



電気刺激を用いた牽引感提示の検討

Pilot Study of Presenting Pulling Sensation by Tactile Electrical Stimulation

中山翔太¹⁾, 真鍋光希²⁾, 牛山奎悟²⁾, 宮上昌大²⁾, 高橋哲史²⁾³⁾, 梶本裕之²⁾

Shota NAKAYAMA, Mitsuki MANABE, Keigo USHIYAMA, Masahiro MIYAKAMI, Akifumi TAKAHASHI, and
Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学域

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, nakayama@kaji-lab.jp)

2) 電気通信大学院 情報理工学研究科

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {manabe, ushiyama, miyakami, a.takahashi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

3) 日本学術振興会

概要：指で把持している物体が牽引された時，皮膚受容器及び深部受容器により牽引力が知覚される．一方，電気刺激によって皮膚受容器をある程度選択的に刺激することが可能であることが知られている．本稿では電気刺激を用いて受容器の活動パターンを模擬することで，あたかも牽引されているような疑似力覚を生み出す手法を提案し，検証結果を報告する．

キーワード：力覚・体性感覚，電気刺激，牽引力錯覚，疑似力覚

1. はじめに

旅行先で街なかを散策するような場面でポータブルなナビゲーションシステムは欠かせない存在になっている．しかしながら現在普及しているナビゲーションシステムの多くは視覚または聴覚を必要とすることから，使用者は周囲への注意が散漫になり危険を察知できなくなるという問題がある．そこで他の感覚を用いて直感的にナビゲートを行うシステムが研究されてきた．触覚を利用したナビゲーションシステムとして例えば雨宮ら[1]や暦本ら[4]はおもりを非対称な加速度で振動させることで，あたかも手が牽引されているような錯覚を生じさせる手法を提案し，今ら[2]は，ハンガー反射と呼ばれる身体の不随意回旋現象を利用して誘導する手法を提案した．触覚を利用したナビゲーションシステムの他に，例えば Pfeiffer ら[3]は，大腿部に筋電気刺激を行い歩行方向を変化させナビゲーションする手法を提案した．

一方で従来の研究で提案されてきた手法は，利便性と静音性の両立が難しいという課題が挙げられる．例えば前述の非対称振動は多くの場合静音性に欠ける．電気刺激により誘導する手法は静音性に優れるが，電極の貼付が必要であり把持型に比べて利便性が低下する．

我々は，静音性と利便性の二点を両立させる方法として，電気刺激を利用した把持型のデバイスにより疑似力覚を提示することを提案する．本稿では，つまんだ物体がある方向に牽引される際の皮膚受容器の活動パターンを電気刺激で模擬することにより，特定の方向の疑似力覚を生起させることが可能であるか検証する．

2. 電気刺激装置

電気刺激は，Kajimoto ら[5]の電気刺激装置を用いて行った．電気刺激装置は電流量や刺激パターンを決定する制御部（図 1 (a)）と電極およびスイッチング回路から構成される刺激提示部（図 1 (b)）に分かれている．制御部は PC と USB 通信により接続されている．

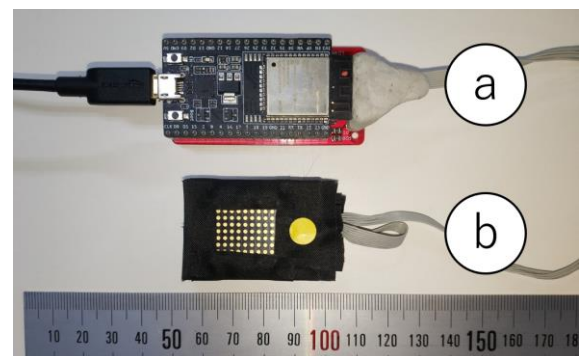


図 1 電気刺激装置 ((a) : 制御部, (b) : 刺激提示部)

刺激提示部は，今回把持した 2 本の指（親指および人差し指）の両方に刺激がなされるように，プラスチック製ボディの表裏にそれぞれ電極基板を貼り付けている（図 2 (a), (b)）．1 枚の電極基板には 63 点の円形電極（直径 1.4mm）を縦 7 点，横 9 点，2mm 間隔の格子状に配置した．制御部からの信号によりスイッチング素子 HV513（Microchip Technology 社製）を駆動し電極をスイッチングすることで，任意の点に刺激を提示することが出来る．刺激提示部の寸法は 4cm × 3cm × 1cm，重量は

17gであり、電極部の寸法は17×13mmである。表面には識別用の黄色い○印が付けられている。

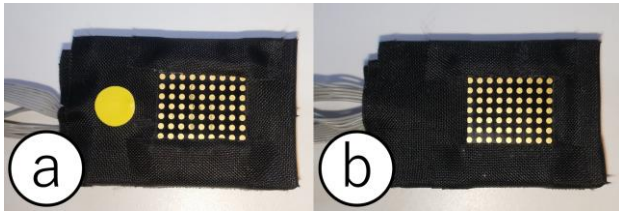


図 2 刺激提示部 ((a) 表面, (b) 裏面)

3. 牽引力錯覚を生起する刺激パターンの検討

指腹の表皮付近にはマイスナー小体とメルケル細胞と呼ばれる機械受容器が存在し、前者は物体との接触や表面のテクスチャ感の知覚に関与し、後者は圧覚に関与することが知られている[6]。また電気刺激に関しては、マイスナー小体は陽極刺激、メルケル細胞は陰極刺激によって刺激されやすいと考えられている[7]。陽極刺激とはある一点の電極から周囲の電極に向かって電流を流す刺激であり、陰極刺激とは反対に周囲の電極からある一点の電極に向かって電流を流す刺激である。これらの報告から電気刺激による知覚について、次の二点が考えられる。

- ・物体に指が押し付けられている間、メルケル細胞は継続的に活動する。よって継続的な陰極刺激によって物体に指が押し付けられている感覚を提示できる。
- ・物体に指が接触・離脱する際、マイスナー小体は短期的に活動する。よって短時間(~100ms程度)の陽極刺激は、物体との接触・離脱感を提示できる。

これらの考察から、錯覚を生起させたい方向の電極で主に陰極刺激を行うことで電極から指に対する力を提示し、両面の電極で刺激の開始時と終了時に陽極刺激を短時間提示することで速度感(ただしこれ単独では方向はわからない)を提示可能だと考えた。電極裏面から表面に向かう方向の錯覚を生起させるための刺激パターンを図3に示す。横軸は経過時間、縦軸は電極に流す電流の指令値(以降指令電流と呼ぶ)である。正の指令電流は陽極刺激、負の指令電流は陰極刺激を示している。

刺激する電極を図4に示す。黒塗りされた点が刺激を行う点である。表面裏面共に同じ点を刺激する。PCのプログラムの都合ですべての電極を秒間60回(60 pulses per sec (pps), 13.3ms周期)刺激を行っている。今回刺激点を間引いたのは、電気刺激装置がUSBバスパワーで駆動されており、全点を継続的に刺激するには電力が不足しているためである。また一周期13.3msの間に表裏の全電極を刺激することが難しいためでもある。(電極一点の刺激に200usかかるため、表裏126点をスキャンしながら提示するには25msかかる)

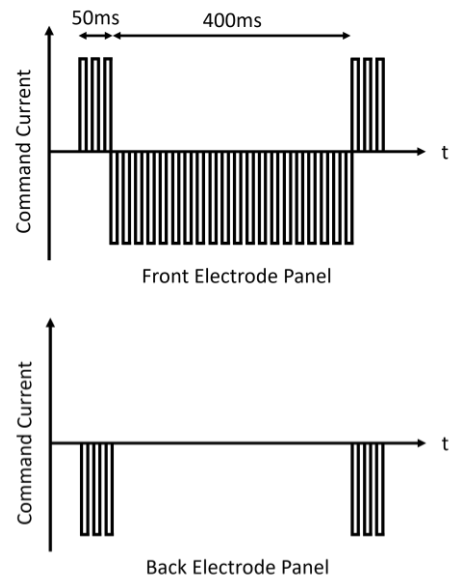


図 3 提案する刺激パターン(上図:表面, 下図:裏面) 正, 負の指令電流はそれぞれ陽極刺激, 陰極刺激を表す。

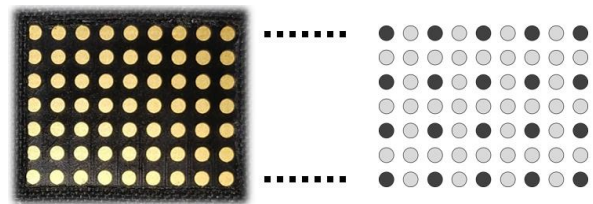


図 4 刺激する電極(黒塗りされた箇所が刺激点)

図3のパターンは次のような狙いで牽引力錯覚を生じよう設計されている。

- ・**刺激開始~50ms**
刺激提示部が裏側の指を押し、表側の指に接触する。
 - ・**50ms~450ms**
刺激提示部が裏側の指から離れ、表側の指に押し付けられる。
 - ・**450ms~500ms**
刺激提示部が表側の指から離れ、裏側の指に戻る際の反動が生じる。
- 以上から、本刺激パターンにより電極裏面から表面に向かう方向の牽引力錯覚が生起すると考えた。

なお陰極刺激と陽極刺激を組み合わせることで接触感やエッジ感を表現する手法はSatoらによって提案、実装されている[8]。今回の手法はこの方法を二本の指で把持した状況で援用し疑似力覚を生起させる試みであると言える。

4. 実験

4.1 実験概要

21歳~27歳の男性10名(著者を4名含む)が実験に参加した。本実験は指先への電気刺激によって意図した方向の牽引力錯覚を生起させることが可能か検証するこ

とを目的とした。

4.2 実験環境

実験環境を図 5 に示す。被験者を机に正対するように座らせ、右手に刺激提示部を持たせる。この時刺激提示部は表面 (図 2 (a), 黄色い○印が付けられた面) を人差し指、裏面を親指で把持し、指腹が電極部にしっかりと触れるように指示した。また実験中、指に汗をかくと電気刺激は弱くなってしまう[9]ため、被験者には適宜、汗を拭きとるよう指示した。



図 5 実験環境

4.3 実験手順

4.3.1 刺激に用いる電流量の調整

実験担当者は被験者に刺激提示部を把持するよう指示し、両面に陰極刺激を提示しながら徐々に指令電流値を、痛みを感じるまで上げた。その後指令電流値を下げ、被験者が不快に感じない最大の指令電流値になるよう調整した。また実験で利用する刺激パターンを、被験者には実験用の刺激パターンであることを伝えずに提示し、不快感を生じないことを確認した。

4.3.2 力感覚を生起する方向の検証

図 3 に示した刺激パターンは、本実験条件において前側 (人差し指側) に疑似力覚を生起させることを意図したものである (以降前方向刺激と呼ぶ)。さらに、表側の電極と裏側電極の刺激パターンを入れ替えることで、後ろ側 (親指側) の刺激 (以降後方向刺激と呼ぶ) を提示可能である。これら二種類のどちらかの刺激パターンを提示し、「牽引力」を感じる向きを前後の強制 2 択で回答させた (錯覚が生起しない場合も同様に回答をさせた)。回答するまでの間、同じ刺激パターンを 500ms のインターバルを設け 1 Hz の周波数で繰り返した。以上の試行を各パターンで 10 回ずつ、計 20 回ランダムに繰り返した。

また試行中は被験者にはピンクノイズを流したヘッドホンを装着してもらい、目を閉じるよう指示した。これにより聴覚と視覚の条件の統制を行った。

4.3.3 アンケート

被験者に以下の質問を 5 段階リッカート尺度 (1 : 全くそう思わない, 5 : とてもそう思う) で回答させた。

- ・直感的な牽引力を感じたか (牽引感)
- ・内側から押されているように感じたか (押され感)

- ・内側から吸い付かれているように感じたか (吸着感)
 - ・刺激の違いをはっきり感じたか (刺激の違い)
- その後、実験の感想を口頭で自由回答させた。

5. 実験結果

5.1 力感覚を生起する方向の検証

実験結果を図 6 に示す。縦軸は前方向・後方向刺激の正答率の全体平均を表しており、エラーバーは標準誤差である。被験者ごとの散布図を図 7 に示す。横軸は前方向刺激、縦軸は後方向刺激の正答率 (それぞれ我々の意図通りの牽引感を感じたと回答した割合) を百分率で表したものである。点の重なりは濃淡で表しており、4 名の被験者が前後ともに 100% の正答率で回答した。

表 1 は正答率に対して、チャンスレート (50%) との差について t 検定を行った結果である。

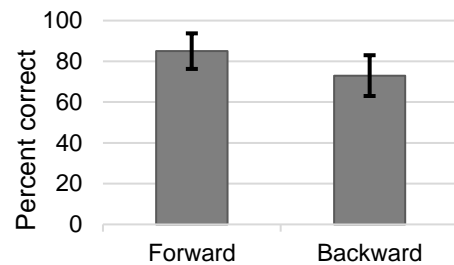


図 6 力感覚生起方向についての実験結果

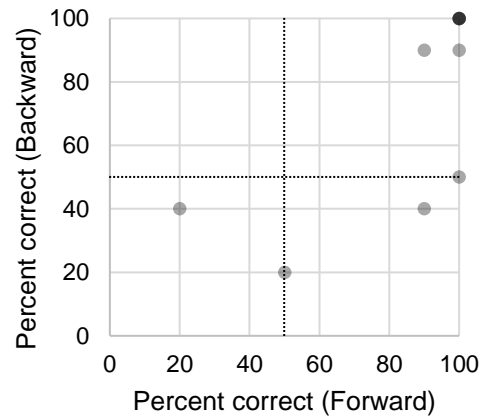


図 7 力感覚生起方向についての散布図

表 1 正答率の検定結果

	t(10)	p-value
Forward	4.012	0.003
Backward	2.299	0.047

5.2 アンケート

4.3.3 で行った実験結果のスウォームプロットとバイオリンプロットを図 8 に示す。横軸は質問内容、縦軸は回答をリッカート尺度 (1 : 全くそう思わない, 5 : とてもそう思う) でプロットしたものである。破線は四分位数である。

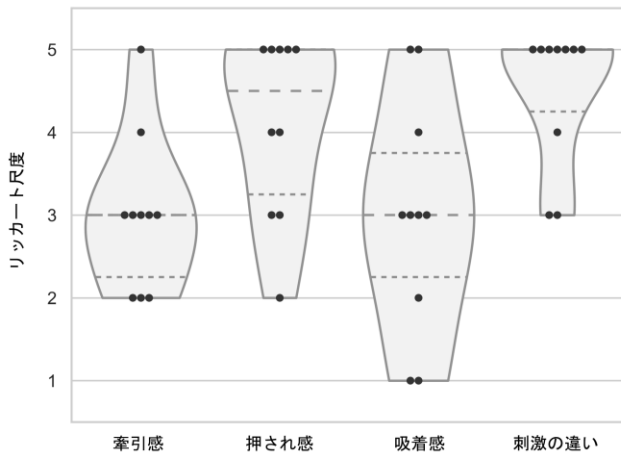


図 8 アンケート結果

6. 考察

6.1 力感覚を生起する方向

図 7 をチャンスレートである 50% で区切る (図中破線) ことで、被験者は右上、右下、左下の 3 グループに分けられる。例えば右上に分布する被験者は我々の意図と同じ方向の力感覚を生起したと考えられ、右下に分布する被験者は前方向刺激について我々の意図と同じであるが、後方向刺激については逆向きに解釈したと考えられる。左下に分布する被験者は前後どちらの刺激も逆向きに解釈したと考えられる。左上に被験者が分布していない理由は、親指が人差し指よりも電気刺激を感じる閾値が高いことが挙げられる。被験者の中には親指に刺激をあまり感じないと報告する者がいた。また、今回使用した電極基板では親指の指腹を完全に覆うことが出来なかったため、現実との乖離が生じた可能性も考えられる。

表 1 より、前方向刺激、後方向刺激の正答率はともにチャンスレートに対し有意差が見られた。このことから、力感覚は生起したと考えられる。

6.2 力感覚の質

図 8 より、力感覚の質は内側から押されているように強く感じた被験者が最も多かった。牽引されているように強く感じた被験者が少なかった事は、牽引感の提示は皮膚感覚の再現のみでは不十分である事を示していると考えられる。実際に把持している物体を牽引するときは指先の関節が動くことから、指先に関係する筋紡錘やゴルジ腱器官も適切に刺激する必要があると考えられる。また、押され感を強く感じた被験者よりも吸着感を強く感じた被験者が少ない事が読み取れるが、これはホロウマスク錯視[10]と呼ばれる錯視現象にもみられるように、圧覚を凹面よりも凸面に知覚するバイアスがかかっているためであると考えられる。

7. おわりに

本稿では電気刺激を用いて物体把持時の受容器の活動パターンを模擬することで、あたかも法線方向に牽引さ

れているような疑似力覚を生み出すと考えられる手法を提案し、意図した方向に疑似力覚を生起させられるか検証した。また、生起する力感覚の質について確認を行った。その結果、提案手法では指腹に対し垂直方向の疑似力覚を生み出すことに成功したが、力感覚の質は主に牽引感ではなく内側から押される感覚であることが分かった。今後の展望としては、より強い牽引錯覚を生み出す刺激パターンについて検討し、また実験条件の統制について改善する事でより詳細なデータを得ていく。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP18H04110 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Amemiya, H. Ando and T. Maeda, "Virtual Force Display Direction Guidance using Asymmetric Acceleration via Periodic Translational Motion," World Haptics Conference 2005, pp. 619–622, 2005.
- [2] Y. Kon, T. Nakamura, H. Kajimoto, "HangerON: A Bely-Type Human Walking Controller Using the Hanger Reflex Haptic Illusion," ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, Article 10.
- [3] M. Pfeiffer, T. Dünz, S. Schneegass, F. Alt, M. Rohs, "Cruise Control for Pedestrians: Controlling Walking Direction using Electrical Muscle Stimulation," CHI '15, pp. 2505–2514.
- [4] J. Rekimoto, "Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation," in Proceedings of ACM Symposium User Interface Software and Technology (UIST2013), 2013, pp. 427–432.
- [5] H. Kajimoto, "Electro-Tactile Display Kit for Fingertip," in IEEE World Haptics Conference 2021 Work-in-Progress, 2021.
- [6] A.B. Vallbo and R.S. Johansson, "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation," Human Neurobiology, Vol. 3, pp. 3–14, 1984.
- [7] V. Yem, H. Kajimoto, "Comparative Evaluation of Tactile Sensation by Electrical and Mechanical Stimulation." IEEE Trans. on Haptics, Vol. 10, No. 1, pp. 130–134.
- [8] K. Sato and S. Tachi: Design of Electrotactile Stimulation to Represent Distribution of Force Vectors, Proceedings of IEEE Haptics Symposium 2010, pp. 121–128, Waltham, Massachusetts, USA (2010.3)
- [9] K.A. Kaczmarek, Mitchell E. Tyler, and Paul Bach-y-Rita, "Electrotactile haptic display on the fingertips: preliminary results," Proc. 16th Int. Conf. IEEE Eng. Med & Bio Soc, (Baltimore), pp. 940–941 Nov 1994
- [10] R.L. Gregory, "Knowledge in perception and illusion," 1997, Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci 352, 1121–1127.