



指側面への電気刺激による疑似力覚提示 (第 2 報)

Pilot Study on Presenting Illusory Force Sensation by Electrical Stimulation to Lateral Surface of the Finger (II)

中山翔太¹⁾, 牛山奎悟¹⁾²⁾, 梶本裕之¹⁾

Shota NAKAYAMA, Keigo USHIYAMA, , and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 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, {nakayama, ushiyama, kajimoto}@kaji-lab.jp

2) 日本学術振興会

概要: 我々はこれまで、指側面の皮膚変形が指先への力の知覚に貢献していることを踏まえ、指先側面への電気刺激により外力により押されているような感覚を生起させることを試みた。その結果、疑似力覚を生起することはできたものの、その向きを制御することは困難であった。この問題を解決する手法として、本稿では指中節の甲側に電極を追加することで、より明瞭に方向弁別を実現する手法を提案する。また、物体把持時の重さ感覚に指側面への電気刺激が与える影響についても検証を行った。

キーワード: 感覚・知覚, 力覚・体性感覚, ウェアラブル, 電気刺激

1. はじめに

VR や AR 分野において、触覚フィードバックはインタラクティブな体験の品質向上において重要である。その中でもウェアラブルな触覚提示手法は、利便性の面から注目され、これまで多くの提案がなされてきたが[1], 外から加えられるような力感覚を提示することは、反作用による力を知覚してしまう事から難しいという課題がある。この問題を解決する提案として、皮膚感覚による錯覚現象を利用して疑似的な力覚を提示する手法が数多く提案されている。

代表的な手法の一つは非対称振動を用いるものである[2-5]。おもりを振動させる際に、順方向には素早く、逆方向には遅く駆動することで、振動子を把持した手が順方向へ連続的に牽引されているような錯覚を生じさせることができる。もう一つの代表的な手法は皮膚の圧迫を用いるものである[6, 7]。皮膚の圧迫を提示するために、爪付近に配置された二つのモータによって指腹をベルトで締め付け、指腹を押されている、または指が横滑りしている感覚を提示する手法が代表的である。しかしながら前者の非対称振動を用いる方法は手全体に広がるような比較的強い振動感覚を伴い、また後者の方法は比較的大きな機構を指周辺に装着する必要がある。

我々はこれらの課題を克服する手法として、指先装着型の電気刺激デバイスにより疑似力覚を提示することを提案する。本手法では疑似力覚の提示に小型の電極を用いる

ため、手全体に伝わるような振動感はずらず、かつ小型化が容易である。

本手法の提案にあたり、我々は指側面の変形に注目した。指腹に力を加える時、指腹は変形するが、このとき爪と接触面の間で指が圧縮されるため、接触面である指腹だけでなく、指側面も変形する。Birznieks ら[8]は、爪周辺の機械受容器が指腹に掛かる力の向きに対応して活動していることを報告している。つまり指先の力知覚において、指側面の変形が重要な役割を果たしていると考えられている。

一方で電気刺激は、機械受容器へと繋がる神経を刺激することで触覚を生起していると考えられている[9]。よって指側面への電気刺激を行うことで指側面の機械受容器を活動させ、疑似的に外から加えられるような力手がかりを生じさせることが可能であると考えられる。

我々は前報で、指側面へ配置した電極を介し指内部を貫くように電流を流すことで、力感覚を生起させる手法を提案し、10 名中 9 名で力感覚が生起していることを確認した[10]。しかしながら、力の向きを制御することは困難であった。その原因は、力の向きを判断する手掛かりとして重要であると期待される、指側面の左右を選択的に刺激することが困難であったためと考えられる。そこで本稿では、指先側面に配置された電極に加え、指中節の甲にゲル電極を配置することで、指側面を選択的に刺激可能な手法を提案する。また、力手がかりの大きさについて定量的に検証するため、物体把持時の重さ感覚に提案する電気刺激手法

が与える影響について、心理物理実験により測定を行う。

2. 電気刺激装置

2.1 デバイス構成

電気刺激装置の構成を図 1 に示す。本装置は電圧昇圧や刺激タイミングの調整を行う制御回路と、指先に電気刺激を行う指先デバイスからなる。指先デバイスはゲル電極及び押しバネを用いたクリップから成り、図 2 のように右手親指及び中指に装着する。電極は 2mm 間隔で 3×4 のマトリクス状に並んだものが両側に配置されており、それぞれ短絡して一つの電極として機能している。これは十分な接触面積を確保するためである。制御回路に搭載されたスイッチング回路により、無接続、陽極、陰極の 3 状態に設定可能である。ケーブルを除いた指先デバイスの総重量は 22g である(ゲル電極を含む)。

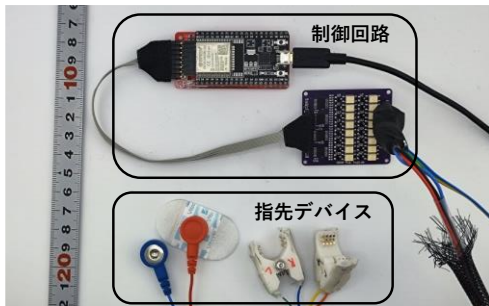


図 1 電気刺激装置

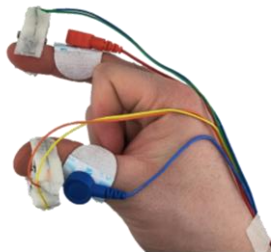


図 2 装着方法

2.2 電気刺激パターン

電気刺激パターンを図 3 に示す。指中節に配置したゲル電極を陽極、クリップ側電極の内片側を陰極とすることで、指の中を貫くように電流が流れる。予備的検討により指全体に広がるような刺激を生起することなくクリップ電極の周辺のみを刺激することが可能であることを確認した。その理由としては、クリップ電極との距離があまり遠くないことから正中神経へと電流が漏れにくくなったことや、ゲル電極は電流密度が低く、かつ手の甲は掌よりも電気刺激を知覚しづらい[11]ことが考えられる。類似の現象として、手の甲への電気刺激により掌のみへの刺激が可能であることが報告されている[11]。

なお、ゲルクリップ電極間の極性を反転させた場合(クリップ側を陽極にする場合)、よりも鋭い刺激を生起する傾向にあるため、今回の刺激パターンには含めていない。

なお、指側面への陰極刺激は圧覚に近い感覚を生起し、押されているように知覚することで力感覚として解釈可能であると考えている。陰極刺激が圧覚を生起するという現象は既に知られており、Yem ら[9]は、陰極刺激が主に圧覚を生起していることを報告している。

図 4 は、電気刺激を行うタイミングを表している。各指は 5ms 毎に幅 200us のパルスで刺激し、中指と親指の間には 500us の遅れを設定している。これは両指の間で電流が流れることで意図せぬ感覚が生起することを防ぐためである。

予備的検討として、被験者 3 名(22~26 歳、うち著者 1 名を含む)に対し、提案する電気刺激パターンが生起する感覚について回答させたところ、全員が左右側面の刺激を判別できていることが確認された。

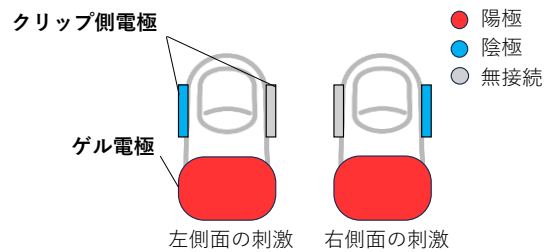


図 3 電気刺激パターン

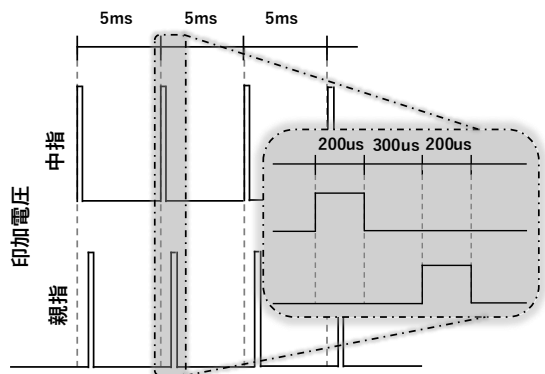


図 4 電気刺激を行うタイミング

3. 実験: 重さ感覚への影響

本実験では、指側面への電気刺激がもたらす力感覚の大きさを検証するため、物体把持時の重さ感覚に提案する電気刺激手法が与える影響について、恒常法により主観的等価点を求めることで調査した。

3.1 実験条件

22 歳の男性被験者 1 名が参加した。標準刺激は 3 種の電気刺激条件(図 5)付きの 200g の錘、比較刺激は電気刺激条件無しの 100~300g の錘を 25g 刻みで、計 9 種類用意した。1 種類の比較刺激に対して 20 回試行を行い、試行順序はランダムとした。

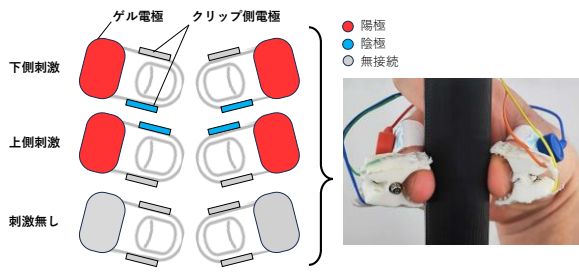


図 5 電気刺激条件

3.2 実験環境

実験環境を図 6 に示す. 台の上に $\phi 32\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円筒型把持部を立て, その下に錘を吊るした. 錘の重量は把持部や糸と合わせて設定した重量になるよう調整した. 比較刺激の錘は 25g 錘を用いて重さを変化させる. 基準刺激の錘は 200g 錘の下にアルミ箔を用いたスイッチ機構が存在し, 錘が持ち上がる期間にのみ電気刺激が行われるよう設定した.

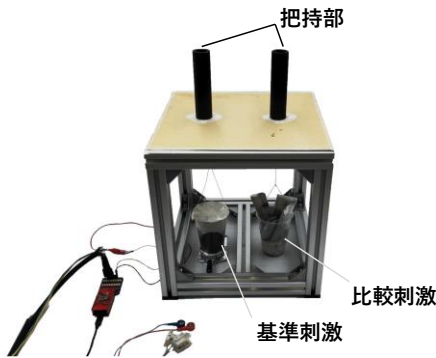


図 6 実験環境

3.3 実験手順

3.3.1 電気刺激強度の調整

被験者に指先デバイスを装着させ, 指それぞれの刺激(親指・中指及び左側面刺激・右側面刺激の計 4 種)について, 「痛覚を生起せず, かつ激しい振動感覚が生起しない」範囲内で最大まで電気刺激強度を上げた. その後, 上側刺激, 下側刺激の 2 条件間で主観的な刺激強度が同じになるように電気刺激強度を下げた. この設定値を以降の実験で用いた.

3.3.2 恒常法による主観的等価点の調査

各試行で, 被験者に左右の把持部を静かに真上に持ち上げることで, 重さを確認させた. このとき, 腕の自己受容感覚による影響を抑えるため手首を台に接触させた. また, 持ち上げる順序や確認回数, 時間には制限を設けなかった. その後, 口頭で左右のどちらがより重く感じたかを回答させた.

4. 結果

結果を図 7 に示す. フィッティングカーブはロジスティック回帰によるものであり, 着色領域は 95% 信頼区間で

ある. 主観的等価点は下側刺激条件 270g, 上側刺激条件 266g, 刺激なしでは 197g と求まった.

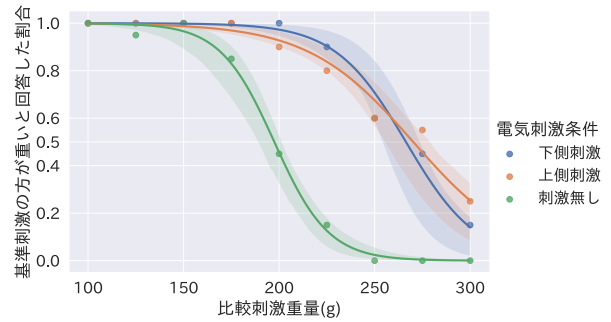


図 7 実験結果

5. 考察

5.1 同程度に小型な疑似力覚提示手法との比較

図 7 について, 刺激なし条件の主観的等価点はほぼ 200g であったのに対し, 下側刺激, 上側刺激共に 270g 程度であったことから, 今回の被験者についてはどちらの電気刺激条件も重さをより大きく知覚していることが確認された. 比較的コンパクトな振動子を非対称振動させることで疑似力覚を生起する手法[12]では, 最大 0.6N 程度の力を生起させることが知られていることから, これらの手法と同程度の力感覚を, 指腹を阻害することなく生起可能であることが示唆された.

5.2 触覚手がかりとしての指側面の利用可能性

また, 提案手法は指側面の機械受容器へとつながる求心性線維を刺激していると考えられることから, 人は物体把持時の重さ知覚において, これらの機械受容器を手掛かりとして使用している可能性が示唆された. このことから, 力感覚を始めとした, より高品位な触覚提示システムの実現には, 対象物と接触している境界面だけでなく, その周囲に存在する皮膚領域についても再現することが重要であると考えられる.

5.3 下側刺激が物体の重さ感覚軽減に寄与しない理由

2.2 において我々は, 「指側面への陰極刺激が圧覚に近い感覚を生起し, 押されているように知覚する」と仮説立てた. しかしながら, 下側刺激条件が把持物体の重さ知覚をより軽くするような現象は見られなかった. この原因として, 考えられる要因は以下の 3 点である.

5.3.1 基準刺激の重量が重すぎたため, 軽さを知覚することが困難であった

非対称振動の研究では, 比較的小型である振動子型でのみ上方向への牽引力錯覚が生起することが報告されている[13]. このことから, 200g と重い重量が上方向の錯覚を妨げている可能性が考えられる. しかしながら, これだけではより重く知覚するようになる理由の説明が困難であるため, 他の要因も存在すると考えられる.

5.3.2 他の体性感覚の方がより重さ感覚に対する寄与率

が大きかった

今回の実験では、被験者の手首を机と接触させていたことから、手首周辺の圧覚が重さ知覚のに寄与していた可能性がある。しかしながら、こちらもより重くなる現象への説明は困難である。

5.3.3 指側面への電気刺激がもたらす解釈の不一致

指腹の変形がきっかけで指側面が変形する場合を考えた時、指の下側は指腹の垂れ下がりによって圧縮される。一方、直接指側面が押された場合も同様に圧縮されることから被験者の解釈によって力の向きが変化すると考えられる。

6. おわりに

本稿では、前報よりも左右側面の選択的な刺激が行いやすい刺激方法を提案した。また、力手がかりの大きさについて定量的に検証するため、物体把持時の重さ感覚に提案する電気刺激手法が与える影響について、心理物理実験により測定を行った。その結果、指側面への刺激は先行研究である非対称振動による疑似力覚提示手法と同等の力感覚を生起可能であることが示された。

今後の展望としては、被験者数の増員による、より正確な主観的等価点の調査を行うと共に、既存の指腹装着型の触覚提示ディスプレイとの組み合わせによるより高品位な触覚の提示可能性について調査する。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 JP20K20627 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi, M., Frisoli, A., Hayward, V., Prattichizzo, D., “Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 4, pp. 580–600, Oct. 2017, doi: 10.1109/TOH.2017.2689006.
- [2] Amemiya, T., Ando, H., Maeda, T., “Virtual force display: direction guidance using asymmetric acceleration via periodic translational motion,” in *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference*, Mar. 2005, pp. 619–622, doi: 10.1109/WHC.2005.146.
- [3] Rekimoto, J., “Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation,” in *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, New York, NY, USA, Jul. 2014, p. 1, doi: 10.1145/2614066.2614079.
- [4] Culbertson, H., Walker, J. M., Raitor, M., Okamura, A. M., “WAVES: A Wearable Asymmetric Vibration Excitation System for Presenting Three-Dimensional Translation and Rotation Cues,” in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, May 2017, pp. 4972–4982, doi: 10.1145/3025453.3025741.
- [5] Choi, I., Culbertson, H., Miller, M. R., Olwal, A., Follmer, S., “Gravity: A Wearable Haptic Interface for Simulating Weight and Grasping in Virtual Reality,” in *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA, Oct. 2017, pp. 119–130, doi: 10.1145/3126594.3126599.
- [6] Minamizawa, K., Prattichizzo, D., Tachi, S., “Simplified design of haptic display by extending one-point kinesthetic feedback to multipoint tactile feedback,” in *2010 IEEE Haptics Symposium*, Mar. 2010, pp. 257–260, doi: 10.1109/HAPTIC.2010.5444646.
- [7] Chinello, F., Malvezzi, M., Pacchierotti, C., Prattichizzo, D., “A three DoFs wearable tactile display for exploration and manipulation of virtual objects,” in *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, Mar. 2012, pp. 71–76, doi: 10.1109/HAPTIC.2012.6183772.
- [8] Birznies, I., Macefield, V. G., Westling, G., Johansson, R. S., “Slowly Adapting Mechanoreceptors in the Borders of the Human Fingernail Encode Fingertip Forces,” *Journal of Neuroscience*, vol. 29, no. 29, pp. 9370–9379, Jul. 2009, doi: 10.1523/JNEUROSCI.0143-09.2009.
- [9] Yem, V., Kajimoto, H., “Comparative Evaluation of Tactile Sensation by Electrical and Mechanical Stimulation,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 1, pp. 130–134, Jan. 2017, doi: 10.1109/TOH.2016.2605084.
- [10] 中山翔太, 真鍋光希, 牛山奎悟, 宮上昌大, 高橋哲史, 梶本裕之, “指先側面への電気刺激による疑似力覚提示の検討,” 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2022.
- [11] Tanaka, Y., Shen, A., Kong, A., Lopes, P., “Full-hand Electro-Tactile Feedback without Obstructing Palmar Side of Hand,” in *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Hamburg Germany, Apr. 2023, pp. 1–15, doi: 10.1145/3544548.3581382.
- [12] 田辺健, 矢野博明, 岩田洋夫, “振動スピーカを用いた力覚提示手法の知覚特性,” 計測自動制御学会論文集, vol. 53, no. 1, pp. 31–40, 2017, doi: 10.9746/sicetr.53.31.
- [13] 田辺健, 雨宮智浩, 遠藤博史, 井野秀一, “非対称振動刺激による牽引力錯覚の研究動向,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 25, no. 4, pp. 291–301, 2020, doi: 10.18974/tvrsj.25.4_291.