



電極アレイを用いた選択的電気刺激による屈曲感覚提示

稲生太一¹⁾, 望月典樹¹⁾, 中村壮亮²⁾

1) 法政大学 理工学研究科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, hge@hosei.ac.jp)

2) 法政大学 理工学部 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, hge@hosei.ac.jp)

概要: バーチャルな関節屈曲感覚を提示する方法の一つとして経皮電気刺激がある。しかし、ユーザー間での身体的・知覚的な個人差の存在や、電極の付け外しによる位置ずれの発生などにより、システムが意図する関節屈曲感覚を確実に提示することまでは実現できていない。そこで本研究では、スイッチング機能を有する刺激発生装置と電極アレイを開発し、位置選択的な刺激提示を可能とすることで、知覚の確実性向上を目指す。

キーワード: 体性感覚, 深部感覚, 経皮的電気刺激, バーチャルリアリティ

1. はじめに

1.1 バーチャルリアリティ

近年、バーチャルリアリティの一般的な普及が進み、様々な産業にも導入されている [1]。それに伴い、人工的にバーチャルな感覚をユーザーに与えるバーチャルデバイスも数多く開発されている。例を挙げると、視覚的なバーチャルリアリティを提供する VR ヘッドマウントディスプレイや、振動子などを用いて皮膚感覚を提示するデバイスなどが挙げられる。また、バーチャルな深部感覚を提示する手段についてもまた盛んに研究が行われている。

1.2 運動感覚とその受容器

深部感覚とは、四肢相互の位置関係や動き、四肢に加わる力などを検出する感覚である [2]。深部感覚の受容器は、筋肉、腱、関節に存在している。深部感覚の主な提示手段としては、振動刺激によるものと経皮的電気刺激によるものがある。著者らは深部感覚の中でも、四肢相互の位置関係や動きを検出する感覚（以下：運動感覚）に着目した。

運動感覚に働きかける受容器の中で特に重要な働きを担っているのが、筋紡錘とゴルジ腱器官である。筋紡錘は筋線維の内側に平行に分布している筋長センサである。筋紡錘が筋肉の伸展を検知し興奮すると、Ia 群線維と呼ばれる知覚神経により脊髄に伝達され脳へと伝えられる。この興奮は筋肉の伸展の程度と伸展速度に比例しており、この効果で関節がどういった運動をしているのかを認知することができる。一方、ゴルジ腱器官とは筋と腱の接合部にあたる膠原線維束の中に分布している筋長力センサである。膠原線維はコラーゲンから成り、筋肉が引き伸ばされることでゴルジ腱器官が興奮し、Ib 群線維を通して脊髄から脳へと伝達されて運動を知覚する。 [3][4]

1.3 バーチャルな運動感覚提示に関する先行研究

Goodwin ら [5] は肘に対して振動刺激を与え運動錯覚現象を生起させる研究を行った。肘の運動に関する主要な筋肉である上腕二頭筋及び上腕三頭筋に対して刺激を与えるため、肘の腱の皮膚上に振動刺激を提示し、生起した錯覚をもう一方の腕で模倣して評価した。その結果、実際に肘が曲がるという錯覚が生起していることがわかった。

また、同様の振動刺激による手指に対する運動錯覚の誘引に関する研究として、梅沢ら [6] は総指伸筋、示指伸筋に対して振動刺激の提示を行い、人差し指の屈曲錯覚の生起を試みた。振動刺激を示指伸筋に提示することで、示指伸筋が伸張したと知覚し、結果として被験者は指が屈曲したという感覚を認知した。このとき、手首から先を完全にリラックスさせた状態で振動刺激を提示し、錯覚生起率、錯覚生起に要する時間、錯覚の明瞭性、錯覚角度を評価した。この実験では振動周波数 50~150Hz でほぼ 100%に近い確率で高い明瞭度の屈曲感覚の生起を確認した。

電気刺激を用いた運動錯覚の生起に関する研究として、梶本ら [7] の研究がある。これは、肘に対して電気刺激を提示し運動錯覚の生起を試みたものである。彼らはゴルジ腱器官を刺激するため、上腕二頭筋及び上腕三頭筋の腱に対して電気刺激を提示した。電流制御された 100Hz の矩形波を被験者自身が 0~20mA の間で調整しつつ刺激した結果、三頭筋側の電極を陰極としたときに、肘関節が内側へ屈曲する運動錯覚の生起を確認している。

さらに、Gandevia ら [8] は電気刺激を用いて、手指に対して深部錯覚の生起を試みた。彼らは、神経の束を横切る刺激はより軸索の太い神経を優先的に興奮させる [10] という性質に基づき、手首のシワから 1~3cm の位置を背側と掌側で挟み込むようにして尺骨神経に対して電気刺激を行った。その結果、幾つかの被験者で第二指から第五指の屈曲錯覚など、手指の運動錯覚が生起したのを確認した。

Taichi INO, Noriki MOCHIZUKI, Sousuke NAKAMURA

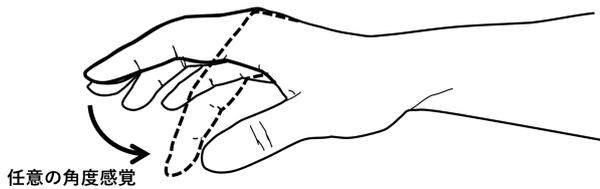


図 1: 提示するバーチャルな感覚

1.4 電気刺激の利点及び課題

受容器は刺激を受けると発火（興奮）し電気信号が発生する。発火により生じた電気信号が神経細胞を介して脳へと伝達され知覚する。生体電気刺激は外部から電圧を印加することで神経細胞を発火させる。その発火によって生じた信号が伝達されることで人工的に感覚を生起させたり、運動神経を発火させ筋肉を収縮させたりすることが可能である。また、電気刺激には極興奮の法則と言うものがあり、電流が電極に流れ込むところ、つまり陰極側の神経細胞に興奮が生じる。

経皮的電気刺激による感覚提示は、振動刺激に比べてハードウェアの設計が比較的容易になり、メンテナンスや交換の手間も少ないという利点がある。しかし、現在電気刺激を用いて任意の運動感覚を指定した位置に正確に提示することは困難である。そこで、著者らは任意の運動感覚を正確にユーザーに提示することができるシステムの開発を目指している。

2. 研究目的

著者らは、経皮的電気刺激を用いて任意の運動感覚を正確に提示するにあたって、ユーザーごとの身体の寸法差により、同じ条件で刺激しても生じる感覚に差異が生まれてしまうことが課題だと考えている。そこで、アレイ電極を用いてユーザーごとに適切な位置を刺激することで身体寸法の個人差を吸収する手法を提案する。本稿では手法の実現可能性の基礎検討として、提示する感覚を右手人差し指の MP 関節に対する屈曲感覚を対象とする。

3. バーチャルな運動感覚の提示システム

3.1 概要

本研究では、知覚の確実性向上のため、リラックスした状態の手指に対して電気刺激を提示し、図 1 に示すような、人差し指 MP 関節の屈曲感覚を任意の角度で生起させることを目指す。

研究に際して、ディスプレイ電極（F-150S：日本光電）を用いた予備実験を実施したところ、別々の被験者に対して同一条件下で刺激提示したにも関わらず、まったく別の感覚を生じた。これは、被験者ごとに手指のスケールや内部構造の個人差が影響していると考えられる。これらのユーザ間の身体寸法差によって生じる感覚の差異を解消するために、本研究ではアレイ化した電極を使用し、各被験者に対して適切な刺激提示位置を決定するシステムを構築する。

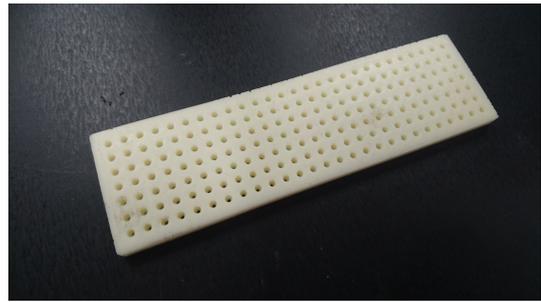


図 2: シリコンにて作成した電極バンド

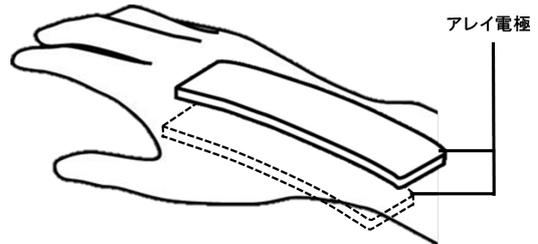


図 3: アレイ電極の貼り付け方法

3.2 アレイ電極

本稿では、ユーザー間で生じる感覚の差異を解消するためにアレイ電極を使用する。アレイ電極はユーザーの身体に沿わせられるように、柔らかいシリコン樹脂を用いて図 2 に示す電極バンドを作成し、電極挿入用に 2[mm] 間隔で空いたポケットに直径 2[mm] の電極を通して作成する。また、刺激対象となる受容器は皮膚表面と比べて比較的深部に分布しているため、アレイ電極は図 3 のように示指 MP 関節から手首にかけて、掌側と背側を挟み込むように貼付する。その際、アレイ電極内の各電極と皮膚表面の間には導電性ゲルを塗布して皮膚に吸着させる。

3.3 電気刺激生成装置

本研究で作成する電気刺激生成装置の構造を図 4 に示す。本稿で重要となるのが、選択的電気刺激を行うためのスイッチングモジュールである。コンピューターにてユーザーごとの最適な刺激位置を決定し、スイッチングモジュールにて対象の電極に電気刺激を提示する。

また、梶本ら [9] が作成した電気刺激装置を参考にして作成した定電流源生成回路を図 5 に示す。使用する電気刺激は電流制御された矩形波を使用し、電流値を 1~5mA に変化させながら刺激を行う。矩形波の周波数については 100~1000Hz、パルス幅を 100[μs]~1[ms] に変更しながら行う。上記条件の試行を、皮膚上に貼付したアレイ電極内のいくつかの刺激位置に 10 秒間提示して実験を行う。

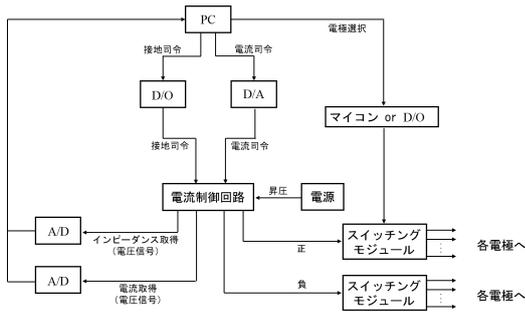


図 4: 電気刺激生成装置の構造

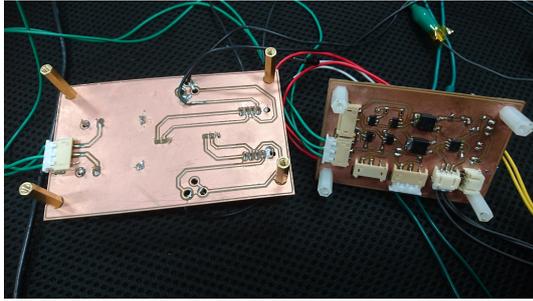


図 5: 定電流源生成回路



図 6: アームレスト

3.4 手指の固定

手指の固定については、示指の屈曲方向への運動が阻害されないように作成したアームレスト(図6)を使用し、初期姿勢をおおよそ一致させるように、手本となる手指の画像を模倣した状態で力を抜くように指示して実験を行う。

4. バーチャルな屈曲感覚の評価

屈曲感覚の評価は以下のとおり行う。被験者には刺激提示対象となる右手の人差し指に知覚された角度を、左手の人差し指を用いて再現させる。そのときの関節角度を計測することにより、評価を行う。

5. まとめ

本稿では、電気刺激による運動感覚提示の際にユーザー間の身体寸法差によって生じる感覚の差異を解消するための手法として、アレイ電極による選択的電気刺激を提案した。今後は、刺激装置と電極アレイの作成を完了させた後、任意の運動感覚提示が可能なシステムの詳細を構築していく予定である。

参考文献

- [1] 野嶋琢也, 星野洋: バーチャルリアリティの産業応用, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol. 9, No. 4, pp. 348-354, 2007
- [2] 日本バーチャルリアリティ学会編: バーチャルリアリティ学, 工業調査会, pp. 40-45, 2010
- [3] H.Frick, H.Leonhardt, D.starck.: 人体解剖学ハンドブック 1, 西村書店, pp. 239-260, 2000.
- [4] 内藤栄一: 身体運動像の獲得に体性感覚入力果たす役割-ニューロイメージング研究から-, バイオメカニズム学会誌, vol. 31, No. 4, pp. 178-186, 2007.
- [5] G.M.Goodwin, Mccloskey, P.B.C.Matthew:The contribution of muscle afferents to kinesthesia by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents, Brain, Vol. 95, No. 4, pp. 705-748, 1972.
- [6] 梅沢侑実, 土井幸輝, 藤本浩志: 振動刺激による人差し指屈曲錯覚の生起と錯覚特性, 人間工学, Vol. 52, No. 2, pp. 88-95, 2016.
- [7] 梶本裕之: 腱電気刺激を用いたハプティクスインターフェース, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 17, No. 2, pp. 401-404, 2012.
- [8] S.C.Gandevia, Erlanger.J: The role played by the sizes of the constituent fibers of a nerve trunk in determining the form of its action potential wave, American Journal of Physiology, Vol. 80, No. 3, pp. 527-547, 1927.
- [9] 梶本裕之: 触原色原理に基づく電気触覚ディスプレイ, 博士論文, 2004.