



爪近傍と指先への電気刺激による多自由度力覚提示 (第二報) 爪近傍の刺激による影響の調査

Multi-Directional Force Feedback via Fingertip and Nail-Side Electrical Stimulation: Part II
— Evaluating the Role of Nail Vicinity Stimulation

秋葉優馬, 溝口泉, 梶本裕之

Yuma AKIBA, Izumi MIZOGUCHI, and Hiroyuki KAJIMOTO

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

概要: 本研究は, 爪周辺の機械的ひずみが指先の力覚に関与しているという事実に着目し, 多自由度の力覚提示を実現する手法を提案するものである. 提案手法では, 指先全体, 特に側面や爪周囲に電気刺激を加えることで, 力覚を提示する. 我々は, 爪周囲への刺激が力知覚に与える影響を検証し, 提案手法が多自由度の力覚提示に有効であることを確認した. 結果として, 爪周囲の刺激が力感覚生成に重要な役割を果たすことが明らかとなった.

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

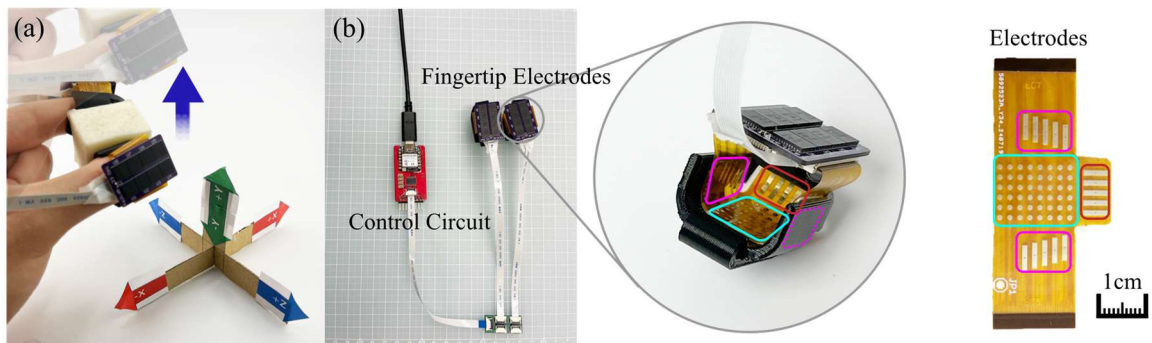


図 1: (a) 実験セットアップの外観. 電気刺激による力覚フィードバック, (b) 2 本指用の電気触覚ディスプレイと電極部の拡大図. 指先末端部の電極は赤色, 指側面の電極は紫色, 指腹の平坦部の電極は水色で囲って示している.

1. はじめに

近年, VR や AR といった分野において, 触覚フィードバックはインタラクティブな体験の質を高める上で重要な要素とされている. エンタテインメント, 医療リハビリテーション, 遠隔作業支援など, 応用範囲の拡大に伴い, 高精度な触覚提示の需要はますます高まっている[1], [2]. 中でも, ウェアラブルな触覚提示技術は, 装着性や可搬性, 可動範囲の広さといった利点から, VR 環境との親和性が高く, これまでに多様な手法が提案されてきた[3], [4], [5].

しかしながら, 多くの既存手法は, 電磁アクチュエー

タなどの機械的な可動部を必要とするため, 特に力覚提示を行う場合には装置が大規模になりやすく, 純粋なウェアラブル環境での構築は困難になる.

このような課題に対する一つのアプローチとして, 電気刺激を用いた力覚提示が挙げられる. 電気刺激は, 皮膚表面に電極を貼付するだけで実現可能であり, デバイス全体の小型・軽量化が容易であるという利点を持つ. これまでに, 指や手の表面に電極を配置して皮膚感覚を提示する手法[6], [7], [8]や, 前腕などの筋肉や腱に対して刺激を与えることで力覚を提示する手法[9], [10], [11]が提案されてい

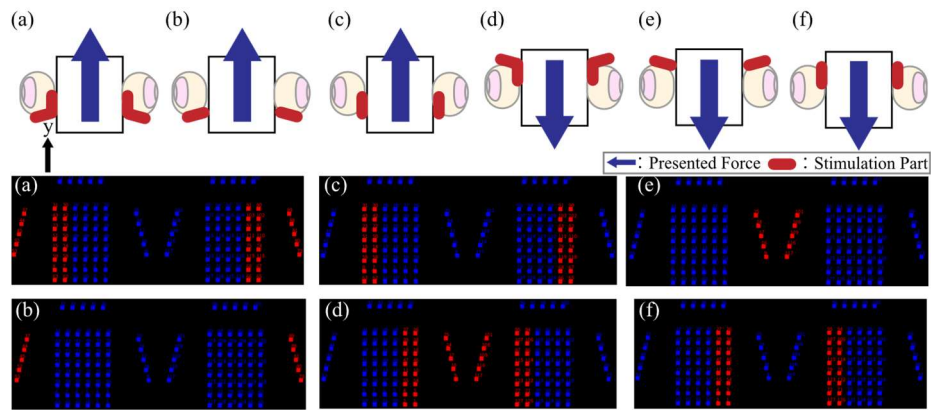


図 2: 実験で提示された電気刺激. 左半分の電極は人差し指, 右半分の電極は親指に対応している. (a) Up_all: 指腹および爪周辺を刺激し, 上方向の力を模擬. (b) Up_nail: 爪周辺のみを刺激. (c) Up_pad: 指腹のみを刺激. (d) Down_all: 指腹および爪周辺を刺激し, 下方向の力を模擬. (e) Down_nail: 爪周辺のみを刺激. (f) Down_pad: 指腹のみを刺激.

る.

特に力の感覚を提示する手法においては, 刺激対象が指先ではなく前腕部に限定されるため, 皮膚感覚と力覚の両方を電気刺激で提示しようとする場合, 複数部位への電極装着が必要となり, システム全体の煩雑さが増すという問題がある.

そこで我々は指が物体に触れた時の指側面の変形に着目した. 指が物体に触れると, 爪の存在により, 接触面である指腹だけでなく, 指側面も変形する. Birznick ら[12]は, 爪周囲の機械受容器の活動には, 指に加えられた力の方向の情報が含まれていることを報告している. 彼らの知見に基づくと, 指の側面を刺激することで, 力の手掛かりを与えることができると考えられる. 本研究では, 指側面(爪周辺)と指腹の両部位に対して電気刺激を同時に行い, 「爪周辺のひずみ感」と「指腹の圧迫感」を提示することにより, 多自由度の力の感覚提示を実現できると考えた.

前報[13]では, 本手法を用いることで前後・上下・左右の6方向に対する力の知覚提示の有効性を検証した. ただし前報では, 指腹と指側面の双方を刺激していたため, 必ずしも提案しているような指側面の寄与が明らかではなかった. 本報告では, 力覚の知覚における爪周辺刺激の寄与を評価し, 指全体を対象とした電気刺激の意義を検討する.

2. 実験

本実験の目的は, 爪周辺への電気刺激が力覚知覚に寄与するかどうかを明らかにすることである. 実験には, 21 歳から 26 歳までの女性 2 名, 男性 8 名の計 10 名が参加した. 実験では, 電気刺激による力覚の識別精度と確信度を評価した. 実験セットアップの外観を図 1(a)に示す. 実験は, 著者の所属機関の倫理委員会によって承認された.

2.1 電気刺激装置

図 1 (b)は, 本研究で使用した電気刺激装置を示している[14]. 本装置は, 制御用マイクロコントローラ, 昇圧回

路, 電圧・電流変換回路, 電極を陽極または陰極に切り替えるためのスイッチング回路, ならびに指先電極で構成される.

電極は合計 63 点で構成されており, 指腹部に格子状に配置された 48 点 (6×8) と, 指側面および前面にアレイ状に配置された 15 点 (5×3) からなる. 電極の中心間距離は 2 mm で統一されている. 指腹部の電極は直径 1 mm の円形, 指側面および前面の電極は 1 mm × 5 mm の長方形である. 側面および前面の電極サイズを大きく設定した理由は, 爪近傍の刺激によって力の感覚が生起する可能性があることに加え, 指の大きさに個人差がある中でも確実に爪周辺を刺激できるようにするためである. 各電極は, 陽極または陰極のいずれかに設定可能である. 指先電極の総重量(ケーブル除く)は 21 g であった.

実験では, 30 mm × 25 mm × 30 mm のウレタンブロック(株式会社エクシール製, 超軟質造形用樹脂【乳白】, 型番: H5-100, 質量 23 g)を左右から親指と人差し指で把持した状態で電気刺激を提示し, 力覚の提示を行った. 物体を把持した状態で実験を行った理由は, 「把持」という明確な状況を作ることによって, 提示されている感覚を力として認識させやすくするためである.

2.2 電気刺激パターン

本実験における電気刺激はすべて陰極刺激により実施し, 逆極性(陽極)刺激は刺激パターンに含めなかった. これは, 陽極刺激によって生じる感覚が振動感に近く, 圧覚あるいは力覚として認識されにくいためである. 一方, 陰極刺激は皮膚に対する押圧感に類似した感覚を誘発し, 被験者によって押される感覚として解釈されやすく, 力感覚の手がかりとなることが知られている[15]. 電気刺激はパルス幅 50 μs の陰極刺激を用いた. 陰極刺激とは, ある瞬間には電極一点が陰極となり, 周囲のすべての電極が陽極となる刺激のことを指す. 刺激する電極を 200 μs ごとに切り替えることで空間的なパターンが提示される. これらの切り替えを繰り返すことで, 各電極に対して 1 秒あた

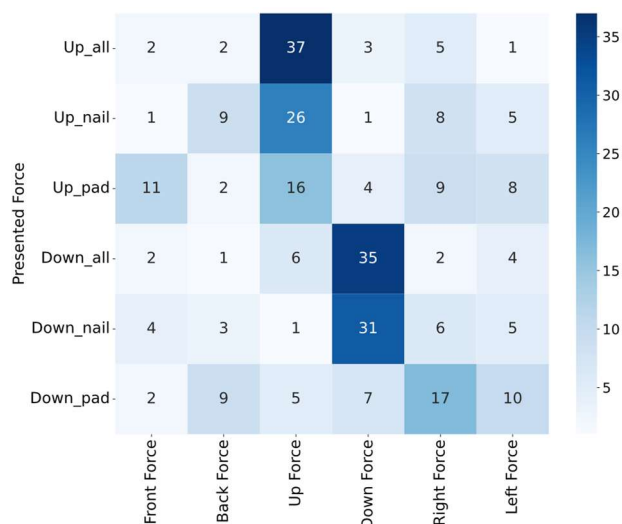


図 3: 各条件における回答結果の混合行列

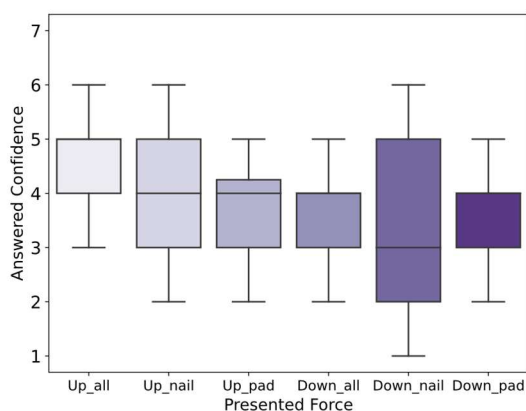


図 4: 回答時の確信度

り 100 pps (pulses per second) の頻度で刺激を行った。

図 2 のように 6 種の刺激を提示した。それぞれの刺激条件の意図は以下のとおりである。

- (a), (d): 爪周辺と指腹に刺激を加えた条件である。爪周辺および指腹の一部に刺激を加えることで、上下方向の力感覚が生起すると考えた。
- (b), (e): 爪周辺のみ刺激を加えた条件である。爪周辺が力の知覚に寄与している場合には、この条件においても力の感覚が得られると考えた。
- (c), (f): 指腹の一部のみ刺激を加え、爪周辺には刺激を加えない条件である。

2.3 実験手順

実験では、被験者の左手の人差し指と親指を用いた。実験は以下の手順に基づいて行われた。まず、縦線が移動する刺激パターンを用いて電気刺激の強さを調整した。この際、刺激の強さは被験者がキーボードを用いて調整可能とした。刺激は痛みを伴わない範囲内で、可能な限り強くするよう指示した。また、被験者は実験中いつでも刺激の強度をキーボードを用いて変更できるようにした。図 1 (a) のように刺激中、被験者はウレタンブロックを把持し、ブロックの方向を XYZ 軸に合わせるよう求めた。

次に、実験開始前に図 2 に示す 6 種類の刺激 (+Y に向かう刺激: Up_all, Up_nail, Up_pad, -Y に向かう刺激: Down_all, Down_nail, Down_pad) を提示した。これらの電気刺激を被験者に提示し、明瞭に知覚可能であることを確認した。なおこの調整フェーズでは期待される正答は被験者には教示されていない。明瞭に知覚可能であった被験者のみが本実験に参加した。結果、10 名で本実験を行った。

本実験は以下の手順で進行した。まず、刺激を提示し、被験者は提示された刺激がどの方向の力として解釈されたかを回答した。実験では、「+X」、「-X」、「+Y」、「-Y」、「+Z」、「-Z」の 6 つから選択するよう指示した。また、被験者は回答の確信度合いを 1 (全く自信がない) から 7 (非常に自信がある) のリッカート尺度で評価した。1 種類の刺激に対して 5 回、計 30 回の試行をランダム順で実施した。

3. 結果

刺激条件間における正答率の有意差を検定するために、ノンパラメトリック手法である Friedman 検定を用いた。本分析の目的は、「爪周辺刺激+指腹刺激」の組み合わせが、力の知覚を有意に強化することを示すことであった。

また、回答時の確信度が正規分布に従うかを確認するため、Shapiro-Wilk 検定を実施した。その結果、確信度は正規分布に従わないことが示された。したがって、確信度に関する刺激条件間の有意差を評価するために、Friedman 検定およびその事後検定といったノンパラメトリック手法を用いた。これにより、異なる刺激条件間での回答の確信度における有意差の有無を評価した。

図 3 は、各刺激条件に対する応答結果を示している。Friedman 検定の結果、電気刺激条件の違いによる有意な効果が認められた ($p = 1.62 \times 10^{-5}$)。さらに、事後検定により以下の条件間で有意差が確認された: Up_all と Down_pad ($p = 0.001$)、Up_pad と Down_all ($p = 0.047$)、Down_all と Down_nail ($p = 0.033$)、および Down_all と Down_pad ($p = 0.001$)。

図 4 は、各刺激条件下での回答の確信度を示している。Friedman 検定により電気刺激条件による有意な効果が確認された ($p = 0.0094$) が、事後検定では有意差は認められなかった。

4. 考察

本実験では、上下方向の力感覚を提示する 6 つの刺激条件を検証した。具体的には、上方向の力を提示する 3 条件 (指腹と爪周辺を同時に刺激、爪周辺のみを刺激、指腹のみを刺激) と、それに対応する下方向の 3 条件である。

指腹のみを刺激した条件では、下方向の力が右方向の力として誤認されるケースが多く見られた。この傾向は、親指の指腹の向きが人差し指と完全には平行でないことが一因であると考えられる。一方、上方向の力を指腹のみによって提示した条件では、被験者は最も頻繁に「上方向」

と回答しており、指腹の刺激のみでも一定の力方向の知覚が得られることが示唆された。

爪周辺のみを刺激した条件では、指腹のみを刺激した場合と比較して、上下方向の力の知覚がより明瞭であった。この結果は、垂直方向の力提示において爪周辺への電気刺激が有効であることを示している。

最後に、爪周辺と指腹を同時に刺激した条件では、最も明瞭な力覚が得られたことが確認された。これは、両部位の刺激が相補的に作用し、力の知覚を増強したためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、指側面（爪周辺）と指腹の両部位に対する電気刺激を組み合わせ、「爪周辺におけるひずみ感」と「指腹における圧迫感」を同時に提示することで、コンパクトな多自由度の力覚提示を実現する新たな手法を提案した。指側面の皮膚変形が指先の力知覚に寄与することは神経生理学的な知見として知られており、本研究ではこれに着目し、指全体を覆うような電極による電気刺激を行うことで3自由度の力覚提示を可能とする手法を考案した。

実験結果より、上下方向の力覚の明瞭性を高めるうえで、爪周辺と指腹の同時刺激が重要であることが示された。指腹のみの刺激では明確な力感覚を提示するには不十分であったが、爪周辺刺激との組み合わせにより、より明瞭な力覚が得られた。

謝辞 本研究は、JST、A-STEP、JPMJTR23RCの支援を受けたものです。

参考文献

- [1] C. Saint-Louis and A. Hamam, "Survey of Haptic Technology and Entertainment Applications," in Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2021, 2021, pp. 1–7.
- [2] I. Shazhaev, D. Mihaylov, and A. Shafeeg, "A Review of Haptic Technology Applications in Healthcare," Applied Sciences, vol. 13, no. 2, 2023, pp.163–174.
- [3] H. Kim, M. Kim, and W. Lee, "HapThimble: A Wearable Haptic Device towards Usable Virtual Touch Screen," in Proceedings of the 2016 ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2016, pp. 3694–3705.
- [4] Y. Lee and D. Ryu, "Wearable haptic glove using micro hydraulic system for control of construction robot system with VR environment," in Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2008, pp. 638–643.
- [5] X. Li, Y. Hao, J. Zhang, C. Wang, D. Li, and J. Zhang, "Design, Modeling and Experiments of a Variable Stiffness Soft Robotic Glove for Stroke Patients With Clenched Fist Deformity," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 8, no. 7, 2023, pp. 4044–4051.
- [6] Y. Suga, I. Mizoguchi, and H. Kajimoto, "Presentation of Finger-size Shapes by Combining Force Feedback and Electro-tactile Stimulation," in Proceedings of the 2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 2024, pp. 590–597.
- [7] Y. Vibol and H. Kajimoto, "Wearable tactile device using mechanical and electrical stimulation for fingertip interaction with virtual world," in Proceedings of the 2017 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 2017, pp.99–104.
- [8] N. Kitamura, J. Chim, and N. Miki, "Electrotactile display using microfabricated micro-needle array," Journal of micromechanics and Microengineering, vol. 25, no. 2, 2015, 025016.
- [9] A. Takahashi, J. Brooks, H. Kajimoto, and P. Lopes, "Increasing Electrical Muscle Stimulation's Dexterity by means of Back of the Hand Actuation," in Proceedings of the 2021 ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2021, pp. 1–12.
- [10] A. Takahashi and H. Kajimoto, "Force Sensation Induced by Electrical Stimulation of the Tendon of Biceps Muscle," Applied Sciences, vol. 11, no. 17, 2021, 8225.
- [11] E. Tamaki, T. Miyaki, and J. Rekimoto, "PossessedHand: techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli," in Proceedings of the 2011 ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2011, pp. 543–552.
- [12] I. Birznieks, V. G. Macefield, G. Westling, and R. S. Johansson, "Slowly Adapting Mechanoreceptors in the Borders of the Human Fingernail Encode Fingertip Forces," Journal of Neuroscience, vol. 29, no. 29, 2009, pp. 9370–9379.
- [13] 秋葉優馬, 牛山奎悟, 溝口泉, 梶本裕之, "爪近傍と指先への電気刺激による多自由度力覚提示," ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025.
- [14] H. Kajimoto, "Electro-tactile display kit for fingertip," in Proceedings of the 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), 2021, pp. 587–587.
- [15] V. Yem and H. Kajimoto, "Comparative Evaluation of Tactile Sensation by Electrical and Mechanical Stimulation," IEEE Transactions on Haptics, vol. 10, no. 1, 2017, pp. 130–134.