



電気触覚ディスプレイによる凹み感の提示

Displaying Indentation Sensation by Electro-tactile Display

坂本泰清¹⁾, 溝口泉¹⁾, 梶本裕之¹⁾

Taisei SAKAMOTO, Izumi MIZOGUCHI, and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学大学院 情報学専攻 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {sakamoto, mizoguchi, kajimoto}@kajilab.jp)

概要 : 柔らかさ感とは物体に接触した際の皮膚感覚を再現することで提示可能であり, 例えば電気触覚ディスプレイにより指の押下力に応じて刺激する領域を増大させることで再現できることが知られている. 我々はこの柔らかさ感の延長として, 物体を押し込んだ際に表面が大きく陥没するように感じる「凹み感」が提示できることを発見した. 凹み感はボタンのストロークの表現など, リアルな触覚表現に寄与することが期待できる.

キーワード : 凹み感, 電気触覚ディスプレイ, 面積変化

1. はじめに

コンピュータの性能やグラフィックス技術の向上, デバイスの小型化などのバーチャルリアリティ (VR) 関連技術の進歩により, VR を用いたコンテンツが普及しつつある. VR 環境において, 物体に触った時のテクスチャ感や温冷感, 接触に対する力覚フィードバックなどの触覚を提示することは, あたかも物体が実在しているかのような感覚を引き起こし, 没入感の向上に貢献すると考えられる. これまでにテクスチャ感[1]や温冷感[2]などの触覚の提示手法が数多く提案されてきた.

その触覚の 1 つに「柔らかさ感」がある. 柔らかさ感とは物体に接触した際の変位に対する力覚や接触面積の変化により知覚され[3], その力覚と皮膚感覚を再現することで提示可能な感覚である. 特に, 皮膚感覚の再現には物体への接触やその押下力に応じて刺激面積を増大させることが有効であることが知られており, これまでに指と物体の間の接触面積を物理的に変化させる手法[4][5]や電気刺激により刺激面積を制御する手法[6]などが提案されてきた.

我々はこの電気触覚ディスプレイを用いた柔らかさ感提示手法の延長として, 物体を押し込んだ際に表面が大きく陥没するように感じる「凹み感」が提示できることを発見した. 凹みを持つ物体は条件によっては柔らかさ感を生じることが知られており[7], このことから凹み感と柔らかさ感とは近い関係にあると推測され, 凹み感とは柔らかさ感同様に皮膚感覚の再現をすれば提示可能であると考えられる. そこで, 我々は指の押下動作に応じて, ある一定押下力に対して刺激面積を増加あるいは除去することで凹み

感を提示する.

これまで凹み感の提示には超音波振動を用いた手法[8][9]が提案されており, クリック感やボタンのストロークの表現に成功している. 凹み感を提示することは, 柔らかさ感とは異なる感覚を提供し, VR 空間上やタッチスクリーン上でのリアルな触覚表現に寄与することができると考えられる.

本研究では触覚提示手法として電気触覚ディスプレイを用いる. 電気触覚ディスプレイは, 他の触覚提示手法と比較して, 低コストかつ小型化が容易であり, 電極の極性の制御により陽極刺激と陰極刺激の 2 つの刺激が提示可能であり, それぞれ主に振動感覚と圧覚を提示可能である[10]. 加えて, 電気触覚ディスプレイは電極ごとの制御が可能であり, 比較的容易に高い空間解像度を実現できることから本提案手法に好適であると考えられる.

本研究の目的は, 電気触覚ディスプレイによる電気刺激に特定の押下力で面積変化を加えることで凹み感を提示することである. 実際の押下動作に伴い, 接触面積が増加あるいは除去される状況を表現することで凹み感を提示し, その効果を検証する.

2. 実験

我々の提案は, 一定の押下力に対して電気刺激の面積変化を提示することによって凹み感を生じさせるというものである. 本提案手法の有効性を確かめるため, 刺激面積の変化の凹み感知覚への影響を評価する実験を行った.

2.1 実験装置

本実験では、図 1 に示す実験装置を用いて、電気刺激を提示した。電気触覚ディスプレイの直下には六軸力センサ (Touchence 製 S18C1-WM155-K1-P4I) を設置し、検出された押下力に応じて電気刺激を提示した。また、安定した押下力を実験装置に加えるため、電気触覚ディスプレイと力センサの間に 2.0 mm 厚の 3D プリンタ (Stratasys F120) で作成した ABS 製の円盤を挟んだ。電気触覚ディスプレイは、PC に接続して電気刺激を制御するマイクロコントローラ (Seed Studio 製 ESP32S3)、D/A 変換器 (Analog Devices 製 AD5452)、A/D 変換器 (Analog Devices 製 AD7476)、電流制御回路で構成されるメイン基板、高電圧スイッチ (SuperTex 製 HV513) 群で構成されるスイッチング基板、および 64 点の電極からなるフレキシブル基板によって構成されている。このフレキシブル基板の電極部の大きさは 28.0 mm × 17.0 mm である。電極の直径は 1.1 mm で、電極中心間の距離は 2.54 mm である。電気触覚ディスプレイが出力可能な刺激電流の最大値は 10 mA である。

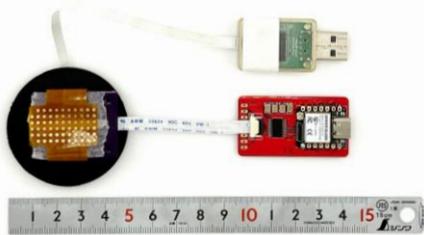


図 1: 実験装置 (上: 六軸力センサ, 下: 電気触覚ディスプレイ)

本電気触覚ディスプレイは、電極を 1 点のみ陽極として他の電極をすべて陰極とする陽極刺激と、1 点のみ陰極とする陰極刺激を切り替えて提示することが可能である。陰極刺激による神経駆動は特に圧覚を生じやすいことが知られており[10]、本研究では自然な面積提示を行うために陰極刺激のみを使用した。提示したいパターン (本研究では円状の領域) に対して、円周上に存在する電極を計算し、それらの電極に対して陰極刺激で刺激を提示した。

2.2 実験手順

実験参加者は男性 5 人、女性 2 人の計 7 人 (21~24 歳、右利き 6 人、左利き 1 人) とした。参加者全員に実験内容について説明し、万一痛覚を生じた場合にはすぐに申告するよう伝えた。

実験中、参加者は電気刺激の感覚が皮脂や発汗によって変化するのを防ぐため、実験装置に指を置く前に消毒用アルコールによって人差し指の指先を乾燥させた。また、実験装置に指を置いた後は離さないよう指示した。なお、発汗により電気刺激を知覚しづらくなった場合は指を一度離し、消毒用アルコールによる乾燥させた上で再度キャリブレーションを行った。

本実験で刺激する領域は図 2 に示す複数点の電極で形成された円領域の周辺部であり、それぞれキャリブレーション時に刺激される領域と、実験で刺激される最大の領域を示す。刺激領域を円領域の周辺部とした理由は、実際に指先で物体に接触した場合に接触面積は円状に近くなるためである[11]。また円の内部を刺激しなかった理由は、接触部の縁付近に皮膚ひずみを生じやすいと考えられるためである。なお柔らかさ感を電気刺激によって提示する研究においても同様に円領域の周辺部を刺激している[6]。

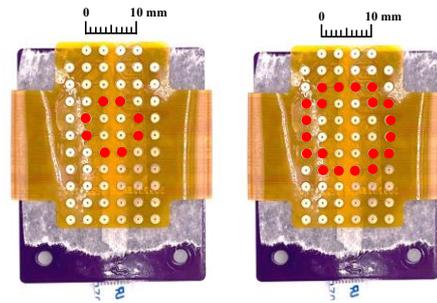


図 2: 刺激領域 (赤点部分, 左: 最小時, 右: 最大時)

電気刺激の知覚の個人差を考慮し、実験の最初に与える電気刺激の強さのキャリブレーションを行った。電極に指を押し付けた状態で参加者自身が電気刺激のパルス高さの最小閾値 (図 2 左の刺激領域の形に刺激を知覚する最小の値) と最大閾値 (痛覚を知覚しない最大の値) を調整し、以降の実験では 2 つの閾値の中間の値をパルス高さとして用いた。この調整は参加者が自然な皮膚感覚を得られるよう、パルス高さを適切に設定するために行った。パルス幅は 50 μ s で固定した。

本提案手法では、押下力の変化に応じて電気刺激の提示タイミングを制御した。そのため、適切な速度かつ押下力で実験を行うため、参加者は実験前に指の押下練習を行った。参加者は指の押下力を、0.0 N から 3.0 N の範囲で押下力を 0.25 Hz の周期で変動させるように指を動かした。この際、図 3 のように利き手の人差し指を電極の中心に置き、鉛直方向に指を押下させるよう指示した。実験装置と実験で使う机は、押下動作中に動かないよう両面テープで固定されている。また、参加者の前には LCD ディスプレイを設置し、押下力に応じて上下に動くメータと動きのガイドメータが表示され、参加者はこれを参照することで、適切な押下力および速度で指を動かすことができた。



図 3: 押下の様子

キャリブレーションと練習の後、参加者は練習時と同じ動きで指を5回押下させた。1回押下させる間に1群の刺激パルス列が提示されるため、参加者は1試行に5回の刺激群が提示される。その後、参加者は電気刺激により提示された触覚の凹み感、柔らかさ感、潰れ感、および移動感を7段階のリッカート尺度（1：感じない～7：明瞭に感じる）で回答した。凹み感以外の3つの感覚は、押下動作に応じた面積変化により知覚されそうな感覚だと考え、評価項目として選択した。また、感覚の知覚を統制するため、凹み感は「表面を押した際に凹んでいるとを感じる感覚」、柔らかさ感は「表面を押した際に柔らかいとを感じる感覚」、潰れ感は「表面を押した際に表面が潰れる感覚」、および移動感は「表面を押した際に表面ごと下に移動する感覚」と定義した。実験は以下の4条件で行った。条件ごとの刺激面積の変化を図4に示す。

- (1) 一定条件：押下力にかかわらず一定の面積に電気刺激を与える
- (2) 連続変化条件：押下力に応じて刺激面積が連続的に増加する
- (3) 増加条件：押下力が2.7 Nに達すると刺激面積が増加する
- (4) 消失条件：押下力が2.7 Nに達すると電気刺激が停止する

各条件につき5セットずつ計20回の試行を行い、ランダムに電気刺激を提示した。実験終了後、参加者には自由記述によるコメントを求めた。

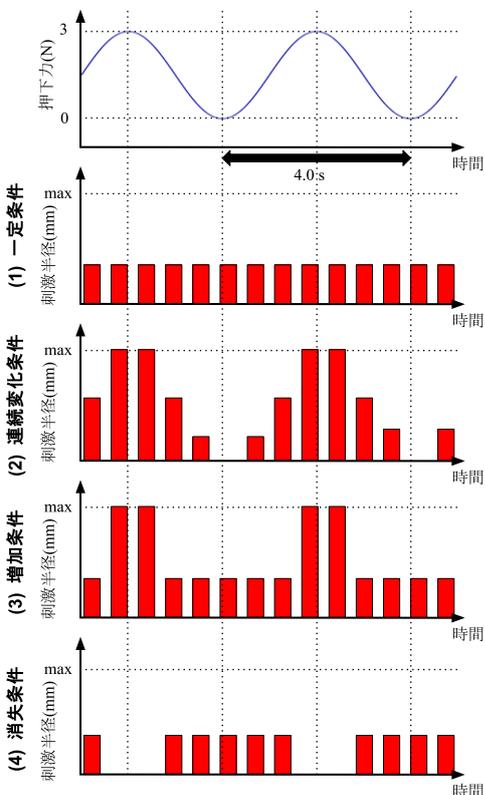


図4：条件ごとの刺激面積

3. 実験結果

本実験の実験結果を図5に示す。縦軸は、提示された触覚の明瞭さを7段階のリッカート尺度で評価したものである。データとして参加者ごとの5セット分の各条件の回答の平均値を用いている。これらのデータに対して、Friedman検定 ($p < 0.05$) を実施した結果、潰れ感の明瞭さ ($p = 0.013$) について有意差が見られた。また、潰れ感の条件間比較として Bonferroni 補正を適用した Wilcoxon の符号付き順位検定を行った結果 ($p < 0.05$)、一定-増加条件間 ($p = 0.016$)、一定-消失条件間 ($p = 0.016$) に有意差が認められた。

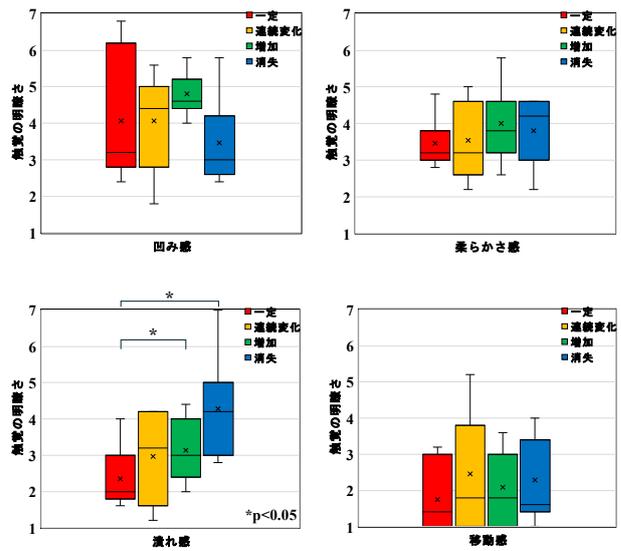


図5：実験結果（左上：凹み感，右上：柔らかさ感，左下：潰れ感，右下：移動感）

4. 考察

実験結果より、凹み感の明瞭さについて条件間に有意差がなかったが、本提案手法である増加条件において、平均的な凹み感の明瞭さが比較的高水準にあると考えられる。そのため、一定の押下力に対して刺激面積を増加させることで凹み感が提示可能であることが示唆された。また、参加者から「ゴムボールのような感覚だった」「ボタンのような感覚だった」「凸部分を潰す感覚だった」「くぼみに触っているようだった」というコメントがあり、同一の刺激でも状況の異なる凹み感が提示され得ることが分かった。

柔らかさの明瞭さについても条件間に有意差が認められなかった。また、連続変化条件は先行研究[6]に基づいており、押下力に応じて刺激面積を増大させる従来の柔らかさ感提示手法を使用したが、柔らかさ感は明瞭に知覚されなかった。この理由として、柔らかさ感の提示には変位に対する力覚も重要であり[6]、皮膚感覚しか提示しなかったことや、電気刺激に使用した電極が6×6の領域と滑らかに面積変化を提示できる解像度でなかったことが考えられる。

潰れ感の明瞭さについて、一定-条件間と一定-消失条件

間に有意差が認められた。このことから、一定の押下力に対して電気刺激を停止させることにより潰れ感が提示可能であることが示された。この提案手法も凹み感を提示できる可能性がある手法であったにもかかわらず潰れ感が明瞭に知覚された。その理由として、一定の押下力に対して接触面積が突然消失する状況が、「表面に接触した際に潰れて消える」という感覚に近かったためだと考えられる。ただし、潰れ感も凹み感と同様に、「物体に接触した際に表面が変形する触感」に分類されるため、本手法により刺激面積を変化させることでこうした触感が提示可能であることが確認された。

移動感の明瞭さについては有意差が見られず、全体的な数値も低くなっている。この原因として、複数の参加者からも「移動感自体が分からなかった」というコメントが得られたように、定義が不明確であった可能性が考えられる。

また、図 5 からも示されるように、増加条件や消失条件に関しては同じ刺激で複数の感覚が得られていることが確認できる。また、参加者から「指腹の柔らかく変形しやすい部分で触感を知覚しやすい」「電気刺激により知覚される凹み感や潰れ感を持つ膨らみのような感覚により柔らかいとも解釈できる」というコメントがあった。このことから、意図せずに皮膚が変形することによる力覚が提示されている可能性や、凹み感、柔らかさ感、潰れ感に近い性質を持つために皮膚感覚のみでは区別できず、複数の感覚が混ざって知覚される可能性が考えられる。このことから、これらの触感を個別に再現するには、具体的な力覚や視覚刺激などの他の刺激と組み合わせて提示を行うべきであると考えられる。

5. おわりに

本研究では、凹み感の提示手法の実現を目的として、電気触覚ディスプレイを用いて一定の押下力に対して面積変化を提示する手法を提案、評価した。

実験では、4 つの刺激条件により 4 つの触感（凹み感、柔らかさ感、潰れ感、移動感）の明瞭さを評価した。結果として、潰れ感のみに有意差が認められ、特に一定の押下力に対して電気刺激を停止させることで潰れ感が提示可能であることが示された。また、本提案手法により凹み感が提示可能であるが、同時に複数の感覚が知覚される傾向も確認された。

今後は、凹み感をより明瞭かつ選択的に提示するために、力覚や VR 環境下での視覚刺激を組み合わせた検証を行っていく。また、本研究では刺激のパラメータを固定していたが、より多様な凹み感の再現を目指し、面積変化を提示する押下力や提示時間などの要因を変化させた検証も進めていく。

謝辞 本研究は JST, A-STEP, JPMJTR23RC の支援および JSPS 科研費 JP24K21321 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] R. F. Friesen, Y. Vardar: Perceived Realism of Virtual Textures Rendered by a Vibrotactile Wearable Ring Display, *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 17, no. 2, pp. 216-226, April-June 2024.
- [2] H. I. Yi, H. Lee, S. H. Yoon: ThermicVib: Enabling Dynamic Thermal Sensation with Multimodal Haptic Glove for Thermal-Responsive Interaction, 2024 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Bellevue, WA, USA, 2024, pp. 614-623.
- [3] M. A. Srinivasan, R. H. LaMotte: Tactual discrimination of softness, *Journal of Neurophysiology*, vol.73, issue.1, pp.88-101, January 1995.
- [4] K. Fujita, H. Ohmori: A New Softness Display Interface by Dynamic Fingertip Contact Area Control. *Proceedings of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2001, pp. 78-82.
- [5] S. Fani, S. Ciotti, G. Pagnanelli, A. Moscatelli, Y. De Pra, M. Bianchi: Modulating the Perceived Softness of Real Objects Through Wearable Haptics, in *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 16, no. 4, pp. 543-548, Oct.-Dec. 2023.
- [6] Y. Suga, M. Takeuchi, S. Tanaka, H. Kajimoto: Softness presentation by combining electro-tactile stimulation and force feedback, *Front. Virtual Real.*, Vol.4, 2023.
- [7] K. Inoue, S. Okamoto, Y. Akiyama and Y. Yamada, "Surfaces With Finger-Sized Concave Feel Softer," in *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 15, no. 1, pp. 32-38, 1 Jan.-March 2022.
- [8] K. Tashiro, Y. Shiokawa, T. Aono, T. Maeno: A Virtual Button with Tactile Feedback Using Ultrasonic Vibration. In: Shumaker, R. (eds) *Virtual and Mixed Reality. VMR 2009. Lecture Notes in Computer Science*, vol 5622. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [9] K. Tashiro, Y. Shiokawa, T. Aono, T. Maeno: Realization of button click feeling by use of ultrasonic vibration and force feedback, WHC '09: *Proceedings of the World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Pages 1 – 6.
- [10] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, S. Tachi: Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation, 9th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT99), 1999.
- [11] A. Moscatelli, M. Bianchi, A. Serio, A. Terekhov, V. Hayward, MO. Ernst, A. Bicchi: The Change in Fingertip Contact Area as a Novel Proprioceptive Cue, *Curr Biol*. 2016 May 9;26(9):1159-63.