



# 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

Consideration of Presenting Softness-Hardness Feelings by Changing Stimulation Area using Curved Electrodes

神山直樹<sup>1)</sup>, 望月典樹<sup>2)</sup>, 稲生太一<sup>1)</sup>, 中村壮亮<sup>2)</sup>

Naoki KAMIYAMA, Noriki MOCHIZUKI, Taichi INO, and Sousuke NAKAMURA

1) 法政大学 理工学研究科 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, hge@hosei.ac.jp)

2) 法政大学 理工学部 (〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, hge@hosei.ac.jp)

**概要:** 経皮電気刺激を用いた皮膚感覚提示に関する研究では, 硬軟感に大きく影響を及ぼすとされる指腹部における物体との接触面積の変化が, 従来の平板型電極では十分に再現できていない可能性が示唆された. そこで我々は, 指先側部まで刺激可能な湾曲型アレイ電極を開発し, 物体接触時の面積変化を模擬する形で刺激箇所を時系列に変化させた際の硬軟感知覚について調査した.

**キーワード:** 触覚, 経皮電気刺激, 硬軟感

## 1. はじめに

VR (Virtual Reality) では, 本来リアル空間で生じ得る感覚を可能な限り再現することが現実感の向上に繋がる. 感覚の中でも物体とのインタラクションにおいて発生する物体表面の凹凸感や粘着感, 硬軟感といった触覚の提示は現実感の観点において重要であり, 触覚提示デバイスとしてこれまでも多く検討されてきた. 触覚は主に皮膚感覚に起因して認知される感覚であり, これがユーザの臨場感や没入感の向上に繋がることも期待される. そこで, 日常での触動作においても欠かせない皮膚感覚への刺激として, 硬軟感をバーチャルに提示する研究が行われている. 硬軟感を提示する手法としては, 振動[1]やゴムシート[2], 電気刺激[3]などを用いるシステムが提案されている. ただ, 振動刺激は機械的な動作部分が多いため細密化が難しく, ゴムシートや織物生地[4]もシステム構成が大きいが故に小型化が難しいという問題がある. そこで本稿では, 小型化や軽量化といった汎用性の高いシステムの構築が期待できる経皮電気刺激による硬軟感提示を実現するデバイスの開発と, その評価結果について論ずる.

### 1.1 硬軟感の認知メカニズム

物体の硬軟感の認知では, 体性感覚である皮膚感覚と深部感覚の相互作用が影響する.

深部感覚は, 指を物体に沈没させる際に筋紡錘などの固有感覚器官が平衡感覚の変化量を知覚し, 指の能動的な押し込み動作を割り出す.

また皮膚感覚は, 物体へ加えた応力に対する指への反力を機械受容器が知覚し, 物体と皮膚との接触面積を割り出す. 硬い物体では, 指と物体との接触面積は小さく接触圧

も指先の指腹部に集中するが, 柔らかい物体では, 指と物体との接触面積が大きいため接触圧は接触面内の広範囲に分散され, 広範囲の機械受容器の神経が発火する.

このように硬軟感の認知メカニズムは, 大きく分けて能動的要因の深部感覚と受動的要因の皮膚感覚に分類できる.

### 1.2 接触面積変化による硬軟感提示に関する先行研究

硬軟感を提示する手法として, 指先皮膚との接触面積を動的に変化させる手法[5]や, ゴムシートと指先皮膚との接触面積変化によって硬軟感を提示する手法[2]が提案されている. また藤田らは, 未知の物体の硬軟感を判別する際, 接触面積に変化が感じられなくなるまで, つまみ動作を続ける法則性も確認されており, 接触面積制御の重要性を示唆している[6]. 近年では, 機械受容器への刺激を主とした触覚提示により硬軟感を再現し, 皮膚感覚の影響を支持する研究も多い[7][8]ことより, 接触面積の制御は有用な手段であることが考えられる.

経皮電気刺激のみを用いた硬軟感の提示に焦点を当てた場合, 武井らが皮膚上の圧力分布域を電気刺激パターンにて再現した[9]. しかし, 武井らの研究で用いられていた平板型の電極では, 皮膚と電極の接触域は指腹部の一部に制限されるため, 指側面に分布する機械受容器の神経を刺激できない. そのため皮膚感覚の再現では, 実環境で認知する触覚との乖離により, 違和感を覚える触覚の生成に留まる恐れがある.

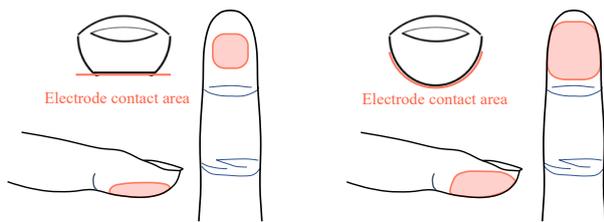


図1：指と電極の接触面積の比較  
(左：従来の平板型電極，右：湾曲型電極)

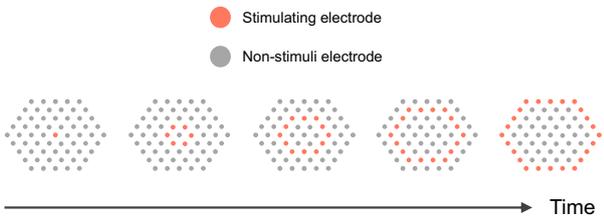


図2：刺激電極位置の時系列変化

### 1.3 研究目的

本研究で使用する湾曲型電極（図1右）では刺激可能な指先皮膚の領域が広く，指側部の機械受容器の神経が刺激できる．これにより，指腹部において刺激範囲の制限を受けることなく触覚生成の実現ができ，実際の硬軟感を模した皮膚感覚の提示が可能であると考えられる．ここでは，湾曲型電極を用いて様々な電気刺激パターンに対して生じられる硬軟感を調査した．

## 2. 提案手法

### 2.1 接触面積変化の実現手法

全ての電極が指先皮膚と接触している条件の下，図2に示す電気刺激パターンを指先へ提示する．この刺激パターンは，中心電極から徐々に刺激電極数を増加させるため，円状の刺激すなわち接触面積の広がる様子を再現する．

### 2.2 機械受容器内の神経の発火頻度

機械受容器の応答特性への注目として，力に対する機械受容器の発火タイミングを見ると，加える圧力に応じて受容器の神経が一定の間隔で応答する[3]．既存研究においても，硬さ評価値と弾性評価値はともに非線形的な様子[10]で変化することが報告されていることより，硬軟感の再現では必至課題であることが考えられる．しかし，柔らかい物体とのインタラクションでは，指腹部における圧力分布の変化は[3]とは異なることが考えられるため，硬軟感の生成ではこれを模す神経発火を促す必要がある．

そこで接触面積の広がり方を電気刺激で再現する手法として，中心部から周縁部にかけて配置された1～5層の電極に関して，それぞれの層ごとにパルス間隔  $T_R$  および刺激時間  $T_S$  を設定する．これにより神経発火の遅延を生じさせ，面積の広がりを非線形的に表現する．なお，図3における刺激パラメータは，式(1)に従って設定する．

$$T_n = E_n(T_S + T_R) \times C \times R_n \quad (1)$$

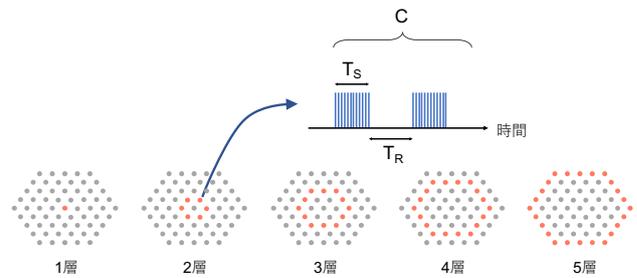


図3：パルス間隔  $T_R$  の段階的な変更

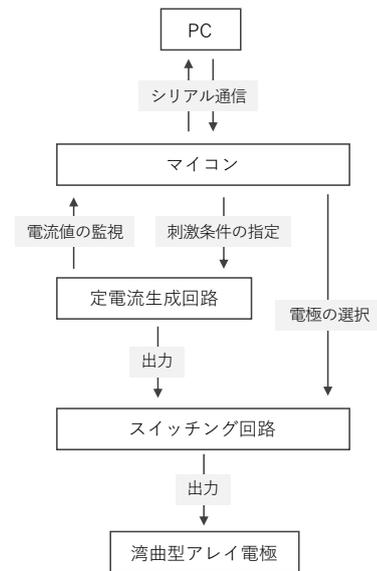


図4：システム概要

ただし各パラメータは以下の通りとする．

- $E_n$  :  $n$ 層の電極数
- $T_S$  : 刺激時間
- $T_R$  : パルス間隔
- $C$  : 刺激の繰り返し数
- $R_n$  :  $n$ 層における走査数

本研究では，刺激の繰り返し数  $C=4$  とし，その他のパラメータは各層の刺激の総時間  $T_n$  が一定になるように各々設定する．また，複数電極への電流印加が痛覚神経を刺激する恐れがあるため，刺激電極を1点1点高速で変化させる走査により，複数点への同時刺激を再現する．走査における周回数を走査数  $R_n$  とする．

## 3. 構築したシステム

### 3.1 電気刺激生成装置

電気刺激生成装置の構成を図4に示す．梶本ら[3]の電気刺激装置を参考に製作した定電流生成回路に10 kHzの矩形波を入力し，出力された信号を高電圧スイッチングIC (HV507, Microchip) にてスイッチングした．スイッチングされた信号のパルス間隔  $T_R$  を100～500  $\mu$ sに変化させ，アレイ電極を通じて被験者に加えた．電流値は被験者が刺激を明確に知覚できるように0～3 mAで各自設定してもらった．

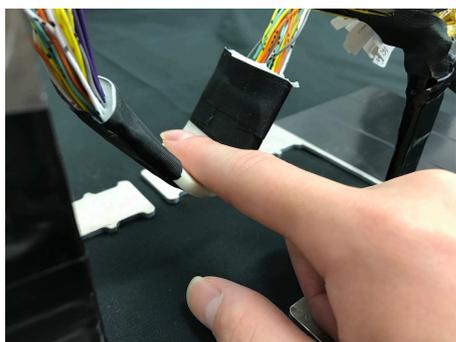


図 5：湾曲型アレイ電極の仕様（湾曲時）

### 3.2 湾曲型アレイ電極

作成した湾曲型アレイ電極（図 5）は 61 個の電極から構成され、各電極は直径 1 mm、電極間距離は 1.5 mm である。各電極は高電圧スイッチング IC と接続されており、刺激電極を自由に制御できる仕様とした。また、電極バンドはシリコン樹脂で製作されており、各被験者の指に沿うように湾曲できる。

## 4. 実験・考察

湾曲型アレイ電極を用いた硬軟感提示の有効性を検証するため、刺激箇所を時系列で変化させた場合の硬軟感知との関係を確認した。また同時に、刺激提示の際に主観的な知覚面積を記録し、その影響を調査した。

なお本実験は人を対象とした実験であり、被験者へ電気刺激を加える実験のため、安全を第一に考慮した環境にて実験を実行した。実験は被験者 9 名（21~24 歳、男性）に対して行い、左手人差し指に湾曲型アレイ電極を装着し、右手でマウスを用いてコンピュータ上でタスクを実行してもらった。被験者は全員健康状態が良好であり、実験内容を理解した上で参加してもらった。

### 4.1 刺激電極数と知覚面積の対応関係

接触面積の変化を電気刺激にて再現することに先立ち、本実験では刺激電極数と接触面積の関係性導出を目的に実験を行なった。被験者には 37 個、61 個の電極を使用した刺激を無作為に提示し、刺激が加えられた際の知覚面積を回答してもらった。PC 上に円形の図形を表示し、知覚面積を指腹部全体の総面積と比較した相対値として、円形の大きさを回答してもらった。

実験結果より、各電極における面積の平均値は、電極数が少ない方から順に 36.04%、59.51% であり、刺激電極数が多いほど、刺激面積を大きく知覚したことが読み取れる。また、図 6 において t 検定を行なった結果  $p = 6.36 \times 10^{-3}$  となり、電極数間において有意差が認められた。これより、被験者は電極の数を正しく弁別できていると言えることが示唆された。

### 4.2 硬軟感に関与する刺激パラメータの探索

機械受容器内の神経の発火頻度と刺激時間  $T_S$  の制御が硬軟感に及ぼす影響の調査として、刺激パラメータの探索を目的とした評価 A および評価 B からなる 2 種類の実験

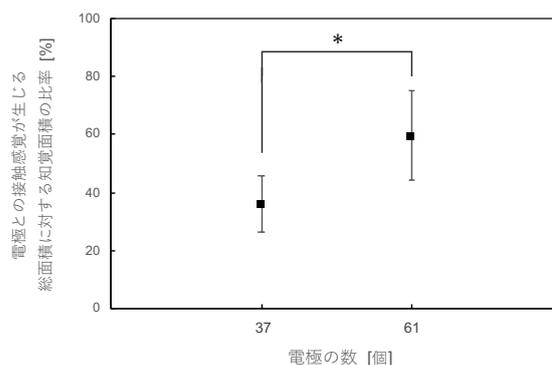


図 6：電極に対する接触感覚が生じた総面積に対する知覚面積の比率

\* :  $p < 0.01$

を行った。評価 A では、パルス間隔  $T_R$  が異なる 2 種類の刺激を用意し、一方の刺激はパルス間隔  $T_R$  を 100~500  $\mu\text{s}$  で段階的に変化させ、もう一方を 400  $\mu\text{s}$  で固定した。評価 B では、刺激時間  $T_S$  が 200  $\mu\text{s}$  または 400  $\mu\text{s}$  と設定した。評価 A および評価 B の実験では、それぞれ無作為な順番に刺激を提示し、強制選択法により「柔らかい」と感じた刺激を 2 種類の中から 1 つ回答してもらった。

パルス間隔  $T_R$  が一定間隔で提示される場合と比較して、全回答の 77.8% が非線形的に変化する刺激を「柔らかい」と回答した。カイ二乗検定では 2 種類の刺激の回答結果に差は認められなかった ( $p = 9.56 \times 10^{-2} > 0.05$ ) もの、パルス間隔  $T_R$  を非線形変化させた提案手法による硬軟感提示の実現可能性が示唆された。

また、刺激時間  $T_S$  を変化させた実験では、全回答の 66.7% が刺激時間  $T_S$  の短い刺激を「柔らかい」と回答した。内観報告より 2 種類の刺激をそれぞれ「弱い刺激」「強い刺激」と表現する被験者が多く、「弱い刺激」すなわち刺激強度が小さい 200  $\mu\text{s}$  の刺激を柔らかい触覚として認知する傾向が確認できた。このことよりも、刺激時間  $T_S$  の短縮が硬軟感に影響を及ぼすことが示唆された。

## 5. まとめ

本研究では、経皮電気刺激による硬軟感の提示に関して、指先の側部まで刺激可能な湾曲型アレイ電極と、物体接触時の面積変化を模擬する刺激パラメータの提案を行った。刺激電極数の識別実験では、被験者は電極数の変化を正しく識別できており、湾曲型アレイ電極を用いる提案手法の有効性が示唆された。また、パルス間隔  $T_R$  を非線形的に変化させることで硬軟感を表現する検証では、全回答の 77.8% が提案手法の刺激を「柔らかい」と回答し、経皮電気刺激におけるパルス間隔  $T_R$  が硬軟感に与える影響を確認した。

今後は、実験結果に基づき刺激パラメータを再考し、刺激時間  $T_S$  とパルス間隔  $T_R$  の影響を詳細に精査すると共に、提案手法の効果向上や視覚提示と複合した環境の構築に関して検討していきたい。

謝辞 本研究における被験者実験は、法政大学研究倫理委員会の承認 (規定 1142 号) を得て行ったものである。

### 参考文献

- [1] 佐々木博, 藤田欣也: 「力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討」, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.5, No.1, pp.795-802, 2000.
- [2] F. Kimura, A. Yamamoto, and T. Higuchi: 「Development of a Contact Width Sensor for Tactile Tele-Presentation of Softness」, *The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 2010.
- [3] 梶本裕之: 「触原色原理に基づく電気触覚ディスプレイ」, *東京大学博士論文*, 2004.
- [4] M. Bianchi, A. Serio, and E. P. Scilingo: 「A New Fabric-based Softness Display」, *IEEE Haptics Symposium*, 2010.
- [5] K. Fujita and H. Ohmori: 「A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control」, *Proceedings of the 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, pp.78-82, 2001.
- [6] 藤田欣也: 「弾性物体の硬さ認知のためのつまみ動作における制御則」, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J85-D-II, No.11, pp.1733-1740, 2002.
- [7] W.M. Bergmann Tiest and A.M.L. Kappers: 「Kinaesthetic and cutaneous contributions to the perception of compressibility」, *Proceedings of the EuroHaptics 2008*, pp.255-264, 2008.
- [8] R. M. Friedman, K. D. Hester, B. G. Green, and R. H. LaMotte: 「Magnitude Estimation of Softness」, *Exp Brain Res*, Vol.191, pp.133-142, 2008.
- [9] 武井聖也, 渡辺亮, 岡崎龍太, 蜂須拓, 梶本裕之: 「圧力分布に基づく電気刺激パターンの変調による弾性感の提示」, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概論集*, 2014.
- [10] 入江隆, 藤田尚文, 中西秀男, 太田学: 「やわらかさ知覚のメカニズム」, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J91-A, No.1, pp.162-171, 2008.