



触覚電気刺激を用いた形状提示における角部再現性の向上

Reducing Corner Perception Loss in Electrotactile Presentation of Square-Shaped Motion

山田葵¹⁾, 梶本裕之²⁾, 矢野博明³⁾ ヤェム・ヴィボル³⁾

Aoi Yamada, Hiroyuki Kajimoto, Hiroaki Yano and Vibol Yem

1) 筑波大学 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, a.yamada@vrlab.esys.tsukuba.ac.jp)

2) 電気通信大学 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, kajimoto@uec.ac.jp)

3) 筑波大学 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, {yano, yem}@iit.tsukuba.ac.jp)

概要: 触覚電気刺激とは皮膚に電流パルスを流すことで疑似触覚を与える触覚提示手法である。正方形などの角を有する形状の輪郭点を、指先に 1 点ずつ時計回りに提示する際、角部が欠落するように知覚される。より正確な触覚提示のため、角部におけるより長い時間の刺激提示と陽極・陰極刺激の切り替えの効果を被験者実験により検証した。その結果、角部以外に陽極刺激を与えつつ、角部に陰極刺激を長い時間与えることにより、角知覚損失が低減することを確認した。

キーワード: 触覚提示, 陽極刺激, 陰極刺激, 角知覚損失

1. 序論

近年、手術シミュレーションやテレグジスタンスといった VR を用いた体験の研究開発が進んでいる。よりリアリティのある VR 体験を提供するためには、視覚や聴覚に加え、VR 内の物体に対する高精度な触覚フィードバックが必須となる。従来、触覚を提示するために空気圧 [1] やピンアレイ [2] 等が使用されてきた。しかしこれらの器具による触覚提示は、刺激点の密度を示す空間解像度と、知覚するまでの早さを示す応答性が共に低く、正確な触覚提示が困難であることが知られている。

一方、触覚電気刺激は、電流によって機械受容器を直接刺激する手法であり、装置を小型化しやすく応答性が高いという利点があげられる。このため、高い空間解像度を持つ電極アレイによって形状を提示することが広く検討されているが、電極アレイの空間解像度の向上には限界があり正確な形状提示には不十分である。したがって、正確な形状提示のためには空間解像度の向上だけでなく、ヒトの認知特性からのアプローチが肝要である。

ヒトの認知特性の一つとして、形状輪郭上の電極から同時に電気刺激を行うと、被験者は形状を正しく知覚できなくなるというものがある。そのため、我々は隣接する電極を 1 点ずつ連続的に切り替えて電気刺激を行う手法を検討している。しかし、この手法を用いて正方形を提示した場合、角が丸まった形状あるいは角が欠けた形状を知覚させてしまう問題が生じた。これは、提示形状の角の知覚が損なわれることを示唆しておりその防止手法が求められる。

以上より、本研究では形状提示の正確性の向上のため、隣接する電極を 1 点ずつ連続的に切り替えて電気刺激を行う

手法を用いた際の、角部の形状知覚の損失改善を目的とし、角部におけるより長い時間の刺激提示と陽極・陰極刺激の切り替えの効果を検証する。

なお、本研究は筑波大学システム情報系研究倫理委員会により承認されている (承認番号 2024R842)。

2. 触覚電気刺激

2.1 概要

触覚電気刺激とは、皮膚に電流を流し皮膚下にある機械受容器に直接刺激を与えることで触覚を発生させるものである。皮膚表面に電流を流したとき、皮膚下軸索の表面に電位分布が与えられる。その電位分布により軸索の膜間電位差が上昇し発火する。また指先などの無毛部皮膚には、低周波振動に応答するマイスナー小体、高周波振動覚に応答するパチニ小体、圧覚に応答するメルケル細胞、皮膚せん断変形覚に応答するルフィニ終末の 4 種類の機械受容器が存在する [3]。これらの軸索は他の感覚受容器の感覚神経よりも太いため刺激しやすい。そのため、痛覚や温覚といった他の感覚と区別して、機械的変形のような触覚のみを提示できる。また、異なる 4 種類の機械受容器に対し適切な電気刺激を与えることで、提示したい感覚を選択することができる [4]。本研究では、マイスナー小体へ電気刺激を行い振動覚を与える陽極刺激と、メルケル細胞へ電気刺激を行い振動覚を与える陰極刺激を用いる。

2.2 装置から皮膚への電流の流し方

本研究で利用する、電気通信大学の梶本裕之研究室が製作した触覚電気刺激装置を図 1、触覚電気刺激装置を使用している様子を図 2 に示す。この装置の電気回路については文

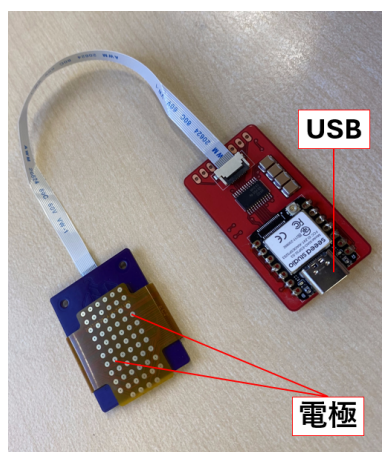


図 1: 触覚電気刺激装置

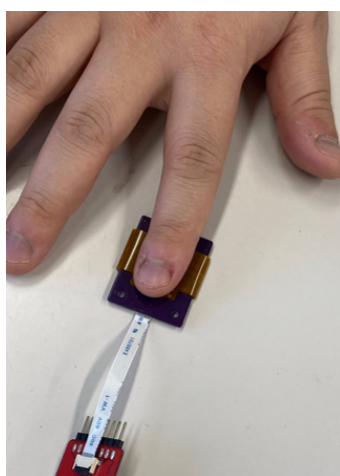


図 2: 触覚電気刺激装置を使用している様子



図 3: 刺激電流波形

献 [5] で詳細に説明されている。ここで、刺激電流は図 3 に示すようにパルス波形として個々の電極に提示される。この触覚電気刺激装置では刺激を安定させるために同時に一つの電極にのみ電流を流すように設定されている。そのため、複数の電極による形状提示を試みる際は電流を流す電極を一つずつ切り替える必要がある。本研究では図 4 に示すように、電流を電極に流すタイミングを一定時間ごとにずらすことによって時間間隔を設定する。なお、電流を流す電極を切り替える際、装置の仕様により数 μs の時間間隔が発生するが、人間が知覚するにはごく小さい値であるので時間間隔を 0ms とみなせる。

3. 問題設定と仮説

触覚電気刺激は、電流によって触覚受容器を直接刺激する手法であり、高い空間解像度を持つ電極アレイによって形状を提示することが広く検討されている。しかし、電極アレイ

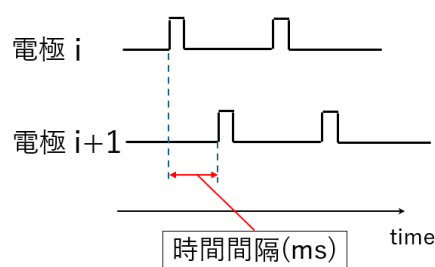
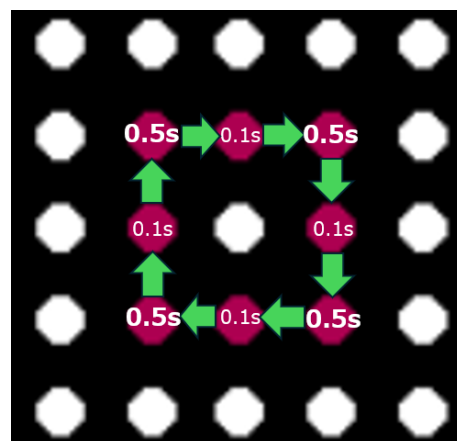
図 4: 電極 i と隣接する電極 $i+1$ に電流を流す際の時間間隔

図 5: 角部におけるより長い電気刺激

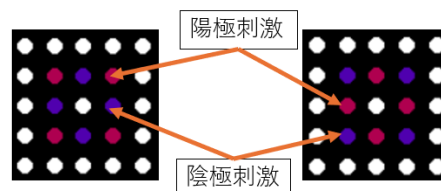


図 6: 各電極から与える電気刺激の配置の一例

の空間解像度を上げてても正確な形状提示には不十分であることが知られている。特に、形状輪郭上の電極から同時に電気刺激を行うと、被験者は形状を正しく知覚できない。そのため、我々は隣接する電極を 1 点ずつ連続的に切り替えて電気刺激を行う手法を検討している。しかし、この手法を用いて正方形を提示した場合、角が丸まった形状あるいは角が欠けた形状を知覚させてしまう問題が生じた。これは、提示形状の角の知覚が損なわれることを示唆しておりその防止手法が求められる。

角部を安定して提示するためには、被験者に角部を強く意識させる必要がある。そこで、角に意識を向けさせるための 2 つの手法を考案しその効果を検証することとした。

第一に、図 5 のように角部においてより長く電気刺激を行うという手法である。これは、人間が手で正方形を描く際に、角で一度動作を止めて方向転換を行うという無意識的な行動に着目したものである。

第二に、図 6 のように角部では異なる電気刺激を用いるという手法である。角部以外で陽極刺激を用いるならば角

表 1: 各条件のパラメータ

略称	角部長時間刺激	角部の刺激	角部以外の刺激
YAC	Y	A	C
YCA	Y	C	A
YAA	Y	A	A
YCC	Y	C	C
NAC	N	A	C
NCA	N	C	A
NAA	N	A	A
NCC	N	C	C

部では陰極刺激を、角部以外で陰極刺激を用いるならば角部では陽極刺激を、というように2つの異なる感覚を生み出す電気刺激を行うことで角部への意識を強めることを狙う。

4. 実験方法

本実験では、図6に示す3×3の正方形の輪郭上の電極を時計回りに1点ずつ0.1秒間隔で切り替えながら刺激する。このとき表1に示すように以下の3つの要因で構成される8個の条件を設け、各条件の略称を以下の3つの要因のアルファベットの組み合わせとして記述するものとする。

- 角部に対し0.5秒間の電気刺激を行うか（Y：あり or N：なし）
- 角部での電気刺激の種類はどちらか（A：陽極（Anode）刺激 or C：陰極（Cathode）刺激）
- 角部以外での電気刺激の種類はどちらか（A：陽極刺激, C：陰極刺激）

一人の被験者に対し、8つの条件の形状提示をランダムな順番で1回ずつ行い、これを4セット繰り返した。このとき、被験者は提示された図形が正方形と円のどちらと認識したかを回答する。また、提示される図形が正方形であることは事前に明示されており、被験者間で知覚判断の基準が一貫するよう配慮した。なお、被験者は健常者10名（うち20代男性8名、20代女性1名、50代女性1名）である。

5. 実験結果

被験者が各条件において正方形と回答した試行数を、全刺激提示回数（4セット×被験者数）で割ることにより正確性を測る正答率を得られた。

実験結果を図7に示す。まずYとNの比較では、角部において角部以外よりも長い時間電気刺激を行うと正答率が向上することが示された。これは、角部で一時的に刺激点の動きが停止することにより、正方形の頂点がより明確に知覚されるためだと考えられる。

次にYACとYCC、YCAとYAAを比較すると、角部とそれ以外で異なる電気刺激を用いた方が正答率が向上した。これは、それぞれの電気刺激に起因して振動覚と圧覚の2つ

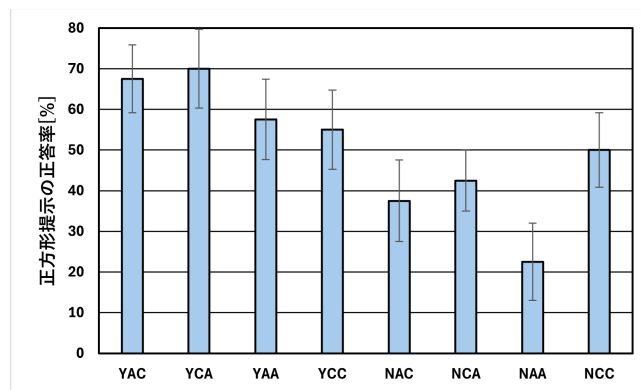


図 7: 各条件ごとの形状提示の正答率（図中のエラーバーは標準誤差を表す）

の異なる感覚が生じたことで角が強調されたからだと考えられる。さらにYACとYCAを比較すると、角部に陰極刺激を用いた方が高い正答率を示した。これは、陰極刺激による圧覚は陽極刺激による振動覚よりも長く知覚されるために角部への意識が向きやすいからだと考えられる。

以上により二つの仮説は立証され、さらにこの二つを組み合わせることで正方形の角部の知覚欠落を効果的に防ぎ、形状の提示をより正確にすることが明らかになった。

6. 結論

本研究では触覚電気刺激を用いて形状を提示した際の角部の形状知覚の損失改善を目的として、2つの手法を角部に対して試行した。一つ目は角部においてより長く電気刺激を行う手法、二つ目は角部で異なる刺激手法を用いる手法である。被験者実験の結果二つの手法ともに効果が見られ、さらに二つの手法を組み合わせたものが最も効果的だった。

さらなる形状提示の正確性の向上のため、角部以外と角部での刺激時間の関係などについて探求していきたい。

参考文献

- [1] Y. Ujitoko, T. Taniguchi, S. Sakurai, and K. Hirota, "Development of Finger-Mounted High-Density Pin-Array Haptic Display" IEEE Access, No. 8, 2020, 145107–145114.
- [2] N. Garcia, N.G. Tsagarakis, and D.G. Caldwell, "Feeling through Tactile Displays: A Study on the Effect of the Array Density and Size on the Discrimination of Tactile Patterns," IEEE Transactions on Haptics, 4(2), 2021, 100–110.
- [3] L. A. Jones, S. J. Lederman, "Human Hand Function." 1st ed. USA: Oxford University Press, 2006.
- [4] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, and S. Tachi, "Electro-Tactile Display with Force Feedback," Proc. World Multiconf. on Systemics
- [5] H. Kajimoto, "Electro-tactile Display: Principle and Hardware," In: Kajimoto H., Saga S., Konyo M. (eds) Pervasive Haptics. Springer, 79–96, 2016