



同一の電極アレイを用いた皮膚と筋肉の刺激による 触覚と力覚の提示

Presentation of Tactile and Force Sensations via Cutaneous and Muscle Stimulation
Using a Common Electrode Array

安達 紀考¹⁾, 坂本 泰清²⁾, 溝口 泉²⁾, 梶本 裕之²⁾

Noritaka ADACHI, Taisei SAKAMOTO, Izumi IZOGUCHI and Hiroyuki KAJIMOTO

- 1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘一丁目 5 番地 1, adachi@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一丁目 5 番地 1, {sakamoto, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要 : VR/AR 環境において高い没入感や操作性の向上には触覚・力覚提示技術が重要である。従来は両者を提示するために異なる電極サイズが必要だった。本研究では、同一の電極アレイで触覚と力覚の提示を可能とする手法を提案する。各電極を駆動するスイッチング IC のハイインピーダンスモードを利用し、電極間の距離を等価的に調整し、深部への電気刺激により力覚を、浅部への電気刺激により触覚を提示することを試みた。実験の結果、ハイインピーダンスモードによる深部刺激では浅部刺激に比べ、筋肉部分を刺激できることが確認された。

キーワード : 触覚, 力覚, 電気触覚, 筋電気刺激

1. はじめに

手は外部の物体を認識する際に重要な部分である。手における触覚（本稿では主に皮膚受容器由来の感覚を触覚と呼ぶ）は物体の形や物体表面のテクスチャを知覚することで物体を識別する手掛かりとなる[1]。また手における力覚（本稿では深部受容器由来の感覚を力覚と呼ぶ）は道具を扱う際に、物体から受ける圧力や振動を感知することで、物体を器用に扱うことを可能とする[2]。

近年、VR 環境における没入感向上のために触覚と力覚を提示する研究が数多く行われている[3][4][5]。その中でも電気刺激を用いた手法は、装着可能であること、低コストであること、機械的可動部が無いことといった特徴のほかに、皮膚電気刺激による触覚提示と、深部電気刺激による力覚提示を共に行えるという利点がある[6][7][8]。

一方で、電気刺激による触覚と力覚の提示は、従来別々の電極を用いて行われることが多かった。これはそれぞれの目的に対応した電気刺激の電極の特徴が異なることが理由である。電気刺激を用いた触覚提示技術では、物体の表面のテクスチャを表現するために、高い空間解像度の提示技術が必要とされている。高い空間解像度を提示するためには、皮膚との設置部分である電極の間隔を小さくする必要がある[6][7]。一方で電気刺激を用いた力覚提

示技術では、筋肉（あるいは腱）への深部刺激を行うため、刺激電流の到達深度を深くする必要がある。このためには電極の間隔を広げる必要がある[8]。

以上のように電気刺激では、触覚提示と力覚提示に必要な電極間の距離が異なるため、単一の電極アレイにより触覚と力覚を個別に提示する研究は限られていた。

本研究では同一の電極アレイを用いて皮膚と筋肉を独立して刺激することで、触覚と力覚の両方を提示する手法を提案する。そのために特定の電極をハイインピーダンスモードにする回路を新たに設計することにより、刺激に関与する電極ペアの間隔をリアルタイムに調整することを可能にする。

本報告では、刺激部位として母指球を選択した。母指球はヒトが道具を操作するうえで重要な役割を果たしており[9]、筋が存在することから触覚と力覚の提示が同時に言い得る部位であるためである。母指球への触覚・力覚提示により、VR 空間や遠隔操縦でものを操縦する際に、高品質な身体的なフィードバックを与えることが可能になると考えられる。

2. 提案手法

本研究では、電気触覚ディスプレイ（図 1）を用いて母

指球に対して刺激を行った。電気触覚ディスプレイはメイン基板と高電圧スイッチ群を持つスイッチング基板、刺激を提示するフレキシブル基板で構成される。メイン基板ではマイクロコントローラ (Seed Studio, XIAO ESP32S3) が PC からの信号を受け取り、D/A 変換器 (Analog Devices, AD5245) や昇圧回路などによって高電圧の信号が高電圧スイッチに送信される。高電圧スイッチ群は 8 個の HV513 (Microchip) と単一の 8 ビットシフトレジスタ (SN74LV595A) によって構成される。HV513 は Hi-Z 端子を LOW にすることで、すべての信号をハイインピーダンスモードにすることが可能である。8 ビットシフトレジスタは HV513 の Hi-Z 端子を制御し、HV513 は電極それぞれの刺激を制御している。フレキシブル基板は 64 点の電極で構成され、電極は 8×8 の格子状に配置されている。また、電極半径は 2 mm で、電極中心間の距離は 3.5 mm である。

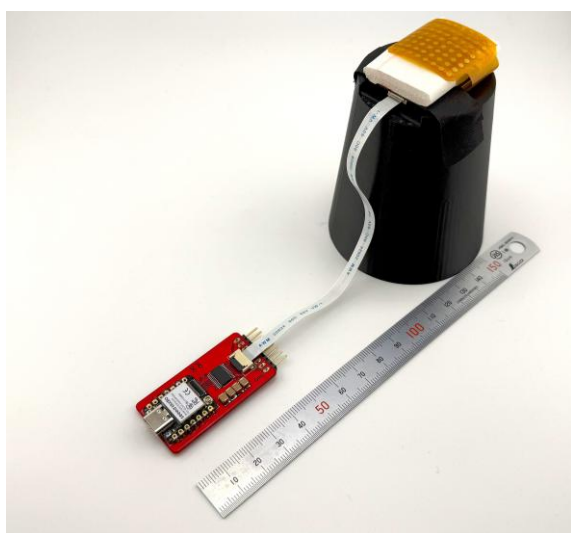


図 1 実験装置

ハイインピーダンスモードを用いて選択的に深部刺激を提示する手法はすでに提案されている[10]。本研究では HV513 の多チャンネルスイッチング IC のハイインピーダンスモードを用いて多数の電極に対して電流が流れていない状態を作ること、刺激される電極の間隔を調整することを実現した。1 列の電極を 1 つの HV513 が制御することにより、1 列すべての電極がハイインピーダンスモードにすることが可能になる (図 2)。

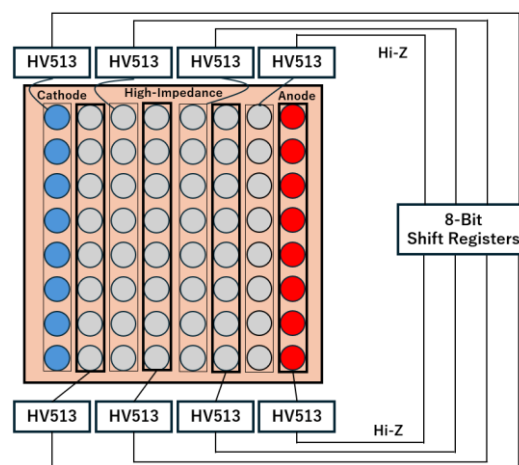


図 2 HV513 の電極制御

3. 実験

3.1 実験装置

前章で提案した装置を用いて、電気刺激を提示した。電気触覚ディスプレイは高さ 8 cm の ABS 製の固定台に載せた。これにより刺激する手の位置が机より高い位置に保たれ、母指球筋群が比較的弛緩した状態で実験を行うことができる。また電極の下に厚さ 6 mm のポリエチレン緩衝材を挿入することで、母指球との接触面積の偏りを無くした。

3.2 実験内容

本提案手法により、同一の電極を用いた電気刺激によって触覚と力覚を独立に提示できるか検証する実験を行った。実験の前半では触覚提示を目的とした刺激方法によって触覚が提示できること、および力覚が提示されにくいことを検証した。実験の後半では、力覚提示を目的とした刺激方法によって力覚が提示できること、および触覚が提示されにくいことを検証した。

3.2.1 触覚提示の検証

触覚提示を行えることを検証するために、電気刺激パターンが移動する刺激を行い、その移動方向を識別できるかどうかを評価した。電気刺激は単一の刺激点を陽極とし、他の全電極を陰極とする陽極刺激とした。刺激点を高速に走査することでライン状のパターンを提示し、このラインが移動する刺激とした。パルス幅は $60 \mu s$ で固定した。

被験者は男性 4 名、女性 4 名の計 8 名 (年齢 21 – 23 歳、全員右利き) であった。実験の前に、皮膚表面の水分による影響を減らすために、エタノール濃度 65 % の消毒用アルコールによって手を乾燥させた。被験者には図 3 のように母指球全体に刺激がいきわたるように装置の上に手を置いてもらった。

実験は被験者ごとに電流値のキャリブレーション、刺激パターンの提示、流れ方向検出タスク、アンケートの回答の順に行った。被験者ごとのキャリブレーションでは、4

方向のラインの移動方向からランダムに 1 つだけ提示し、痛みを感じず、かつ刺激を明瞭に感じるまで電流値を調整した。次に 4 種類の刺激を各 10 秒間提示した。提示刺激は格子状に配置された電極の端の 8 個の電極を用いた線状の刺激が、それぞれ 1) 左から右、2) 右から左、3) 上から下、4) 下から上 の 4 方向に動くものとした。それぞれの刺激では視覚情報は提示せず、電気刺激のみを提示した。流れ方向検出タスクでは、4 種類の刺激のうち 1 つを一度だけ提示し、流れた方向を口頭で観察者に伝えてもらった。各刺激 5 回、計 20 回の刺激をランダムに提示した。計 20 回の刺激後に、各被験者に対してリッカート尺度で 3 つの心理評価「Q1: 電気刺激の場所を感じたか」(1: 感じない - 7: 感じる), 「Q2: 電気刺激によって指が動いたような感覚が生じたか」(1: 生じない - 7: 生じた), 「Q3: 刺激による不快感が生じたか」(1: 生じない - 7: 生じた) を回答させた。実験終了後、被験者に自由にコメントをさせた。



図 3 母指球と電極の接触

3.2.2 力覚提示の検証

力覚を提示できることを検証するため、電気刺激の ON/OFF を交互に繰り返し、被験者に親指が電気刺激による筋収縮によって動くまで電流を上げさせた。

本実験で電気刺激を与える位置は図 4 に示した。2 章で述べたように、力覚提示を行う場合には陽極と陰極の間の電極をハイインピーダンスモードに設定する。これによってこれらの電極には電流が流れず、電流はより深部まで到達して筋刺激が実現されることが期待される。

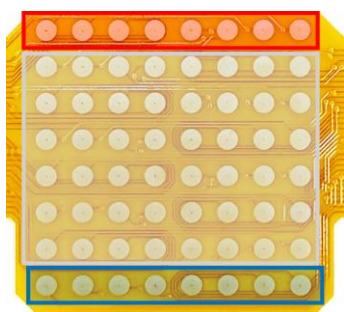


図 4 刺激電極（赤枠：陽極刺激、青枠：陰極刺激、灰色：ハイインピーダンスモード）

被験者は前項と同じ被験者グループであった。実験前の準備も前項と同様である。

4. 実験結果

触覚提示の実験結果を図 5 に示す。混同行列によって、正答率を表示した。横軸は被験者の回答で、縦軸が実際に刺激された方向を示している。触覚提示と力覚提示のそれぞれの手法による 3 つの心理評価の質問に対する回答を比較した結果を図 6 に示す。横軸は質問内容で、縦軸はリッカート尺度で提示された、それぞれの質問に対する値を示している。図 6 に対して、ウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、「Q2: 電気刺激によって指が動いたような感覚が生じたか」という質問について有意差が認められた($p = .001$)。「電気刺激の場所を感じたか」($p = .241$)、「不快感が生じたか」($p = .252$)という質問について、有意差は見られなかった。

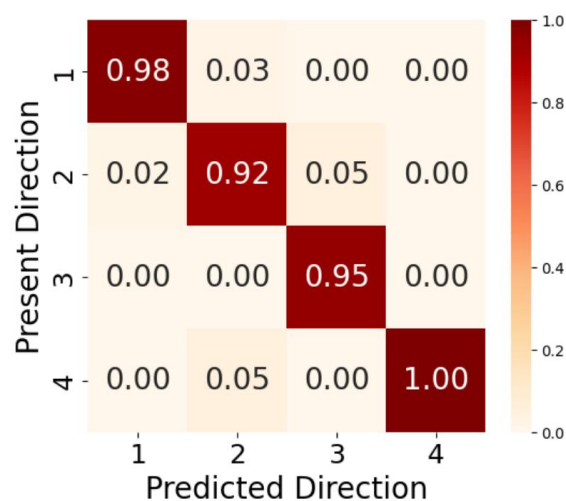


図 5 方向検出タスクの正答率

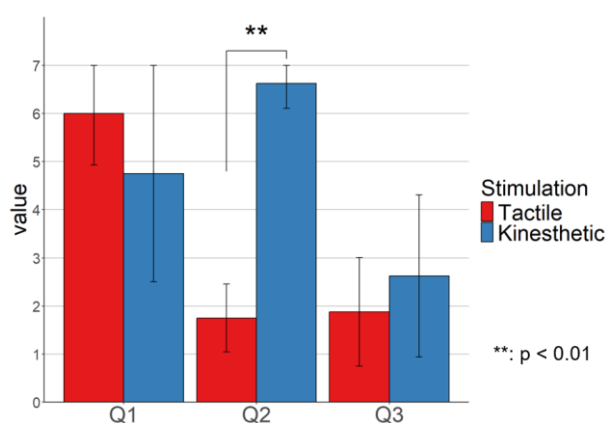


図 6 提示手法による心理評価の比較

5. 考察

触覚提示の検証実験では、4 つの方向提示すべてにおいて 90 % 以上の正答率が得られた。また、実験終了後に母指球以外に刺激がわたっていたかを被験者に確認したが、すべての被験者が母指球以外への刺激を知覚していなか

った。これらのことから、本実験で用いた装置は母指球の皮膚表面に対して、電気刺激を与えることで細かな触覚提示が可能であることが確認された。

力覚提示の検証実験では、すべての被験者において電気刺激による指の動きを確認することができた。実験終了後のコメントでは、3名の被験者から「親指の付け根あたりを押されるような感覚があった」というコメントが得られた。加えて、上記の3名以外の2名の被験者から「指の深いところに刺激が伝わった」というコメントが得られた。

2つの感覚提示手法による心理評価の比較では、電気刺激によって指が動いたような感覚が生じたかの心理評価についてのみ、力覚提示の評価が触覚提示の評価の評価より有意に高かった。このことから、従来の触覚提示手法で空間パターンを提示するのに十分な電流の刺激を行った場合には指の筋肉の刺激は行われていないのに対し、ハイインピーダンスモードを用いた電気刺激では指の筋肉に刺激を与えることが可能であることが示唆された。

今回の実験では2つの提示手法において、電気刺激の場所の明瞭さについて有意な差は見られなかった。この質問の意図は、力覚提示の場合に触覚を感じにくくなるのではないかと、という仮説を検証するためのものであったが、実際には力覚提示モードであっても触覚を明瞭に感じたために結果に差が無かったと考えられる。被験者からのコメントでは「刺激された場所の明瞭さは2つの提示手法で変わらなかった」、「触覚提示のほうがわかりやすかったが、力覚提示も刺激場所は感じた」というコメントが得られた。このことから、本実験では力覚提示の際に触覚提示と独立して提示できていなかったと考えられる。

本実験では、陽極と陰極を1列のみにし、それ以外はすべてハイインピーダンスモードに設定した。そのため、電極のサイズが深部刺激としては小さかったことから電気刺激の位置を比較的特定しやすかったのではないかと考えられる。

6. おわりに

本研究では、同一の電極アレイを用いて触覚と力覚を提示する手法を提案した。電極を陽極、陰極、ハイインピーダンスモードの3つに制御可能とすることにより、陽極と陰極の距離を調整可能とし、それによって浅部と深部の刺激ができるというものであった。2つの検証を行った。触覚提示の検証では、電気刺激の流れ方向を高い正答率で検出できていることが明らかになった。力覚提示の検証では、実験参加者全員が不快にならない範囲で指が動くことが確認された。心理評価では、指が動いた感覚では有意な差が得られたが、電気刺激の場所の明瞭さに関

しては有意な差はなかった。

今後は力覚提示での電流の値を時間によって調整し、刺激位置をより複雑にすることで触覚と力覚の両方をより独立して提示できるように検証を進めていく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP24K21321 の助成を受けたものです

参考文献

- [1] Eric R. Kandel et al.: カンデル神経科学, メディカル・サイエンス・インターナショナル, p.491-p.492
- [2] 栗田雄一: 力感覚の知覚メカニズム, システム/制御/情報, 2020 年 64 巻 4 号 p. 135-139
- [3] Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda: Ultrasound-Driven Passive Haptic Actuator Based on Amplifying Radiation Force Using Simple Lever Mechanism, SIGGRAPH Asia 2022 Emerging Technologies, No.: 11, Pages 1 - 2
- [4] Carolin Stellmacher, Feri Irsanto Pujianto, Tanja Kojic, Jan-Niklas Voigt-Antons, Johannes Schöning: Experiencing Dynamic Weight Changes in Virtual Reality Through Pseudo-Haptics and Vibrotactile Feedback, CHI '24: Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, No.: 421, Pages 1 - 13
- [5] Weikang Lin et al.: Super-resolution wearable electrotactile rendering system, Science Advances, Vol 8, Issue 36, 9 Sep 2022
- [6] Qiwei Xiong et al.: Virtual tactile feedback technology based on microcurrent stimulation: current status, challenges and future prospects, Frontiers in Neuroscience, Vol. 19, 2025, 09 May.
- [7] Kyeonghee Lim et al.: Interference haptic stimulation and consistent quantitative tactility in transparent electrotactile screen with pressure-sensitive transistors, Nature Communications, 15, Article number: 7147, 21 August 2024
- [8] Simin Yang et al.: A Comprehensive Survey of Electrical Stimulation Haptic Feedback in Human-Computer Interaction, Human-Computer Interaction, 30 Apr 2025
- [9] Toshihiko HOMMA, Tatsuo SAKAI: Hand Muscles Concerning Thumb Movement in Primates, Primate Research, Volume 8 Issue 1 Pages 25-31, 1992
- [10] Akifumi Takahashi et al.: Can a Smartwatch Move Your Fingers? Compact and Practical Electrical Muscle Stimulation in a Smartwatch, UIST '24: Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Article No.: 2, Pages 1 - 15