



# 指先側面への電気刺激による疑似力覚提示の検討

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

中山翔太<sup>1)</sup>, 真鍋光希<sup>1)</sup>, 牛山奎悟<sup>1)2)</sup>, 宮上昌大<sup>1)</sup>, 高橋哲史<sup>2)3)</sup>, 梶本裕之<sup>1)</sup>  
Shota NAKAYAMA, Mitsuki MANABE, Keigo USHIYAMA, Masahiro MIYAKAMI,  
Akifumi TAKAHASHI, 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, {manabe, ushiyama, miyakami, kajimoto}@kaji-lab.jp

2) 日本学術振興会

3) University of Chicago, Computer Science Department  
5730 S. Ellis Ave., Chicago, IL 60637, USA.

**概要:** 人は皮膚受容器の活動によって指先に加えられる外力を知覚する。我々は電気刺激が生起させる皮膚感覚に着目し、電気刺激により疑似力覚を知覚させることを試みた。本稿では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を行うことで、外力により押されているような感覚を生起させる手法を提案し、検証結果を報告する。

**キーワード:** 感覚・知覚、力覚・体性感覚、電気刺激、疑似力覚

## 1. はじめに

ウェアラブルな指先への力覚提示システムにおいて、外から加えられるような力を提示するのは難しい。これは力を加えるために身体上に支点を必要とし、その支点において反作用による力を知覚してしまうためである。この問題を解決するため、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[1-4]。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[5, 6]。代表的な形態は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るものであり、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ことができる。しかしながら前者の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に伴わず、かつ小型化が容易である。

本手法の提案にあたり、我々是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。Birznies ら[7]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。つまり指先の触覚知覚において、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、機械受容器を刺激することが可能であるとされている[8]。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、疑似力覚を生起させることが可能であると考えられる。

本稿では指先側面に配置された電極により電気刺激を行い、生起される疑似力覚について検証する。

## 2. 電気刺激装置

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。指先デバイスは押しバネを用いたクリップになっており、図 2 に示すようにゲル(積水化学、G グレードゲル)を間に入れながら指側面へ電極を接触させる。これは電流の分散により痛覚の生起を抑えるためである。接触させる電極は片側 4 点ずつ計 8 点で、2mm 間隔で直線状に配置されている。各電極は制御回

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つの状態を切り替えることが可能である。指先デバイスの重量は6gである。



図 1: 電気刺激装置 (全体)

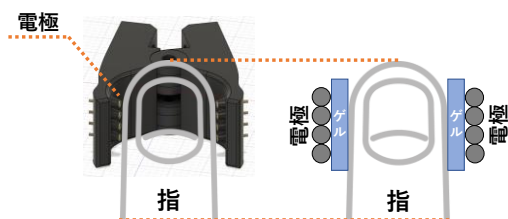


図 2: 指先デバイスの装着方法

### 3. 刺激パターン

今回検討する刺激パターンを図 3 に示す。図中の丸は電極であり、赤丸は陽極、青丸は陰極、黒丸は無接続(ハイインピーダンス状態)を表している。例えば Pattern 1 は、右側面の電極全てを陽極、左側面の電極のうち2点を陰極としており、この時右から左へと電流が流れ、左側は右側よりも高い電流密度となる。これにより、片側の受容器をより強く活動させることが可能となる。

予備的な試行錯誤の中で、我々は Pattern 1 及び Pattern 2 が横方向の疑似力覚を生起することを見出した(図 3 上部のオレンジ色矢印)。この疑似力覚は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ことで発生したもの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[8]は、陰極刺激が圧覚を生起していることを報告している。Pattern 3 及び Pattern 4 は Pattern 1, 2 の極性を反転させた比較刺激として用いる。

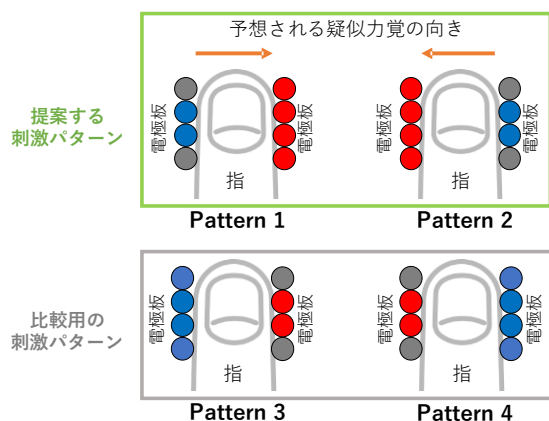


図 3: 刺激パターン

## 4. 実験

### 4.1 実験概要

21~30 歳の男性 9 名、女性 1 名が実験に参加した。本実験では図 3 に示されている 4 種の電気刺激により、生起する疑似力覚の有無やその方向を検証することを目的とした。

### 4.2 実験環境

実験環境を図 4 に示す。被験者に利き手の中指へ指先デバイスを装着させ、正面へ突き出させる。中指を実験対象とした理由は予備的な試行の段階で、最も明瞭に疑似力覚を知覚しやすかったためである。また、机には力覚生起方向を回答させるための模型を配置した。この模型には X,Y,Z 直交軸が定められており、Z 軸を中指が向いている方向としている。原点に存在するスタンド(黒い球体)には、各軸について -1, 0, 1 のいずれかの座標を取ることで作られる原点からの方向ベクトルで表現できる、26 方向の穴が開いている。この穴へ棒を挿入させることで、力覚の生起方向を回答させた。方向の記録は方向ベクトルの値を記録することで行った。例えば右方向へ向かう力覚であった場合  $(X,Y,Z) = (1,0,0)$  と記録し、XY 平面における左斜め上方向へ向かう力覚であった場合  $(X,Y,Z) = (-1,1,0)$  と記録した。

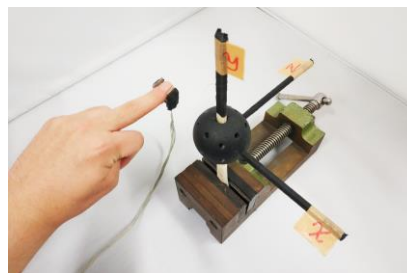


図 4: 実験環境

### 4.3 実験手順

#### 4.3.1 刺激電流量の調整

被験者に前項で示すように指先デバイスを装着させ、図 3 の刺激パターンをランダムに 1 秒ずつ提示しながら徐々に刺激電流量を、痛覚が生起するまで上げた。その後刺激電流量を痛覚が消失するまで下げることで、被験者が不快に感じない最大の刺激電流量を設定した。以降の実験はこの刺激電流量で行った。

#### 4.3.2 左右の電気刺激による皮膚感覚の有無の検証

刺激パターンを順に提示し、指の右側面、左側面それぞれについて「電気刺激による皮膚感覚を生じているか」を回答させた。これは図 3 の我々が提案する刺激パターンにおいて力覚を知覚する手掛かりである、陰極刺激の知覚の有無を確認するためである。

#### 4.3.3 疑似力覚の生起の有無の検証

図 3 に示されている 4 つの刺激パターンをランダムな順序で 3 回ずつ、計 12 回試行し、各試行で 4.2 の模型を

用いて生じた疑似力覚の向きについて回答させた。疑似力覚を生起しなかった場合はその旨を報告させ、方向ベクトルの値は(0,0,0)とした。

5. 結果

5.1 得られた方向ベクトルの正規化

4.3.3 で実施した実験結果は、4.2 で述べたように方向ベクトルの値を(-1,1,0)といった形で記録した。これらの方向ベクトルは向きによってノルムが異なっているため、方向ベクトルをノルムで除することで正規化を行い、個々の試行の重みを均一にした。(このベクトルを正規化ベクトルと呼ぶ) また、「疑似力覚が生起しない」という回答や「並進方向の疑似力覚ではなくトルクのような回転方向の力覚が生起する」という回答があったが、この場合の正規化ベクトルの値は全て(0,0,0)とした。「疑似力覚が生起しない」と回答した者は被験者 10 名中 1 名で、全 120 試行中 6 試行であった。また「並進方向以外の力覚が生起する」と回答した者は 3 名で、11 試行であった。

5.2 実験結果

図 5 に実験結果を示す。この図は各刺激パターンによって回答された正規化ベクトルの立体的な分布を 3 面で表示したものである。すなわち、X-Y 平面で表したものは正面から見た様子、X-Z 平面は上面から見た様子、Z-Y 平面は右側面から見た様子と対応する。データ点の直径は同じ回答がなされた回数を表している。なお、方向ベクトルの値が(0,0,0)である 17 試行は除外している。

図 6 は正規化ベクトルを全て合計し、平均を取った結果である。

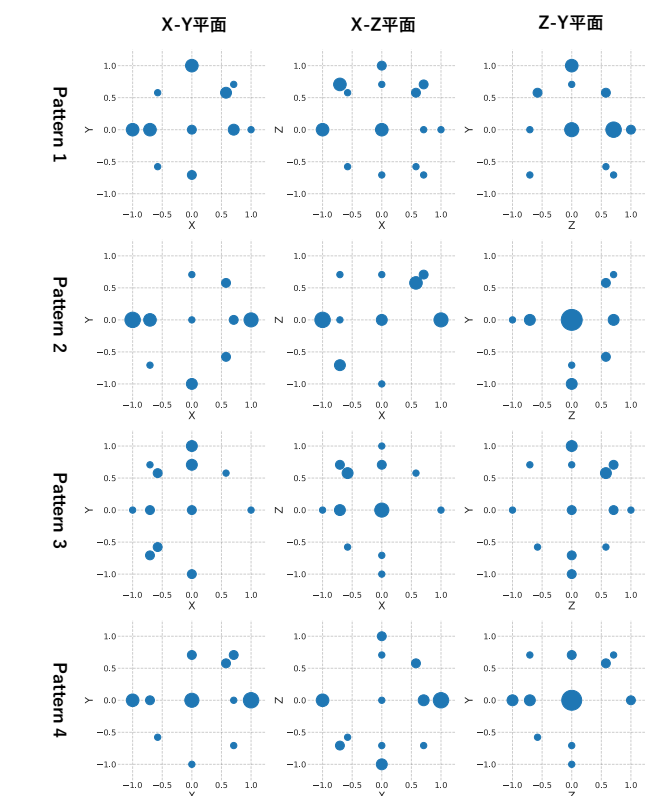


図 5: 測定結果

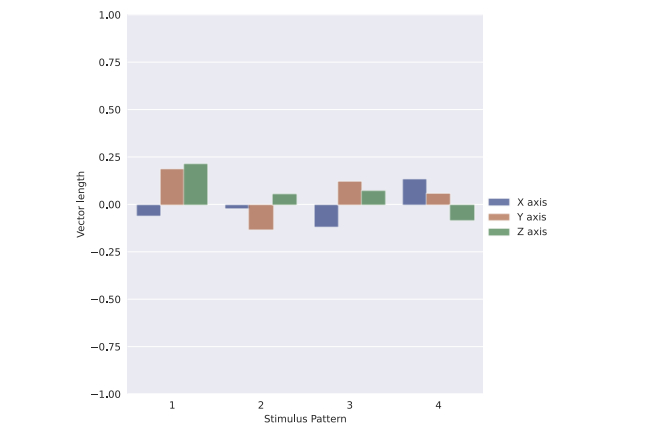


図 6: 正規化ベクトルの平均値

図 7 は正規化ベクトルの値について絶対値を取ったうえで、図 6 と同様に平均を取った結果である。

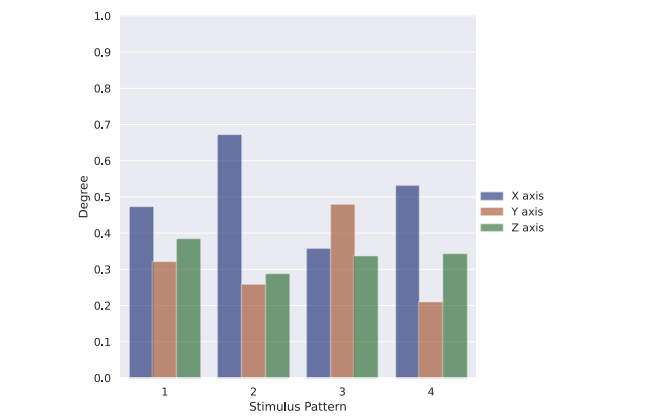


図 7: 絶対値ベクトルの平均値

表 1 に指側面に電気刺激による皮膚感覚を知覚していた被験者数を示す。これは 4.3.2 で回答させた結果である。

表 1: 左右の電気刺激による皮膚感覚を知覚した人数

	左側面 /人数	右側面 /人数
Pattern 1	8	9
Pattern 2	9	10
Pattern 3	8	10
Pattern 4	10	9

6. 考察

6.1 全体的な分布

図 5 を見ると、被験者は様々な方向に疑似力覚を知覚していることがわかる。また全体的に分散が大きく、同じ被験者でも同一の刺激パターンに対して異なる方向を回答していたことから、疑似力覚の方向は知覚手がかりが不十分なために一つには定まっておらず、被験者の解釈に依存していると考えられる。しかしながら「疑似力覚が生起

しない」と1試行でも回答した者は被験者10名中1名であったことから、今回の提案手法は方向は定まらないものの、疑似力覚を生起させられていたと考えられる。

## 6.2 座標軸に着目した回答の傾向

図6は全データの平均であることから、方向ベクトルの偏りを表している。しかしながらどのベクトルの平均値も $\pm 0.25$ 未満に収まっており、明確な偏りは見られなかった。この結果からも疑似力覚の方向は一つには定まっていまいと言える。

図7は絶対値を取っていることから、疑似力覚の各軸への偏り具合を表している。Pattern 1とPattern 2を見るとX軸の値が最も大きいことから、疑似力覚がX軸へと偏っているといえる。これは我々の予想と一致している。しかしながら疑似力覚の向きは1方向には定まっておらず、回答された方向の軸についてもばらつきが大きい。この結果になった理由として、我々の予想であった「陰極刺激による圧覚によって押されているように知覚する」とは反対に、陽極刺激によって押されているように知覚した可能性が考えられる。例えばPattern 1では、表1に示されているように陽極刺激を知覚できるが、陰極刺激を知覚できない被験者が2名存在し、うち1名は3回の試行全てで(-1,0,0)と回答していた。これは図3に示した我々の予想とは反対方向の疑似力覚である。

一方で刺激パターンの対称性よりPattern 3とPattern 4は同様に同じ軸方向に偏った結果になることが期待されるが、Pattern 3とPattern 4を見ると、Pattern 3はY軸、Pattern 4はX軸に偏っていることがわかる。実験後の感想として被験者の中には「指腹に皮膚感覚が生じ、それがy軸方向の疑似力覚であるという解釈に繋がった」という者がいたことから、Pattern 3は血管の経路や骨の配置といった何らかの要因で指腹に存在する受容器を通して電流が流れ、それがY軸方向への偏りを生んだ可能性が考えられる。Pattern 3とPattern 4で偏っている軸が異なる理由としては、今回は利き手のみで実験を行ったため、右側面、左側面の機械受容器分布が左右の手で異なっている可能性が考えられる。

## 7. おわりに

本稿では指側面への電気刺激により疑似力覚を提示する手法を提案し、疑似力覚の有無や生起方向を検証した。その結果、方向の制御はできなかったものの、全ての被験者で疑似力覚が生起したことが確認された。今後の展望としては、電極の配置数を増加させることでより高い電流密度を生み出し、より純粋な圧覚の生起を試みる。また、VR空間における視覚情報の提示などにより疑似力覚の向きを一意に定める手法を検討する。

**謝辞** 本研究はJSPS 科研費 20K20627 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Birznieks, 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.
- [8] 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.