



# 皮膚電気刺激と力覚の融合による 硬軟感の高品位化の検討

Consideration of High-Definition Softness Presentation

by Fusion of Electrical Skin Stimulation and Force Sensation

須賀悠偉<sup>1)</sup>, 竹内将大<sup>2)</sup>, 田中叡<sup>2)3)</sup>, 梶本裕之<sup>2)</sup>

Yui SUGA, Masahiro TAKEUCHI, Satoshi TANAKA and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, suga@kaji-lab.jp)

2) 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, {takeuchi, tanaka, kajimoto}@kaji-lab.jp)

3) 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を喚起する必要がある。力覚または皮膚感覚で硬軟感を提示できることが知られている。本研究では、力覚提示でめり込み量に応じた反発力、皮膚感覚提示で刺激分布の広がり提示し、それぞれで柔らかさ感覚を提示させ、それらを組み合わせ高品位な硬軟感提示を目指す。力覚の提示手段として 1 自由度アクチュエータを、皮膚感覚の提示手段として電気刺激を用いる。本項においては、心理物理学的な被験者実験を行い、皮膚感覚と力覚の融合刺激の有効性を検討した。

**キーワード**：硬軟感、力覚、触覚、経皮電気刺激

## 1. はじめに

人間は物体を触るだけでその硬さを知覚できる。このような硬軟感の識別には、主に深部感覚（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]。力覚と皮膚感覚を同時に正しく提示できれば、片方のみの提示と比べてよりリアルな硬軟感の提示が可能となると考えられる。この考えに基づき、力覚と皮膚感覚を同時提示することによる硬軟感提示手法が複数提案されている[2][3]。しかし、接触面積変化を物理的に提示する方法は力覚提示装置と組み合わせる際に本来は無い「指を押しつぶす」圧力が加わることで余計な力覚の手がかりが生じてしまう可能性がある。また接触面積変化のためには、ある程度大きな機構を力覚提示装置末端に取り付ける必要があるという課題がある。

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。アレイ状の電気触覚ディスプレイによって接触面積変化の手法と同様に硬軟感を提示する手法自体はすでに提案されている[4][5]。電気刺激による皮膚感覚提示は物理的な力の作用を伴わないため、力覚提示に影響を与えない。また将来的に柔軟な（あるいは皮膚に貼り付ける形態の）電極を用いれば、力覚提示が皮膚感覚提示に影響を与えない状況も作りうる。すなわち力覚と皮膚感覚を独立に提示することが

可能であると考えられ、硬軟感の設計がより用意になると期待できる。さらに電気触覚ディスプレイは小型、高密度の提示が容易であるため、力覚提示装置末端に取り付けることが比較的容易であり、またエッジなどの形状も提示可能であるため汎用性も高い。

以上の考察に基づき、本研究では、硬軟感提示のための皮膚感覚提示要素として電気刺激を用いた場合の、力覚提示との融合について検討する。一次元の上下運動において力覚提示装置と電気刺激装置を用いた力覚・触覚の同時刺激心理物理実験によって硬軟感知覚の変容を観察する。

## 2. 実験装置

一次元的な押し込み量に応じて触力覚提示を行うために、スライドボリューム（ALPS ALPINE CO., LTD., RSA0N11M9A0K）を用いた。基準位置からの変位量を得ることにより、押し込み量に応じた反発力の計算を行い、スライドボリュームに搭載されている DC モータを PWM 制御で駆動させて力覚による硬軟感提示を行う。提示は PWM 周波数 39kHz、更新周波数 12kHz で行なった。

スライドボリュームのつまみ上に指先電気刺激を行う装置[6]を取り付けることで、力覚に加え電気刺激による皮膚感覚を提示する。この電気刺激装置では、高電圧スイッチ群を HV513(Microchip)が構成しており、指先に対して横 7 列、縦 9 列、中心間距離 2mm の電極で約 22mA までの

電気刺激の提示が可能である。押し込み量に応じて刺激する電極のパターンを変えていくことで、接触面積の広がりや再現できると考えられる。電気刺激装置と同サイズのマウント部材を作成し、電極刺激装置とスライドボリュームを固定し実験装置とした(図1)。

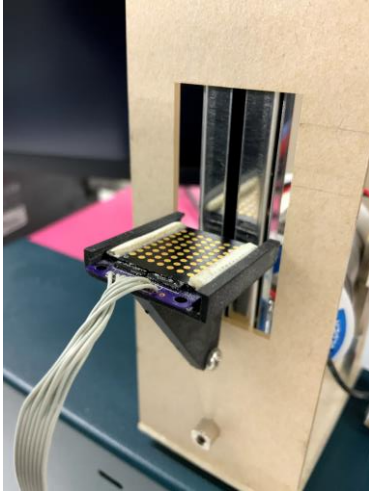


図1: 実験装置

この提示装置を用いて、変位量 1mm で最大反力を発揮する硬い物体から、変位量 10mm で最大反力を発揮する柔らかい物体までを再現するために、最大 10 までの値を取る硬さ係数  $w$  を導入した。本実験装置の反力提示に用いる PWM 制御の duty 比  $f$  を、変位量  $x$ [mm] および硬さ係数  $w$  を用いて以下の(1)式のように設定した。ただし  $f$  の最大値は 1 である。

$$f = \frac{w}{10}x \quad (1)$$

この硬さ係数  $w$  により表現されるヤング率を算出した。フックの法則に従う線形材料のヤング率  $E$  は、物体に与える力  $F$ 、力を加える面積  $A$ 、物体の元の厚さ  $l$ 、力を加えたことによる厚さの変化  $\Delta l$  を用いて、次式で表される[7]。

$$E = \frac{Fl}{A\Delta l} \quad (2)$$

提示装置に錘を載せ、変位量  $\Delta l$  を測定した。提示装置による仮想物体の元の厚さ  $l$  を 10mm と仮定し、物体の接触面積  $A$  を 202.18mm<sup>2</sup> とした。なお、接触面積  $A$  の値は、マウント部に装着した電極面サイズと同様の紙片に対して、著者のうち一名がインクをつけた右手人差し指を 90gf で押下した際に付着したインクの面積とした。

硬さ係数  $w$  を 1 から 10 まで 1 刻みで変動させ、ヤング率  $E$ [N/mm<sup>2</sup>] を測定した結果が図 2 である。

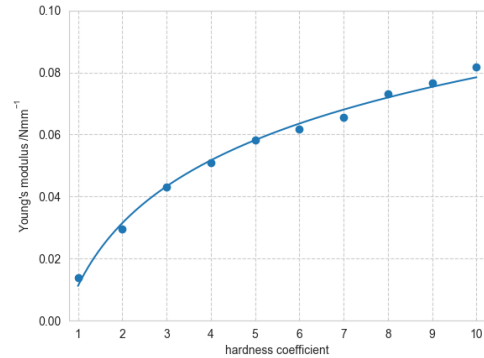


図2: 本提案の力覚提示装置で提示されるヤング率

図 2 のプロット点を対数フィッティングすると、(3)式のようになり、硬さ係数  $w$  からヤング率を対応付けることができる。

$$E = 0.0292 \ln w + 0.0112 \quad (3)$$

なお、このスライドボリュームに搭載されている DC モータの性能は、定格電圧 10V において作動力  $0.8 \pm 0.5N$  であった。本項においてはこの機器を CVCC 電源の 12V 電圧、最大電流 0.8A で駆動している。このときのスライドボリュームの牽引力を測定するために、牽引できる錘の最大重量を求めると、90g であった。力覚提示上でも実際に 90gf 以上の力を加えると力覚上で不自然な感覚が生起してしまうことを確認し、また、200gf 以上の力を数十秒間加え続けると DC モータが異常発熱し破損してしまうことを確認した。このスライドボリュームを用いて実験を行う際には押下力を 90gf 程度に統制する必要があった。

### 3. 実験

#### 3.1 実験概要

本実験は、提案手法の力覚と触覚の同時刺激により提示される硬軟感が、力覚のみのものと比べて変化することを確認するとともに、より高品位な硬軟感提示となる可能性を検証する。今回は基準刺激として硬さの異なる 3 種のゲルを用い、比較刺激として力覚のみの刺激または力覚と触覚の同時刺激を用いて、被験者に提示装置の硬さを各ゲルと同じ硬さに調整を行わせる調整法を実施した。力覚と触覚の同時刺激では、提案手法における広がる電気刺激の有効性を併せて検証するために、広がる電気刺激のほかに、異なる電気刺激パターンでの刺激条件を加えた。

#### 3.2 実験条件

##### 3.2.1 被験者

実験は被験者 10 名 (男性 9 名, 女性 1 名, 21-27 歳, 平均 23.2 歳) に対して行なった。利き手は右手 7 名, 左手 3 名であった。

##### 3.2.2 基準刺激

今回の実験の基準刺激として、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/H5-100/H15-100)を用いた。それぞれアスカーC 硬度 0, 7, 15 に対応する (以降ゲル 0, ゲル 7, ゲル 15 と呼ぶ)。それぞれの原液から, 提案手法の触力覚提示部と同様のサイズで厚さ 10mm のゲルを作成し, 基準刺激とした。作成した 3 つのゲルのヤング率を 2 章で記したヤング率算出法[7]と同様にある重量の錘を載せたときの厚みの変位量を観察し測定すると, ゲルのヤング率はそれぞれ  $0.03914\text{N/mm}^2, 0.08085\text{N/mm}^2, 0.1018\text{N/mm}^2$  と求められた。

### 3.2.3 比較刺激

提案手法の触力覚提示装置によって提示される力覚と皮膚感覚のパターンを 3 種用意し, 比較刺激とした。第 1 のパターンは, 力覚のみを提示し, 電気刺激を用いないもの, 第 2 のパターンは, 力覚と押下量に応じて広がる電気刺激を提示するもの, 第 3 のパターンは, 力覚と押下量に応じて狭まる電気刺激を提示するものである。電気刺激の広がり, 狭まりはそれぞれ提示部を 1mm 押し込むと 2.5mm ずつ広がり, 狭まるようにしており, 反力が最大に達するとそれ以上押し込んでも電気刺激が変化しないようにした。

被験者が硬さ係数を 0.1 ずつ調節できるようにした。

なお, 提示装置の故障などを防ぐため, やむを得ず被験者が装置を目視可能な状態で比較刺激を提示した。

### 3.3 実験手順

被験者は, 基準刺激の 3 種のゲルと, 比較刺激の 3 種の提示パターンの組み合わせ 9 通りに対して調整を行なった。被験者毎に組み合わせの条件の順番はランダムとした。

電気刺激は陰極刺激で刺激周波数 60Hz, パルス幅は一律 45us とした。実験開始前に, 被験者毎にパルス高さを電気刺激が知覚でき痛みを感じない強度に設定した。

被験者には実験開始前に提示部を 90gf 程度のソフトタッチで押下するように指示し, 電子天秤を用いて練習させた。また, 被験者に提示部へ故意に大きな力を加えさせ, 不自然な力覚がどのような感覚であるか理解させ, 実験の最中にそのような感覚が生じた場合は調整の知覚として用いないよう指示した。

実験中被験者は防音イヤーマフ (EP107, Long Dar) を装着し, 装置の動作音などを遮断した。

実験時, ゲルは提示部と同じ高さに暗幕で隠された状態で置かれ, 被験者はゲルが目視できない状態で押下した。

被験者は利き手示指を用いて人肌ゲルの硬さを記憶し, 提示部を同じ指で押下しながら硬さを調整した。被験者自身が硬さ調整アプリケーションをマウスで操作し提示装置の硬さを変更した。ゲルの硬さと提示部の硬さが同様に感じられた時点で調整を終了した。

以上の操作を 9 条件すべてに対して行なった。実際の実験の様子は図 3 の通りである。



図 3: 実験の様子

9 条件の調整終了後, 被験者に「調整は簡単であったか」「反力による硬軟感の違いを知覚できたか」「2 種の電気刺激の違いを知覚できたか」の 3 項目について, 7 段階リッカート尺度 (1:まったく当てはまらない~7:非常によく当てはまる) で回答させた。最後に, 実験に対するコメントを自由回答で要求した。

### 3.4 実験結果

ゲル 0,7,15 に対する各刺激条件での調整結果は図 4 のようになった。

以上の実験結果に対して二要因分散分析を行うと, ゲルの種類に有意差 ( $F(2,18)=39.208, p=0.000$ ) が得られた。電気刺激の方式 ( $F(2,18)=0.784, p=0.471$ ), および交互作用に有意差 ( $F(4,36)=0.534, p=0.711$ ) は得られなかった。

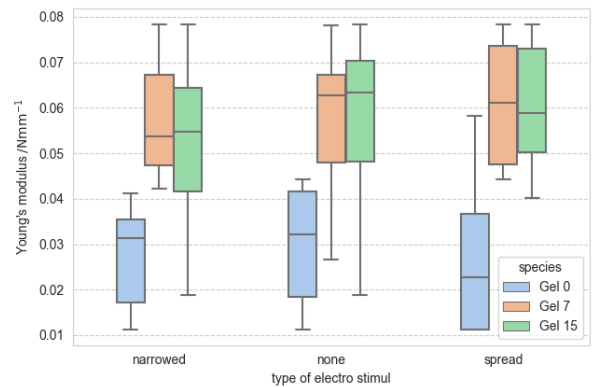


図 4: 実験結果

7 段階リッカート尺度での設問への回答結果は図 5 のようになった。

被験者による実験に対するコメントとして, 「力覚提示装置で硬さ係数が高いとき, 装置が振動し知覚上のノイズとなった」「電気刺激によって確かにより柔らかい物体に触っている感覚があった」「電気刺激によって物体がより硬く感じられることがあった」「硬さ係数 0.1 の増減の知覚が非常に難しかった」「90gf 程度の押下では弱すぎて正常な硬さ知覚ができなかった」といったものが得られた。

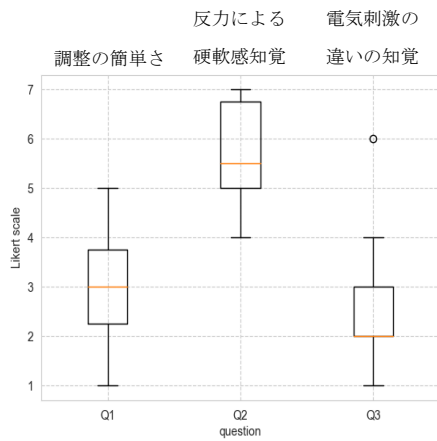


図 5: リッカート尺度での質問回答結果

#### 4. 考察

今回の実験結果では、ゲルの種類による硬さ知覚の違いは有意であったものの、電気刺激による硬さ知覚の違いには有意性がなかった。この点に関して考察を述べる。

まず、電気刺激のパターンが少なかったことが要因の一つだと考えられる。今回提示した電気刺激は押し込みに対して単純に提示領域が広がるパターンと狭まるパターンのみであり、提示したい硬さに対応した刺激速度やパルス間隔の変化を行っていなかった。

また、電気刺激知覚の不安定性も要因の一つであると考えられる。今回被験者は何にも接触していない状態から電極に接触し、すぐに押下するという手順をとった。電気刺激は安定した接触が必要であるため、接触してから数秒たって局所的な接触面積（真実接触面）が確保されないと安定した刺激ができない。このため今回の実験方式では安定した触覚提示ができていなかった可能性がある。また電極との物理的な接触の瞬間に硬軟感を判断できてしまっていた可能性もある。

さらに、大きな要因として、力覚提示装置の性能が不十分であったことが考えられる。今回提示に用いた DC モータは、90gf 程度の反力しか自然に提示できず硬さ係数  $w$  が大きいとモータが振動してしまい、力覚提示デバイスとして用いるのには不十分であった。実際、基準として用いた最も軟らかいゲル 0 のヤング率しか提示できず、ゲル 7,15 のヤング率は提示できなかった。この点についてはモータの交換や既存の高品質な力覚提示デバイスを利用することが考えられる。

次に被験者コメントについて考察する。今回の条件で電気刺激があることにより柔らかさ感覚がはっきりと生起したと回答する者が 3 名存在しており、電気刺激の硬軟感知覚への有効性は棄却されないと考えられる。一方で、柔らかい感覚を生起させる電気刺激を提示したにもかかわらずより硬く知覚した被験者も存在した。これは皮膚感覚の増加を力覚の増加と解釈した可能性がある。

「硬さ係数 0.1 の増減の知覚が非常に難しかった」とい

うコメントについては、硬軟感知覚の Weber 比が約 15% である[8]ことを考えると、硬さ係数 0.1 の増減の知覚が非常に難しかったのは当然と言え、Weber 比を考慮したうえで変化幅を設定するべきであった。

#### 5. おわりに

本研究では、力覚提示装置と電気刺激装置を組み合わせ、反力提示と接触面積の広がり提示を同時に行うことによる硬軟感知覚の高品位化について検討した。結果として、現状では組み合わせの有効性は見られなかったが、被験者から「電気刺激によって確かにより柔らかい物体に触っている感覚があった」というコメントを得た。今後は実験条件や提示装置を見直す必要がある。特に今回作成した力覚提示装置には不備があったため、今後は高品質な力覚提示装置を採用することを検討している。

**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. 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.
- [3] 池田 義明, 藤田 欣也, "指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌* 9 巻 2 号, 2004.
- [4] 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.
- [5] 神山直樹, 望月典樹, 稲生太一, 中村壮亮, "湾曲型アレイ電極を用いた刺激面積変化による硬軟感提示に関する検討", 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2019.
- [6] Hiroyuki Kajimoto, "Electro-Tactile Display Kit for Fingertip," in *IEEE World Haptics Conference 2021 Work-in-Progress*, July 2021.
- [7] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers, "Physical Aspects of Softness Perception", *Multisensory Softness*, pp 3-15, 2014.
- [8] 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.