

手部筋肉への機能的電気刺激による 指先に対する触覚提示

Geometric Relief Presentation to the Fingertip by
Using Functional Electrical Stimulation to the Hand Muscles

宇戸和樹¹⁾, 岡崎龍太²⁾, 佐藤未知^{2),3)}, 福嶋政期^{2),3)}, 梶本裕之^{2),4)}

Kazuki UDO, Ryuta OKAZAKI, Shogo FUKUSHIMA, Michi SATO and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 人間コミュニケーション学科

(〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1, udo@kaji-lab.jp)

2) 電気通信大学 総合情報学専攻

(〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1, {okazaki, shogo, michi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

3) 日本学術振興会特別研究員 4) 科学技術振興機構さきがけ

Abstract: Geometric relief presentation techniques for touch screen have been proposed, but these techniques require large-scale equipment. In this study, we aim to present geometric relief by using FES (Functional Electrical Stimulation) device attached to the hand. Produces horizontal force by the FES drives a finger that touches the surface. It generates skin sensation and muscular contraction similar to that occurs when tracing the actual uneven surface by the finger.

Key Words: Haptic, Interface, Wearable, Geometric Relief, Functional Electrical Stimulation

1. はじめに

現在、指先に対して触覚を提示するための様々な手法が提案されており、テクスチャ・凹凸・形状や力覚などの触覚提示手法が研究されている。特に、近年のスマートフォンの普及によりタッチパネルを操作する機会は劇的に増えている。これに伴い、誤入力・誤操作の防止や、はさむ・つまむなどの繊細な操作の補助を目的とした指先への触覚 (=皮膚感覚+力覚) フィードバックの必要性が明らかになった。

タッチパネルにおいて指先に皮膚感覚をフィードバックする先行研究の一例として福本らの ActiveClick[1]が挙げられる。これは、ディスプレイそのものが振動することで、指先にあたかもクリックしたような触覚を与えるものである。現在、振動を用いた皮膚感覚提示は、スマートフォンなどで実用化されており、我々にとって最も身近な手法とも言える。

これに対して、タッチパネルにおいて指先へ力覚をフィードバックする研究の一例としては、嵯峨らによる 2.5 次元触覚ディスプレイ [2] が挙げられる。

しかし、これらの手法ではタッチパネル側に何らかの提示装置が必要となる。特に力覚に関してはモータを用いるため、実装が大掛かりになるという問題点が存在する。

そこで、本研究では図 1 に示すように、手部に電極を

つけ、筋肉へ機能的電気刺激を行うことにより指の水平運動を発生させる触覚提示法を提案する。この刺激で指の運動方向に対する反発力を生み出し、指先の皮膚変形を起こすことで、間接的に触覚提示を行うというものである。本手法では手部に対する電気刺激を用いるため、指ぬきグローブのような形態での提供が可能であると考えられる。デバイスへの装着を必要としないため、任意デバイスを簡便に触覚付きのデバイスとすることができると考えられる。

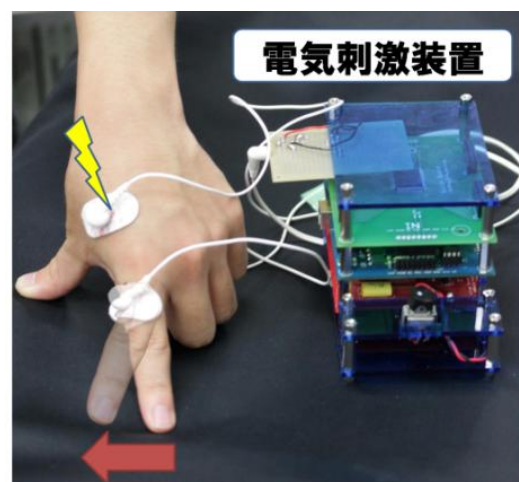


図 1: 電気刺激装置

2. 提案手法

2.1 機能的電気刺激とその応用

ヒトの筋肉に対する電気刺激は FES (Functional Electric Stimulation:機能的電気刺激) と呼ばれ、マッサージなどを目的とした低周波治療、アスリートの筋力増強、リハビリテーション等を目的として用いられている。

藤田らは、この機能的電気刺激がヒューマンインタフェース分野で有効であり、その応用先としてバーチャルリアリティやナビゲーションが考えられることを示した[3]。また、稲見らは機能的電気刺激を用いた仮想体感装置[4]を開発し、バーチャル空間における力覚提示を可能にした。そして、玉城らは前腕部に存在する指駆動筋を選択的に駆動させ、指の垂直方向の動き制御を可能とした[5]。

これらの手法では前腕部に対するある程度大掛かりな電気刺激装置が必要となる。これに対して本手法では、将来的な指めきグローブでの実装を視野に入れ、手部への電気刺激による実装を検討した。我々は手部に存在する人差し指の背側骨間筋へ電気刺激を与えることで、指が垂直方向でなく水平方向への駆動が可能であるという点に着目した(図 2)。本研究の目的は、この水平方向への駆動をタッチパネルに応用することで、様々な触感覚を生成することである。

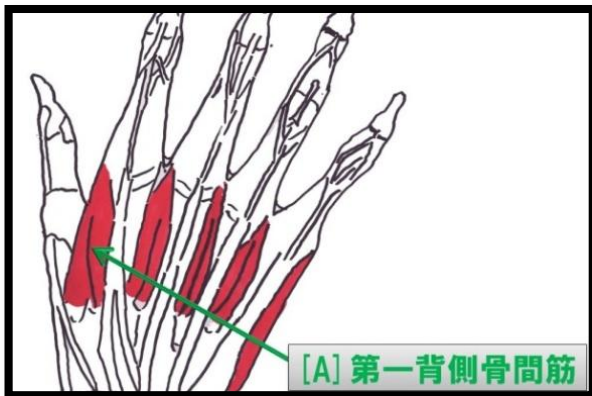


図 2：手部筋肉の配置図

2.2 筋肉駆動による凹凸形状の再現

人間が凹凸形状を知覚する際には、指の位置感覚よりも、知覚する反力が優位に立つことが知られている[6]。

そこで本提案では、筋収縮による指の水平方向の駆動を用いて、図 3 のように指の運動方向に対して反発する力を生じさせ、指先皮膚の変形を起こすことで(図 4)、指先は平面に触れた状態でありながら凸面を知覚できるのではないかという仮説を立てた。



図 3：提案手法を用いた触知覚の原理

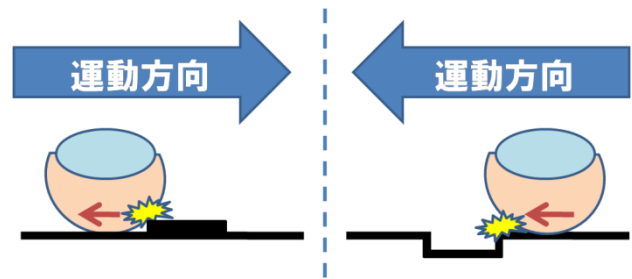


図 4：凹凸面での指の変形

3. 実験

3.1 電気刺激装置

手部筋肉に対する選択的刺激を行うために電気刺激装置を制作した。制作した装置は、パルス幅と電流値をパラメータとして筋肉を制御する。諸元については以下の表 1 に示す。これらの値は市販の EMS (低周波治療器) に用いられる JIS 規格に準じている。

表 1：電気刺激装置の基本仕様

基本仕様	
AC電源電圧	15V
電圧値	0-150V
パルス幅	0-20ms 刻み幅0.1ms
電流値	0-20mA 刻み幅0.1mA
USB	Serial通信

3.2 電気刺激による指の駆動

著者自身の手で予備実験を行った結果、人差し指の第二関節と第三関節の中間付近に信号電極(陽極)、第一背側骨間筋(図 2 における A の筋肉)の直上に接地電極(陰極)を配置することで筋を収縮させ、人差し指を水平方向へ制御することが可能であることが判明した(図 5)。今後の実験ではこの電極配置を用いることとした。

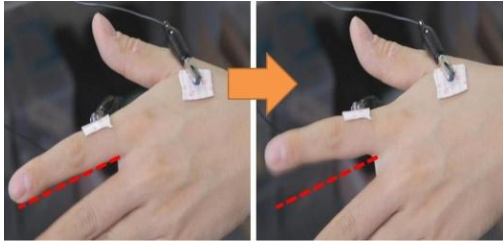


図 5：提案手法による指の駆動

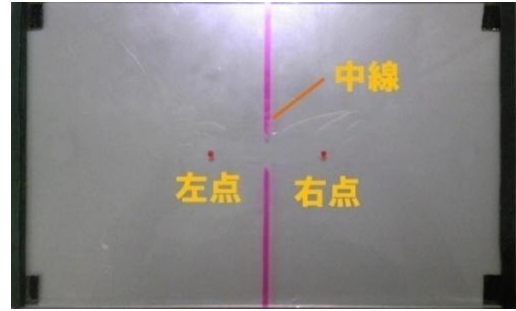


図 6：実験に用いたアクリル板

3.3 実験概要

まず、制作した電気刺激装置を用いて指の水平方向の運動が生起する事を確認するための実験 1 を行った。

次に、2.2 節で立てた仮説のもと、アクリル平面上を指でなぞっている際に電気刺激を行い、その際に被験者がどのような感覚を得るのかを検証する実験 2 を行った。

これらの実験は 3 名の被験者(男性 3 名, 21 歳)を対象に行い、左手の人差し指を用いて行った。被験者は全員右利きである。

3.4 実験 1

3.4.1 実験条件

人差し指の第二関節と第三関節の中間付近の信号電極(陽極)と筋肉直上の接地電極(陰極)では、接地電極側の位置が筋駆動に特に寄与していると考えられる。筋肉の位置や皮膚の厚みには個人差があるため、接地電極の位置を被験者ごとに調整した。この実験では、人差し指で机を下側から押し上げてもらい、その際に膨らんだ位置を筋肉の位置と定義し、そこに接地電極を貼りつけた。

3.4.2 実験手続き

電流のパルス幅を $600 \mu s$ に固定し、電流値を $0-8mA$ の範囲で $0.5mA$ ずつ、被験者が痛みを感じない限界の値まで上昇させ、これによって指先が視覚的に駆動するかを確認した。駆動しなかった場合は、接地電極の位置を微動させ、指先が視覚的に駆動するまでこの試行を繰り返した。

3.4.3 実験結果

実験 1 の結果、電気刺激によって被験者全員の左手人差し指が、水平方向へ駆動することが確認できた。

3.5 実験 2

3.5.1 実験条件

実験には、右点、中線、左点が存在するアクリル板(図 6)を用いた。右点と左点の距離は $60mm$ とした。実験 2 は視覚情報による結果への影響を考慮し、試行を閉眼状態で行った。また、指を動かすスピードを統制するために、メトロノームの音に合わせて、指を動かしてもらうこととした($100 mm/s$)。この速度は実験者による予備実験で触知覚が生じやすかった速度である。

3.5.2 実験手続き

試行を行う前に、電子秤を用いて被験者ごとの押付力を統一した。統制は、軽く平面に指を押し付ける程度のものである $50-100g$ を目安に、電子ばかりの値を見ながら押付力を調整させ、指先を左から右へ動かす動作を 5 回練習させることで行った。

その後被験者は、そのまま目を閉じ、左点から右点へ、左手人差し指を動かす動作を 5 回行った。被験者の指がアクリル板の中線に差し掛かったときに、実験者の操作により電気刺激を与えた。電気刺激の強度は、実験 1 で被験者の指が駆動したときの電流値を使用した。その後、凹・凸・平面のうちから、被験者がどれに最も近い感覚を得たかを選択させた。次に、被験者に対し「得た知覚について詳しく教えてください」と問い、自由回答を得た。これを 1 試行とし、被験者あたり 4 試行を行った。また指を右点から左点へ動かす試行についても、同様に 4 試行を行った(図 7)。

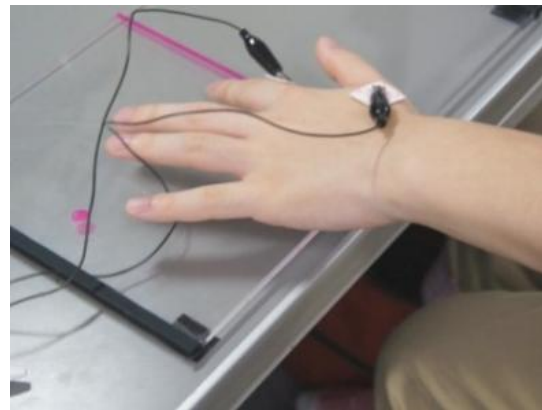


図 7：実験風景

3.5.3 実験結果

被験者の知覚評価と内観報告を表 2 に示す。

結果から、3 名全ての被験者が平面のみの知覚とは感じず、何らかの変形を知覚しているということが判明した。この実験では電気刺激によって指は右に動く。このため事前の仮説によれば、左から右に運動している最中の触覚は凹に、右から左に運動している最中の触覚は凸に感じるはずであった。しかし、ほとんどの試行において押し込んだ

感覚（凹感）を得ていることがわかった。また、内観報告より、指が障害物に衝突し反発したような水平方向の力覚を得ているということも判明した。

表 2：実験 2 の結果

	試行	結果	試行	結果
被験者A	左→右	平	右→左	平
		凸		凹
		凹		凹
		凹		凸
	試行	結果	試行	結果
被験者B	左→右	凹	右→左	凹
		凹		凹
		凹		凹
		凹		凹
	試行	結果	試行	結果
被験者C	左→右	平	右→左	凹
		凹		平
		凹		凹
		平		凹
自由記述				
被験者A	<ul style="list-style-type: none"> - 指の側面に触覚を得ている - クリック感のようなもの - 凸面とは感じ無かった - 衝撃を感じる 			
被験者B	<ul style="list-style-type: none"> - つっかかり（壁のような）を感じたがそれだけで凹凸を判断できない - 特に右から左へ動かしたときに感じやすかった 			
被験者C	<ul style="list-style-type: none"> - 落とし穴に落ちた感じ - 皮膚感覚は平面だから不思議 - 右から左へ動かすとき、なにかつつかかり（障害）があった 			

4. 考察

得られた結果から、凸面を知覚した被験者は少なく、多くの試行で凹面の知覚を得ていることがわかる。凸面を知覚できなかった理由として、今回は指の動きが減速するのではなく、指が実際に動かされてしまっていたことが挙げられる。つまり受動的な「ブレーキ」よりも、むしろ能動的な「引き込み力」が想起され、それが凹面の皮膚感覚として知覚されたということが考えられる。また意図しない指の駆動を反射的に抑えようとして皮膚の接地面積が増え、押し込んだ感覚を得ているということが考えられる。

さらに、電気刺激によって深部の筋肉を駆動させると、同時に表皮の感覚神経も刺激されるため、指全体（特に感覚神経が存在する指の側面全体）に触覚を得てしまい、それが指先部の知覚を妨げると共に、「衝突感」の知覚を生

じたものと思われる。逆に言えば本手法は、電気刺激による皮膚感覚提示と力覚提示を同時に行いうる手法と見ることも出来る。「指が障害物に当たったような、つかかりを感じた」という内観報告は、指に力覚が生じていると解釈でき、本手法により力覚の提示が可能であることが示唆された。

今後は指先が凹面を知覚することに対する機序の解明と同時に、本研究が力覚提示を行う手法としても応用可能であるかを検討してゆく。

5. おわりに

本稿では、電気刺激により指を駆動させ、運動方向と反対向きの力を生み出すことで指先の皮膚変形をうながし、凸面を知覚できるのではないかと仮定のもと実験を行った。

しかし、得られた結果は、凸面よりも、むしろ凹面を知覚しているものが大半であった。また、内観報告より「なにか障害物に指が当たって反発したような知覚がある」という興味深い結果を得ることができた。

これらの結果をもとに今後は生じた知覚の機序を解明すると共に、皮膚感覚・力覚同時提示の可能性について検討する。

参考文献

- [1] Masaaki Fukumoto, Toshiaki Sugimura: ActiveClick: tactile feedback for touch panels, CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems, 2001.
- [2] 嵯峨 智, 出口 光一郎: タッチパネルインタフェースにおける剪断力による 2.5 次元触覚提示についての検討, 第 5 回力覚の提示と計算研究会, 2010.
- [3] 藤田欣也: 電気刺激による筋収縮を利用した力覚呈示法の検討, ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, No. 11, pp. 329-334, 1995.
- [4] 稲見 昌彦, 川上 直樹. 仮想体感装置 特開平 07-020978. 1995-01-24.
- [5] Emi Tamaki, Takashi Miyaki and Jun Rekimoto: PossessedHand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli, ACM CHI2011, paper, May 7-12, 2011.
- [6] Gabriel Robles-De-La-Torre, Vincent Hayward: Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch, Nature, vol. 412, pp. 445-448, 2001.