気刺激と機械刺激を同時に与え、その後電気刺激を単独で与え、併用して与えた際の電気刺激と同じ強度になるように単独の電気刺激を調整してもらい、その際の強度を測定する。

2.4 実験結果及び考察

併用した際の電気刺激と単独電気刺激の比較とその割合の結果をそれぞれ図3と図4に示す。それぞれの周波数1~200Hzにおいて、二つあるプロットのうち、左側のプロ

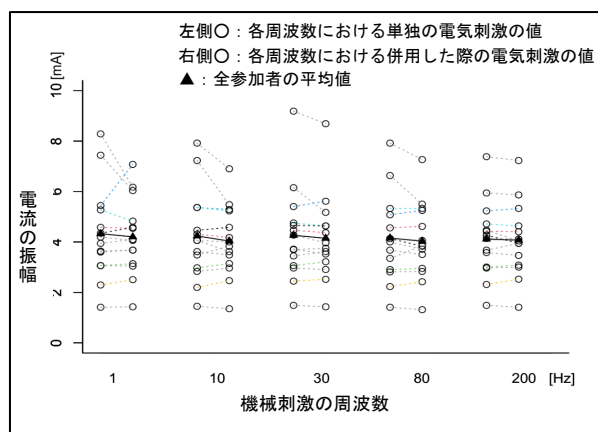


図3. 同じ知覚強度の機械刺激による電気刺激への影響の結果

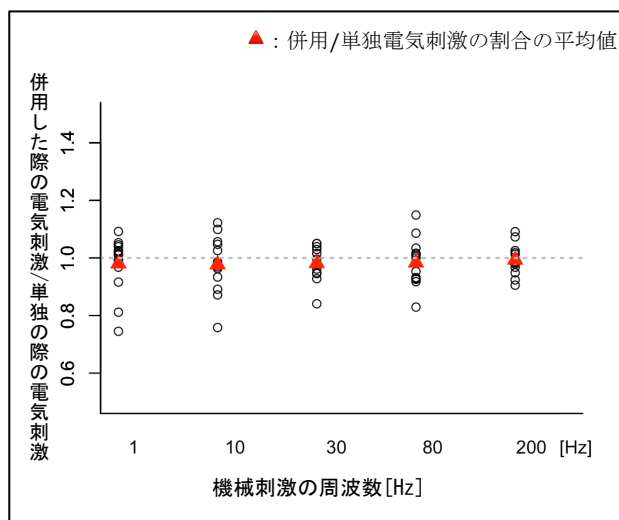


図4. 電気刺激と同じ知覚強度の機械刺激における、単独の電気刺激に対する併用した際の電気刺激の割合

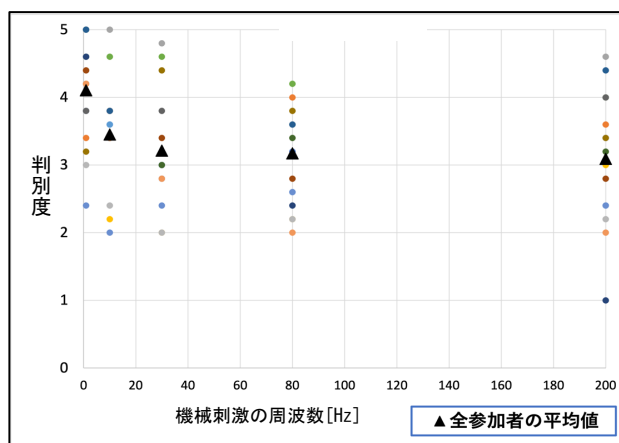


図5. 2種類の刺激の判別度

ットは単独の電気刺激の値であり、右側のプロットは併用刺激における電気刺激の値である。また、三角形のプロットは実験参加者14名の平均の値である。図3より、周波数200Hzの時を除いて、電流の平均値は併用した際の電気刺激の値の方が低い傾向がある。すなわち、平均値を比較すると、機械刺激が電気刺激を弱めたと考えられる。

2.5 T検定の結果

実験結果に有意差があるか周波数ごと(1,10,30,80,200Hz)

に各群（単独の時の電気刺激の値・併用した際の電気刺激の値）の平均値の比較に、対応のある t 検定を行った。データの分析には、Microsoft Excel for Mac version 16.70 を用いた。有意水準 5% で検定を行った。その結果、それぞれの周波数 (1, 10, 30, 80, 200Hz) で、 $t(13)=0.262$, $t(13)=0.201$, $t(13)=0.182$, $t(13)=0.262$, $t(13)=0.407$ であった。この結果から、全ての周波数の場合において、 $p>0.05$ であるため、今回の実験結果に有意差がないことがわかった。したがって、統計的から見ると機械刺激が電気刺激に影響を与えなかった。

2.6 2種類の刺激の判別度

実験 1 の試行中に、電気刺激と機械刺激の 2 種類の刺激を併用して与えた際に、この 2 種類の刺激（電気刺激・機械刺激）を、どの程度区別できたか主観的に評価してもらうためにアンケートを行った。結果を図 5 に示す。この結果から機械刺激の周波数が 30Hz よりも高い場合において判別度が低くなる結果が得られた。したがって、機械刺激は周波数が高くなると電気刺激と刺激の特性が似てくることが分かった。

3. 実験 2：比較的強い知覚強度の機械刺激による電気刺激への影響

3.1 実験概要

先行研究[6]では、指先における電気的な振動覚を弱くするために掌に機械刺激を与えていた。その際電気刺激の強度を上げていくと、電気刺激を弱く感じさせるのに必要な機械刺激の強度も増加していくことを示す結果を得ている。よって、機械刺激が電気刺激を弱く感じさせるためには一定以上の強い知覚強度の機械刺激が必要だと考えられる。実験 1 では機械刺激と電気刺激は主観的に同じ強度で行ったため、十分な相互作用が生じなかったと考えられる。

3.2 実験目的

実験 2 では、指先における機械刺激が先行研究[6]と同様に電気刺激を弱く感じさせるか、その検討のために機械刺激の強度を電気刺激よりも強くした。実験 1 では、機械刺激が電気刺激と同じ強度であったのに対し、実験 2 では機械刺激を電気刺激と同じ強度で感じるように調整してもらってから機械刺激の負荷電圧を 2.5 倍高く設定した。

3.3 実験方法

実験に用いた実験装置については実験 1 と同じである。実験 2 では実験参加者の負荷を減らすために機械刺激の周波数は 1, 30, 200Hz の 3 種類を用いた。実験参加者は、皮膚に神経疾患のない 11 名(男性 7 名, 女性 4 名, 22.0 ± 1.0 歳, 21-23 歳)であった。実験手順は①と②は実験 1 と同様、③を次のように行った。②で測定した機械刺激の負荷電圧を 2.5 倍にした機械刺激と①で測定した電気刺激を同時に与え、その後電気刺激を単独で与え、併用して与えた際の電気刺激と同じ強度になるように単独の電気

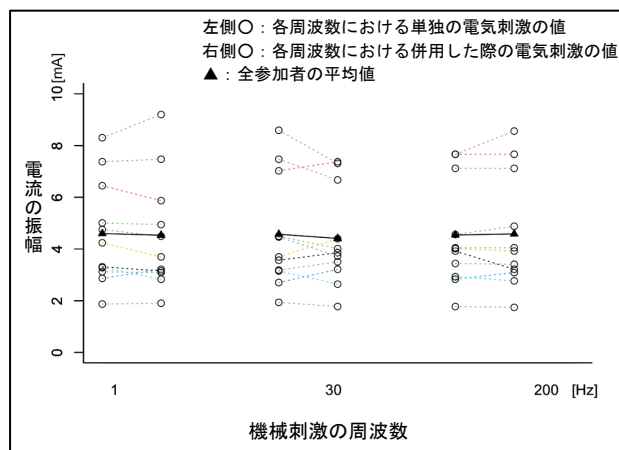


図 6. 実験 2 の結果

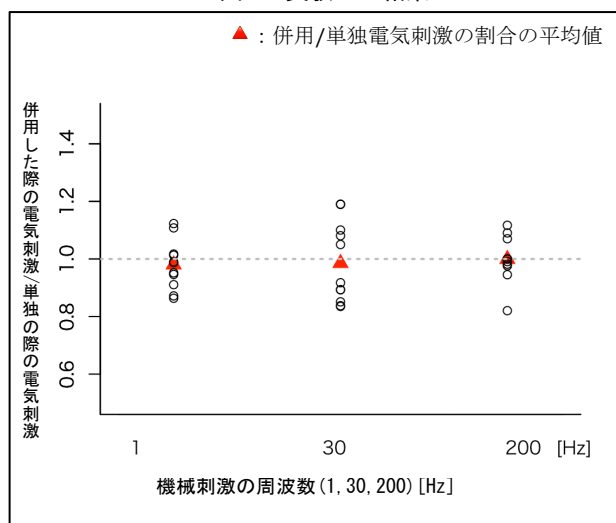


図 7. 実験 2 の結果 (割合)

刺激を調整してもらった。その際の電流を測定した。

3.4 実験結果及び考察

単独電気刺激と併用の際の電気刺激の比較とその割合の結果をそれぞれ図 6 と図 7 に示す。機械刺激の周波数に関わらず、単独の時と併用した時の電気刺激の値にほとんど差はなかった。すなわち、機械刺激を主観的に電気刺激より強くしても、電気刺激を弱く感じさせなかった。したがって、実験 1 と 2 の結果より指先に与える機械刺激は、電気刺激に影響を及ぼしにくいことが分かった。

3.5 T 検定の結果

実験 1 と同様に、実験結果に有意差があるか周波数ごと (1, 30, 200Hz) に各群（単独の時の電気刺激の値・併用した際の電気刺激の値）の平均値の比較に、対応のある t 検定を行った。データの分析には、Microsoft Excel for Mac version 16.70 を用いた。有意水準 5% で検定を行った。その結果、それぞれの周波数 (1, 30, 200Hz) で、 $t(10)=0.629$, $t(10)=0.419$, $t(10)=0.733$ であった。この結果から、全ての周波数の場合において、 $p>0.05$ であるため、今回の実験結果に有意差がないことがわかった。

4. 結論

本研究では、これまでの研究に対し、感覚閾値の近傍よりも十分強く感じられる電気刺激と機械刺激を用いて実

験を行った。その結果、同じ感覚強度の電気刺激と機械刺激を提示した場合、200Hz の時を除き機械刺激が電気刺激を弱くする傾向が見られた。ただし、これは平均値による観察であり、T 検定の結果では有意差がなかった。機械刺激を電気刺激よりも強い強度で提示した場合、機械刺激が電気刺激を弱める傾向を確認できなかった。アンケートの結果により電気刺激の質感は機械刺激の高周波振動に似ていることが分かった。

電気刺激は、電極アレイの刺激点により物体の形状や指腹との接触面積を提示するためによく使われている。一方で、機械刺激の振動は、表面粗さの提示などに広く応用されている。著者らの先行研究結果によると、電気刺激は機械刺激の強度を有意に強く感じさせるため、機械刺激で表現される表面粗さの感覚に影響を与えると予想できる(例えば、より粗く感じる)。また、機械刺激は電気刺激への影響を及ぼしにくいいため、電気刺激で提示する物体形状の感覚をほとんど変化させないと期待できる。したがって、両方の刺激を併用しても、形状や接触面積のコントロールをしやすいと考えられる。本研究では、直接実物の触覚を比較しなかったため、どこの範囲で触覚を再現できるか不明である。今後は、100種類以上の実物を用意し、与えた刺激と物体表面を実際に触れた触覚と比較実験を行い、刺激併用のアルゴリズムを探求する。

謝辞 本研究は科研費 JP19K20325 と東京都立大学ローカル5G プロジェクトの助成を受けたものである。この謝意を表す。

参考文献

- [1] V.Yem and H.Kajimoto, "Wearable tactile device using mechanical and electrical stimulation for fingertip interaction with virtual world." IEEE Virtual Reality(VR), pp.99-104,2017.
- [2] Jones, L.A and Lederman, S.J. , "Human Hand Function." 1sted. USA:Oxford Uniercity Press, 2006.
- [3] K. A. Richardson, T. T. Imhoff, P. Grigg, and J. J. Collins, "Using electrical noise to enhance the ability of humans to detect subthreshold mechanical cutaneous stimuli," Chaos, vol. 8, no. 3, pp. 599–603. (1998)
- [4] S. Kuroki, H. Kajimoto, H. Nii, N. Kawakami, and S. Tachi, "Proposal for tactile sense presentation that combines electrical and mechanical stimulus," Proc. - Second Jt. EuroHaptics Conf. Symp. Haptic Interfaces Virtual Environ. Teleoperator Syst. World Haptics 2007, pp. 121–126. (2007)
- [5] 山口, 梶本, 福井, ヤヱム, 「電気刺激と機械刺激の同時付加による指先触覚の生成：単一刺激との比較」, 第28回研究会ハプティクス研究委員会, PI22-001.
- [6] V.Yem and H.Kajimoto, "Masking of electrical vibration sensation using mechanical vibration for presentation of pressure sensation, "2017 IEEE World Haptics Conf. WHC2017, vol.05923, no.15, pp.501-506, 2017.