



皮膚電気刺激と力覚の融合による硬軟感提示 (第 3 報)

柔軟電極による皮膚感覚提示

Softness Presentation by Combining Electrotactile Stimulation and Force Feedback (III)
Using Flexible Substrate for Electrotactile Stimulation

須賀悠偉¹⁾, 竹内将大¹⁾, 田中叡¹⁾²⁾, 梶本裕之¹⁾

Yui SUGA, Masahiro TAKEUCHI, Satoshi TANAKA 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,
{suga, takeuchi, tanaka, kajimoto}@kaji-lab.jp)
- 2) 日本学術振興会

概要: バーチャル空間でリアルな触覚提示を行うには皮膚感覚と固有感覚両方の提示が必要である。本研究では硬軟感を題材とし、力覚提示装置でめり込み量に応じた反発力、電気刺激装置で接触面積を提示して硬軟感提示を行う。本報告では電気刺激にフレキシブル基板による柔軟電極を用いることで電極から与えられる不要な触覚手がかりを低減した。固有感覚と皮膚感覚の融合刺激の有効性を心理物理学実験により検討し、同時提示により柔らかさのリアリティが向上することを示した。
キーワード: 触覚, 力覚, 経皮電気刺激, 硬軟感

1. はじめに

人間は物体を指先で触るだけでその硬さを知覚できる。触覚による硬軟感の識別には、主に力覚に基づく変位と反発力の関係の知覚に加え、皮膚感覚に基づく物体との接触面積変化等の知覚が関わっていることが知られている[1].

柔らかさを力覚、皮膚感覚それぞれで提示する試みがある[2][3]が、リアルな硬軟感提示を行うためには、力覚だけまたは皮膚感覚だけを提示するだけでは不十分であり、力覚と皮膚感覚を組み合わせる必要がある[1]. そのため、力覚と皮膚感覚上で同時に硬軟感を提示する手法がいくつか提案されている[4][5]. しかし、力覚提示装置上に接触面積を機械的に変化させる皮膚感覚提示機構を取り付けると、システムが大掛かりになってしまう。

この課題を解決するために、皮膚感覚の提示手段として経皮電気刺激を用いる方法が考えられる。電気触覚ディスプレイは小型であるため、力覚提示装置末端への取り付けが比較的容易である。さらに、電気刺激による皮膚感覚提示は力の作用を伴わないため、力覚提示に影響を与えない。

アレイ状の多点電気触覚ディスプレイを用いて硬軟感を提示する手法自体はすでに提案されている[6][7]が、電気刺激に力覚刺激を組み合わせる硬軟感を提示する試みはなされておらず、提示刺激の定量的な硬軟感のリアリティ評価も行われていない。

我々は前報[8]において、人肌程度の柔らかさを持つ試料の硬軟感を再現する実験を行った。実際のサンプルに指が触れた際の、押下量に応じた接触面積増加を計測し、平板電極を用いた分布的な電気刺激によって再現する機構を作成した。さらにその電極を力覚提示装置に搭載し、一次元押下運動において「接触面積計測に基づいた電気刺激」と「力覚提示による一般的なヤング率の再現」を同時に提示した。その結果、提案手法による硬軟感のリアリティの向上を確認できた。一方で平板電極を用いていることにより指先皮膚と電極との接触が不安定であることや、硬平板自体の硬さによる硬軟感知覚への影響が課題となった。

本稿ではフィルム状の柔軟な電極を用いて前報[8]と同様の心理物理測定実験を行った。力覚提示装置と電気刺激装置を融合したシステムを用いることによる力覚提示への影響と提示される硬軟感のリアリティについて調査した。

2. システム

2.1 電気刺激装置

指先電気刺激を行う装置として、Kajimoto の電気刺激装置[9]と同様の刺激パルス生成システムで、電極部をフィルム状の柔軟な電極としたものを用いた。電極部は図 1 に示すように指形状を模した電極配置となっており、スリッ

トによって横1列ずつ変形することが可能で指先の曲面にも対応できる。また、電極シート下部に柔軟なスポンジを配置することで、電極を押し込んだ際に電極シートが指に沿う形になり、外縁の電極によって指側面への刺激提示が可能である。この装置では、HV513(Microchip)による高電圧スイッチ群により、指先に対して中心間距離 2.54mm のアレイ状に整列した 64 点の電極で約 22mA までの電気刺激が可能である。押下量に応じて刺激する電極を変化させることで、接触面積の変動を表現できると考えられる。

ある面積を表す電気刺激のパターンは、電極シートの中心部から広がる同心円形状として表現する。64 点の電極で任意半径の円形状をできるだけ高解像度に提示するために、ElectroAR[10]の Random Modulator を用いた。この手法では、特定の刺激強度を刺激される確率を用いて表現している。確率が高いほど平均刺激頻度は高くなる。本稿では接触面積を表現するために、接触部に相当する円半径を与え、電極シート中心から各電極までの距離との差 d を算出し、実際の円外周に近い電極ほど高頻度で刺激が行われるようにした。アルゴリズムは以下の式(1)で表される。

$$\text{if rand}() \geq d \text{ then stimulate}() \quad (1)$$

$\text{rand}()$ は0から1までの値をとる一様分布の確率変数で、各電極における指定円周との距離差 d の値より大きいときに電極に刺激を行う。任意の円半径から 1mm 以下の距離の電極へ刺激を行い、より近い電極ほど高頻度で刺激が行われるようにし、任意の円を表現する(図1)。ただし、電極シートが指の湾曲に沿って変形するために前後方向の電極間距離は 2mm 付近かそれ以下になる。これに厳密に対応するのは個人差で難しいため、今回は電極間隔を 2mm としてレンダリングし、刺激電極を決定している。

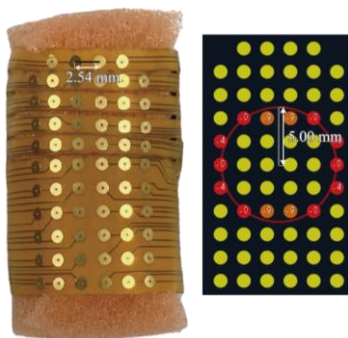


図 1: 電気刺激装置の電極部(左)と Random Modulator[10]による刺激電極フィッティングの模式図(右) 赤い円形の枠は、提示する円(半径 5.00mm)を示している。赤色や橙色で描画されている電極が式(1)に従って刺激される。

2.2 触力覚提示装置

前項の電気刺激装置と力覚提示装置を組み合わせ、力覚と経皮電気刺激による皮膚感覚を同時提示する装置を作

成した。力覚の提示には、Touch X USB(3D Systems)を用い、Touch X USB の力覚提示部に前項の電気刺激装置を取り付け、触力覚同時提示装置(図2)とした。

Touch X USB は、電極と機の接地面から 25mm 上部を基準平面とし、基準平面より下側にエンドエフェクタが位置したとき、その一次元の変位量に基づきばね弾性を発揮するように設定した。エンドエフェクタ位置は Touch X USB 内蔵のエンコーダが公称精度 0.023mm[11]で計測する。計測位置とコントローラで設定したばね定数に基づいて PC で直上方向の反力の計算が行われ、所望の力覚が発生する。ばね定数は最小 0.1N/mm, 最大 2.5N/mm の値をコントローラで1段階ずつ変動させるようにした。柔らかさ知覚のウェーバー比が約 15%である[12]ことを考慮し、ばね定数の1段階変調は 15%ずつ増減するように設定した。

電気刺激装置は、Touch X USB により計測されたエンドエフェクタの位置を受け取り、その値に基づいて刺激分布のパターンを提示する。変位量に応じた刺激分布のパターンの設計は、前報[8]にて計測したゲル試料の押下量に応じた接触面積(図3)に基づき、2種の人肌ゲル(株式会社エクシール、超軟質造形用樹脂【乳白】H0-100/H15-100)で作成した 30mm 角、25mm 厚の試料ゲル 0, ゲル 15 の接触面積増加を再現する電気刺激パターン4種を用いた。電気刺激パターンの詳細は表1の通りである。



図 2: 触力覚提示装置の外観

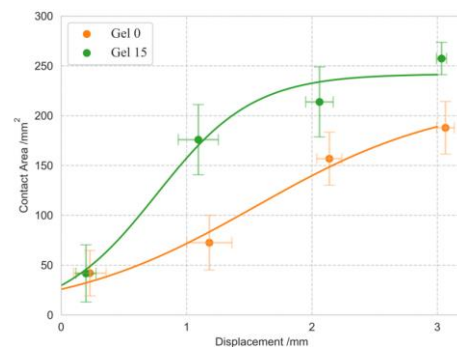


図 3: ゲル試料の接触面積計測結果[8]

表 1: 電気刺激パターン4種

呼称	再現試料	再現の種類
電気 A	ゲル 0	押し込むほど広がる
電気 B	ゲル 15	押し込むほど広がる
電気 C	ゲル 0	押し込むほど狭まる
電気 D	ゲル 15	押し込むほど狭まる

3. 実験

2.2 節の触力覚提示装置を用いて提示される電気刺激パターンの違いによる硬軟感の質を検討するために、2つの実験を行った。実験1では、提示される硬軟感の主観的等価点の違いを観察するために、実試料の柔らかさと提示される柔らかさを一致させる調整法を行った。実験2では、提示される硬軟感のリアリティを観察するために、実試料と提示される柔らかさの類似度を評価させた。2つの実験は被験者10名（男性9名、右利き7名、21-28歳、平均23.4歳）に対して行った。

3.1 実験1: 硬軟感の主観的等価点測定

硬さが既知の試料ゲル0, ゲル15の基準刺激に対し、提示装置の硬さを Touch X USB のばね定数を調整することで、知覚される柔らかさを一致させるというタスクを実施した。比較刺激は力覚提示と同時に表1の4種の電気刺激パターンを加える条件と、力覚のみ提示する条件の計5条件用意した。

被験者には、基準刺激の2種のゲルと、比較刺激の5種の提示パターンの組合せ10通りに対して、比較刺激の柔らかさが基準刺激の柔らかさに一致すると感じられる点まで提示装置のばね定数を調整させた。提示する組合せの順序は被験者毎にカウンターバランスを考慮したランダムな順序とした。各組合せで連続して3回調整を行わせ、3試行の中央値を主観的等価点として評価した。実験中、被験者はイヤーマフを装着して装置動作音・環境音を遮断した。ゲル試料と提示装置は目視できない状態にした。

3.2 実験2: 硬軟感の心理評価

基準刺激のゲル試料2種と比較刺激の提示パターン5種の組合せ10通りに対して、比較刺激と基準刺激の類似度を評価させるタスクを実施した。各組合せはカウンターバランスを考慮した順序で1回ずつ提示した。この実験での Touch X USB のばね定数は、各提示の組合せにおける基準刺激のゲルと同じ硬さで提示した。

各被験者には比較刺激と基準刺激の硬軟感の違いを評価する3種の質問事項「主観的・総合的にどれほど似ているか」「力感覚としてどれほど似ているか」「皮膚感覚としてどれほど似ているか」を7段階リッカート尺度（1:全く似ていない, 7:完全に一致）で回答させた。

4. 結果

4.1 実験1: 硬軟感の主観的等価点測定

被験者10名による調整結果について、各条件の硬軟感の主観的等価点を箱ひげ図にまとめた。ゲル0, ゲル15の調整結果はそれぞれ図4, 図5である。ゲル0, ゲル15の本来のヤング率は図中に点線で示している。それぞれ一元配置反復測定ANOVAで電気刺激パターンの種類における調整値の差異を検定した結果、それぞれ $p=0.298$, $p=0.352$ となり、有意差は確認されなかった。

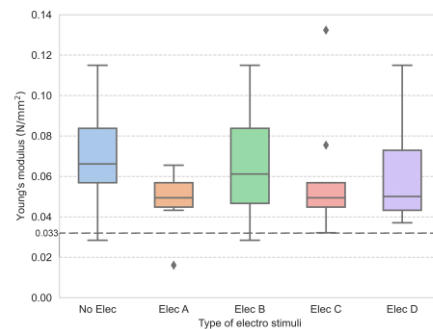


図4: ゲル0に対する調整結果

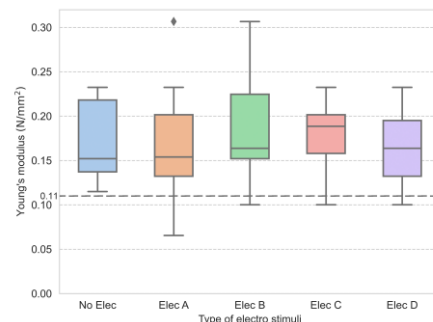


図5: ゲル15に対する調整結果

4.2 実験2: 硬軟感の心理評価

被験者10名による評価結果について、ゲル0, ゲル15に対する総合評価、力覚評価、皮膚感覚評価の箱ひげ図をそれぞれ図6, 図7にまとめた。図6, 図7に対しそれぞれFriedman検定を行った結果、ゲル0の皮膚感覚評価で $p=0.001$, ゲル15の皮膚感覚評価で $p=0.018$ となり有意差が確認された。Bonferroni法による多重比較検定を行うと、ゲル0の皮膚感覚評価における力覚のみ・電気Aの条件間で $p=0.024$, 電気A-電気Bの条件間で $p=0.005$, 電気A-電気Cの条件間で $p=0.037$ となり有意差が確認された。ゲル15の皮膚感覚評価における電気B-電気Cの条件間で $p=0.037$ となり有意性が確認された。

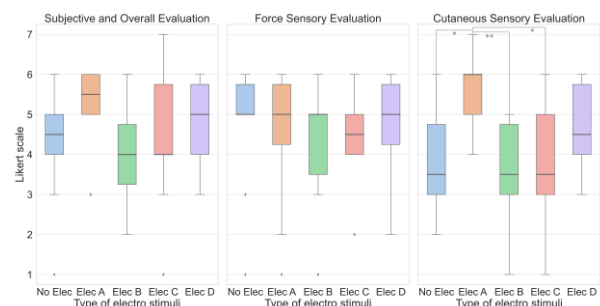


図6: ゲル0に対する心理評価結果 (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

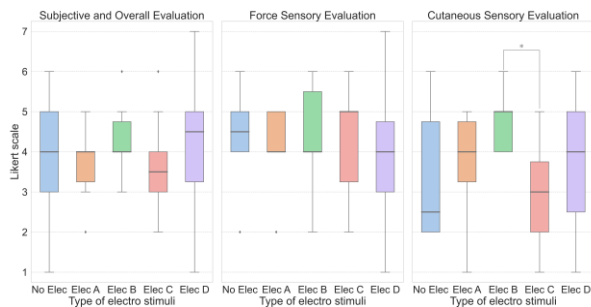


図 7: ゲル 15 に対する心理評価結果 (*: $p < .05$)

5. 考察

実験 1 の硬軟感の主観的等価点測定結果では、力覚刺激に電気刺激による皮膚感覚を加えても結果に有意差は生じなかった。これはヤング率で回答する柔らかさ知覚は電気刺激の影響を受けず、被験者は力覚刺激だけを頼りに調整できたと言え、前報[8]と同様の結果となった。しかし、前報[8]では主観的等価点の中央値はおおよそ基準刺激のゲルの硬さの近傍であったのに対し、今回の結果では中央値が一律基準刺激よりも硬いヤング率に位置していた。これは、フィルム状電極を指に沿わせるために用いたスポンジの柔らかさの影響があったため、より硬いヤング率に調整しないと同等の硬さを感じられなかったと考えられる。

実験 2 の硬軟感の心理評価では、皮膚感覚評価においてゲル 0、ゲル 15 それぞれに対して、実際の接触面積の広がり模擬した電気刺激（電気 A、電気 B）でのみ有意に柔らかさのリアリズムが向上し、前報[8]と同様の結果となった。しかし、前報[8]と比べると力覚のみ条件での評価値が比較的高く、ゲル 15 では力覚のみ-電気 B の条件間で有意差が確認できなかった。この現象に関しても、電極下部のスポンジの影響が考えられ、力覚のみ条件でもある程度皮膚感覚上の柔らかさを知覚してしまい、力覚のみ条件でも比較的高い評価がなされてしまった可能性がある。

今回の実験では、被験者 10 人全員が電気刺激のパターン変化を十分に感じ取れた。前報[8]では 10 人中 4 人がパターン変化を感じ取れなかったため、今回の柔軟な電極によって安定的な電気刺激提示が行えたことが示唆された。

6. おわりに

本稿では、フィルム状の柔軟な電極を用い、一次元の押下運動における力覚提示に接触面積計測に基づいた電気刺激提示を組み合わせることによる硬軟感知覚の変容を観察した。調整法による主観的等価点測定、リッカート尺度による心理評価を踏まえ、電気刺激によって力覚提示に影響を与えず皮膚感覚提示を行える可能性を示し、試料の接触面積増加を模擬した電気刺激パターンを提示することで有意な硬軟感のリアリティ向上が確認できた。

今回の検討では、電極下部のスポンジが硬さ知覚へ影響を及ぼしたため、今後は電極下部の部材が硬さ知覚に影響を与えないようにし、さらなる高品位な硬軟感提示を狙う。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20H05957 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. A. Srinivasan and R. H. LaMotte: "Tactual discrimination of softness," *J. Neurophysiology*, vol. 73, pp. 88-101, 1995.
- [2] J. Liu, A. Song and H. Zhang, "Research on Stiffness Display Perception of Virtual Soft Object," 2007 International Conference on Information Acquisition, 2007, pp. 558-562.
- [3] 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.
- [4] E. P. Scilingo, M. Bianchi, G. Grioli and A. Bicchi, "Rendering Softness: Integration of Kinesthetic and Cutaneous Information in a Haptic Device," in *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 3, no. 2, pp. 109-118, 2010.
- [5] J. Park, Y. Oh and H. Z. Tan, "Effect of Cutaneous Feedback on the Perceived Hardness of a Virtual Object", *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 4, pp. 518-530, 2018.
- [6] S. Takei, R. Watanabe, R. Okazaki, T. Hachisu, H. Kajimoto, "Presentation of Softness Using Film-Type Electro-Tactile Display and Pressure Distribution Measurement", *Haptic Interaction*, vol. 277, pp. 91-96, 2015.
- [7] V. Yem, K. Vu, Y. Kon and H. Kajimoto, "Effect of Electrical Stimulation Haptic Feedback on Perceptions of Softness-Hardness and Stickiness While Touching a Virtual Object," 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 89-96, 2018.
- [8] 須賀悠偉, 竹内将大, 田中叡, 梶本裕之, "皮膚電気刺激と力覚の融合による高品位な硬軟感の提示", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2022.6.
- [9] H. Kajimoto, "Electro-Tactile Display Kit for Fingertip", in *IEEE World Haptics Conference 2021 Work-in-Progress*, 2021.
- [10] J. Tirado, V. Panov, V. Yem, D. Tsetsrukou and H. Kajimoto, "ElectroAR: Distributed Electro-tactile Stimulation for Tactile Transfer", In: *Haptics: Science, Technology, Applications*. 2020.
- [11] 3D Systems, "Touch X - Specifications", 2019, <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch-x/specifications>
- [12] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers: "Cues for haptic perception of compliance", *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 2, No. 4, pp.189-199, 2009.