

電気刺激による指関節への力覚の提示

ヤエム ヴィボル¹⁾, 梶本 裕之¹⁾

1) 電気通信大学 情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {yem, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: 電気刺激は、筋肉や力覚の受容器を刺激することで腕・手首関節の運動の制御や力覚提示が可能であることが知られている。これに対して本研究では、指腹の広い面積に電気刺激を行った際に、関節に外力を与えられる感覚が生起する現象を報告する。この力覚は、指を屈曲側に曲げる感覚のため、粘着感の再現などに応用できることが期待される。

キーワード: 電気刺激, 力覚, 指, 粘着感

1. はじめに

VR 環境中の物体を触る反力の感覚を再現するため、指にロボットアーム機構などを装着して力覚を提示する方法が数多く提案されている[1][2]。しかしこうした手法は物理的な力を発生させるためのアクチュエータが必要となるため、機構が複雑、大型化するなどの課題がある。

こうした問題を解決する手段として、電気刺激によって力覚の受容器を直接刺激し、力の感覚を生起させる方法が提案されている[3][4]。しかしこれらの手法では、肘や手首への感覚提示のみ行われており、指関節や指先における力覚の提示は行われていなかった。

本研究では、我々の発見した、電気刺激によって指関節に外力を与えられる感覚及び指の運動感覚が生起する現象を調査する。この力覚は、指を屈曲側に曲げられる感覚のため、図 1 に示すように、粘着感の再現などに応用できると考えられる。

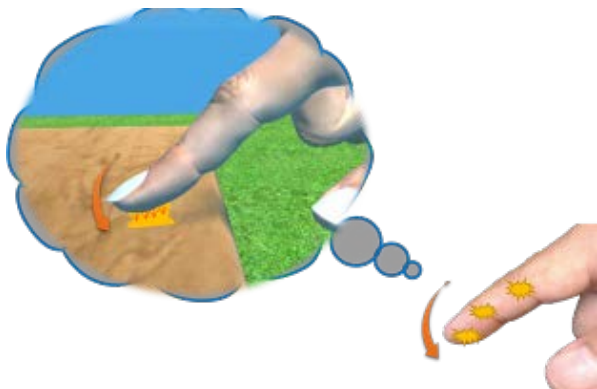


図 1: 電気刺激による指を屈曲側に曲げる感覚の提示と粘着感再現応用の例。

2. 関連研究

2.1 力覚に関する受容器

力覚は、筋・腱・関節に存在する受容器によって知覚されていると考えられている。この受容器には、筋紡錘(筋受容器)、ゴルジ腱器官(腱受容器)、関節受容器の 3 種類が存在する[5]。

筋紡錘(筋受容器): 筋肉の収縮状態を感受する器官であり、筋肉の伸縮の長さや変化率の情報を受容し、深部感覚に寄与する。

ゴルジ腱器官(腱受容器): 外力や筋自体の収縮により神経インパルスが発生し、筋収縮の強度をモニタしていると考えられる。

関節受容器: 関節の動きによって刺激される受容器であり、知覚には直接関与しないとされる。

2.2 電気刺激の力覚ディスプレイ

電気刺激によって力覚を生成する手法は主に 2 つに分類される。第一の手法は筋電気刺激(EMS: Electrical Muscle Stimulation)であり、筋肉を刺激することでアクチュエータとして利用し、これによって力覚を生じさせ、また関節角を制御するものである。リハビリテーションの分野では機能的電気刺激(FES: Functional Electrical Stimulation)として知られているが、ヒューマンインタフェースとしても多数利用されている [6][7]。

第二の手法は腱への電気刺激であり、前述の力覚に関与する受容器、すなわち人のセンサを直接刺激することで、外力や運動錯覚を生じさせるものである。Gandevia [3]やKajimoto [4]は、それぞれ電気刺激によって手の運動錯覚が生じることを報告している。

3. 実験

3.1 目的

人差し指に電気刺激を与える際、力覚や運動錯覚が生じるかどうか、またその力と運動の方向を調査する。評価方法は、生じた感覚をリッカート尺度のアンケートによって行う。

3.2 装置

電流を制御するために、電気刺激キット(図2)[8]を使用した。本装置は、マイクロコントローラ(Mbed LPC1768, NXP社製)のシリアル通信でパソコンと送受信可能となり、パソコンのキーボードで電流の出力を0 mA ~ 10 mAの範囲で調整できる。今回は2枚の電極(NPP40222, BODYMED社製)を使用した。陽極の電極(15 mm × 15 mm)を人差し指の指先、陰極(グランド)の電極(50 mm × 50 mm)を手の甲に貼った(図3)。電流のパルス幅は200 μs、刺激周波数は40 Hzとした。この刺激によって指を動かす腱が刺激され、力覚を生じることを期待した。

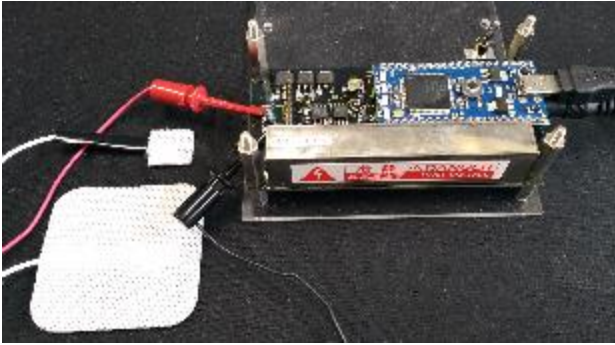


図2: 電気刺激キットと2枚の電極。



図3: 人差し指の指先と手の甲に貼った陽極と陰極の様子

3.3 被験者と手順

被験者は21歳~23歳の5名(男性4名, 女性1名, 全員右利き)であった。

実験の様子を図4に示す。被験者は椅子に座り、電極を

右手の人差し指と手の甲に貼り付け、手を机に置き、指の力を抜くこととした。以下の3項目の質問を行った。

- ① 指が曲げられる力を感じるか? どの方向に曲げられるか? (0: 全く感じない - 4: 強く感じる)。
- ② 指が動いたような運動感覚があるか? どの方向に動いたか? (0: 全く動かない - 4: 良く動くように感じる)。
- ③ (皮膚感覚に関する質問) 指先の指腹に与えられる力を感じるかどうか (0: 全く感じない - 4: 強く感じる)。もし感じるとしたら、それは皮膚を引っ張る力か、吸い込む力か、それとも押される感覚か。

電気刺激を1 sごとに繰り返して提示し、刺激を明瞭に知覚できるまで電流を強くするようにさせた。その後、上記の各質問に対して回答させた。



図4: 実験の様子

3.4 結果

図5に実験結果のグラフに示す。縦軸はリッカート尺度として表した各被験者が知覚した強度であり、マイナス方向は指の屈曲側、プラス方向は指の伸展側に力や運動を感じたという回答を表す。横軸は3つの質問項目を表す。

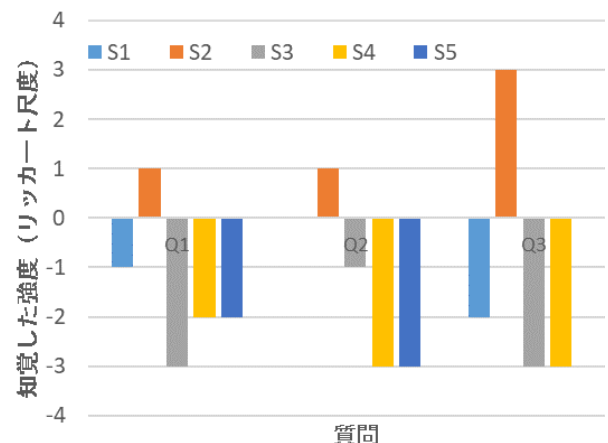


図5: 各質問における被験者が知覚した強度

3.5 考察

図5に示すように、すべての被験者は指が曲げられるように感じたことが分かった(質問①)。5名の内1名(被験者S2)は、力覚の方向を伸展側と回答し、4名は屈曲側

と回答した。この1名の被験者は、当初質問①と②を回答した際には屈曲側と回答していたが、皮膚感覚に関する質問③を聞いた後に知覚が逆方向となり、実験を再開しても伸展側のままになった。この被験者は、指先に押される方向の触覚（圧覚）を知覚し、その解釈によって指に加わる力に関する質問への回答を変えたものと考えられる。この質問③については、残る4名中3名は指が引っ張られる、ないし吸い込まれると感じたが、1名は分からなかったと答えた。

質問②について、4名の被験者は指の動きを知覚し、その動く感覚の強さをリッカート尺度で回答したが、指の動く角度そのものについては大きくないとコメントした。1名は指の移動を感じなかった。

指を駆動する筋肉は掌と腕にあることが知られている。すなわち、今回行った電気刺激では、筋肉の中に存在する筋紡錘を刺激したとは考えにくく、ゴルジ腱器官または関節受容器を刺激したものと考えられる。

一方で指腹に貼った電極は手の甲に貼った電極よりも小さく、かつ触覚に関しては陽極の電気刺激でも生起することが知られているため、指腹の皮膚感覚の受容器も刺激したと考えられる。このとき、単純に圧覚受容器を刺激したとすれば圧迫されたと感じるはずであるが、前述の力覚が指の屈曲方向に生じているために、その力覚との整合性を保つために皮膚が吸い込まれる方向の触覚という解釈が生じたと思われる。このことから提案手法は粘着感などを再現可能であることが期待できる。

4. おわりに

本研究では、電気刺激を用いて指に力覚を提示する方法を提案した。人差し指の指腹に陽極、手の甲に陰極で電気刺激を行うと、屈曲側に力覚と移動錯覚及び、指腹の皮膚感覚が生じることを確認した。今後、振動子による機械刺激を併用して粘着感の再現を行う予定である。

謝辞 本研究は JST-ACCEL 身体性メディアプロジェクト (JPMJAC1404) および JSPS 科研費 15H05923 (新学術領域研究「多元質感知」) の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] T. Yoshikawa, T. Endo, T. Maeno, H. Kawaski, "Multi-fingered bimanual haptic interface with three-dimensional force presentation." 9th International Symposium on Robot Control (SYROCO'09), pp. 811–816, 2009.
- [2] K. Akahane, J. Hyun, I. Kumazawa, M. Sato, "Two-Handed Multi-finger String-Based Haptic Interface SPIDAR-8." Springer, Touch and Haptic System, pp.109-147, 2013.
- [3] S. C. Gandevia, "Illusory movements produced by electrical stimulation of low-threshold muscle afferents from the hand," Brain, vol. 108, no. 4, pp. 965-981 Dec. 1985.
- [4] H. Kajimoto, "Illusion of Motion Induced by Tendon Electrical Stimulation." Proc. of World Haptic Conference (WHC'13), pp. 555-558, 2013.
- [5] 大山正, 今井省吾, 和気典二: 新編 感覚・心理学ハンドブック, 誠信書房出版社, pp. 1185–1186, 1994.
- [6] E. Tamaki, T. Miyaki, J. Rekimoto, "PossessedHand: techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli.", Proc. of Human Factors in Computing Systems, pp.543-552, 2011.
- [7] P. Lopes, D. Yuksel, F. Guimbretiere, P. P. Baudisch, "Muscle-plotter: an Interactive System based on Electrical Muscle Stimulation that Produces Spatial Output." Proc. of User Interface Software and Technology (UIST'16), pp.207-217, 2016.
- [8] H. Kajimoto, M. Suzuki and Y. Kanno, "HamsaTouch: tactile vision substitution with smartphone and electro-tactile display," Proc. of Human Factors in Computing Systems, Extended Abstract (CHI EA'14), pp. 1273-1278, 2014.