

## 静電摩擦触感ディスプレイでの柔らかさ表現

Softness Presentation via Friction Force Control on Electrostatic Tactile Panel Display

○学 Giryeon KIM (名古屋大) 正 岡本 正吾 (名古屋大)

正 秋山 靖博 (名古屋大) 正 山田 陽滋 (名古屋大)

Giryeon KIM, Shogo OKAMOTO, Yasuhiro AKIYAMA and Yoji YAMADA, Nagoya University

This study proposes a softness presentation method for when the finger slides on a hard touch panel. Herein, an electrostatic tactile display was made to present a friction stimulus, the frequency of which was changed by virtue of the normal force and speed of the finger. Such a stimulus imitates the stick-slip phenomenon that occurs between soft materials. In the experiment where four types of stimulus conditions were ranked, one of which was a control condition with no active friction stimulus, the new stimulus and previous method that presented a constant low-frequency friction were subsequently determined to be the softest among the four stimulus condition types

**Key Words:** Friction, Finger, Softness, Normal force, Display

### 1 緒言

スマートフォンやタブレット PC などの普及によりタッチパネルは一般的なインタフェースとなっており、タッチパネルでの触感刺激の活用とその需要が期待される。タッチパネルで触感刺激を利用した例としては、ソフトウェア・キーボードを操作する際、振動を提示する機能や表面粗さや凹凸などのテクスチャを表現しようとする例がある。しかし、タッチパネルでの柔らかさ表現はパネル固有の硬さのため非常に挑戦的な課題であり、その例はない。タッチ用の技術として硬い物体で仮想的機械的コンプライアンスを表現する例があるが、柔らかさ提示を目的としたものではない [1, 2].

先の研究で報告されたの柔らかさを提示するディスプレイは押す動作を対象とし、接触面積や圧力 (反力) 分布を制御することにより柔らかさを疑似的に表現する [3-5]. しかし、タッチパネルには固有の硬さがありパネルが変形しないため、上記のような手法は使えない。タッチパネルで柔らかさを表現するためには違う解決法が必要である。

我々はその解決法として擦る動作とその時の摩擦現象に注目している。Cavdan らの研究によると擦る動作は柔らかい (変形しやすい) 物体を知覚する時に押す動作の次によく使われている [6]. また、硬い物と比べて、柔らかい物では接触面積が大きくなるため摩擦力が増加したり、法線力と擦る速度に応じて摩擦係数や周波数が変わるなど [7-9], 物体の柔らかさは摩擦現象に影響があることが分かっている。本研究グループで行われた先行研究では低周波の静電摩擦刺激により柔らかさを知覚させることに成功している [10]. これは擦る動作で柔らかさを知覚させた初めての研究である。このような結果より擦る動作中に摩擦を制御することは柔らかさ提示に有効だと考えられる。

その原理については完全に説明されていないが、他にも低周波の刺激により柔らかさを提示した研究がある [11-13]. また、Stick-slip などの摩擦振動では法線力に依存して周波数が変わることが分かっている [8]. 我々はこの低周波が柔らかい表面で起こる摩擦振動を想像させ柔らかさを錯覚させるという仮説を基に、低周波を法線力に依存させ制御する静電摩擦刺激によりタッチパネルでの柔らかさ表現を試みる。

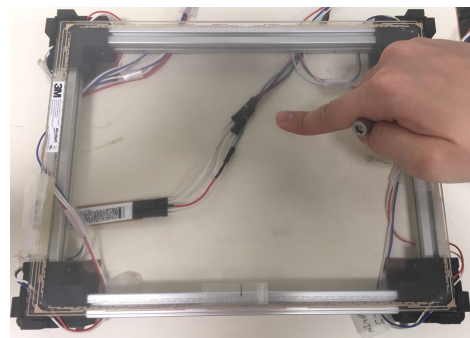
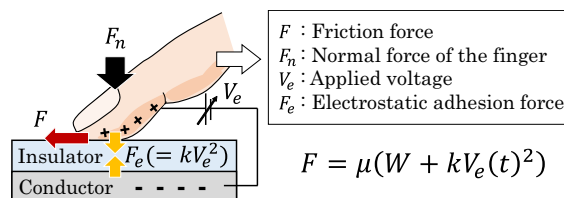


Fig.1 静電摩擦触感ディスプレイ. (上) 静電摩擦刺激の原理. (下) 静電摩擦触感ディスプレイの写真.

## 2 静電摩擦触感ディスプレイと摩擦刺激

### 2.1 装置

実験のために、図 1 のような静電摩擦触感ディスプレイを製作した。摩擦力を制御するため装置はパネルと指の間に電気を印可し静電気を発生させる。静電気により指はパネルに吸着され、指がパネル上で滑りにくくなる。この時、静電気力は印可された電圧の二乗に比例する。また、接地棒を握ることで静電気摩擦の効果がより強くなる。

装置の 4 つの角にはロードセル (FSS015WNSX, TE Connectivity, Switzerland) が一個ずつ配置され法線方向の力を測った。各ロードセルにかかる法線力の比率により、タッチパネル上での指の位置を計算した。パネルには静電タッチパネル (SCT3250EX,

3M Touch Systems, MN) を用いたが, タッチパネルとしてではなく, 絶縁膜のある平板導体として用いた. サンプル周波数はロードセルが 250 Hz, パネルに印可される電圧が 2 kHz であった. 感電のリスクを下げ, 残留電圧を制御するため, 電圧はパネルへの印可電圧をキャリア周波数 4 kHz で振幅変調した. 類似の装置は他の研究でも使われている [14].

## 2.2 静電摩擦刺激

実験のために統制刺激を含む 4 つの静電摩擦刺激を用意した.

刺激 A は先行研究 [10] で使われた手法で一定の空間周波数をパネル上に持つ, 低周波の波状刺激である. その電圧  $V_e$  は

$$V_e(t) = A \sin 2\pi \frac{x(t)}{2\lambda} \quad (1)$$

で決定し,  $A$ ,  $x(t)$ ,  $\lambda$  はそれぞれ電圧の振幅, 指の位置 (mm), 空間周波数である. 空間周波数  $\lambda$  は 12 mm であり, 空間周波数が固定されているため指の移動速度に比例して振動数も増加し, 実験中は約 5–30 Hz の範囲の低周波刺激を提示した. 指の電気抵抗特性には個人差があるため, 振幅  $A$  は実験参加者ごとに刺激が十分に知覚できるように 96–132 V の範囲で調整された.

刺激 B は本論文で提案する法線力に依存する周波数が変わる刺激であり, 次のように表現した:

$$V_e(t) = A \sin 2\pi \frac{f(t)}{2} x(t), \quad (2)$$

$$f(t) = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \frac{F_n(t)}{F_{n,\max}}. \quad (3)$$

$F_n, F_{n,\max}, f_{\max}, f_{\min}$  はそれぞれ, 法線力, 予め決められた最大法線力, 法線力依存の周波数を決定する係数の最大値, そして, 最小値である.  $F_{n,\max}$  を超える  $F_n$  は  $F_{n,\max}$  になるように設定され,  $f_{\min} = 2.5, f_{\max} = 12$  とした. これらのパラメータは著者らによって決定されており, それらの最適化は本論文での目的ではない. 本論文では静電摩擦刺激の周波数が法線力依存性を持つ時, 柔らかさ表現にどのような影響があるかを検証することを目標とする. 刺激 B は指の法線力と移動速度に依存して周波数が変わり約 5–40 Hz の範囲で低周波の振動刺激として提示された.

刺激 C は統制刺激であり, 静電摩擦刺激を提示しなかった:

$$V_e(t) = 0. \quad (4)$$

この刺激は他の刺激との比較のために用意した.

刺激 D は参加者の示唆性を確かめるための統制刺激であり, 柔らかさとは関係ない粗い触感 (粗さテクスチャ) とした. この刺激により被験者が刺激の柔らかさを判断せず静電摩擦刺激の有無により回答する傾向があるかを確かめる. 刺激 D は式 (1) と同じ式で決定され空間周波数は  $\lambda=1$  mm とした. 高周波の刺激を提示することにより粗い触感を表現させた.

## 3 実験

### 3.1 被験者

男性 8 人と女性 1 人の参加者が予備の実験に参加した. 年齢は 20 歳から 24 歳, 全員右利きで実験の目的を事前に知らされていなかった.

### 3.2 実験方法

各試行では 4 つの刺激がランダムな順に番号付けられた. 参加者は人差し指を利用してパネルを擦りながら刺激の柔らかさを判断し順位を付けた. 参加者は各刺激を自由に何回でも体験することができた. 順位の判断が十分に行われた時点で 1 試行目が終了し, 各実験者ごとに 2 試行ずつ行った.

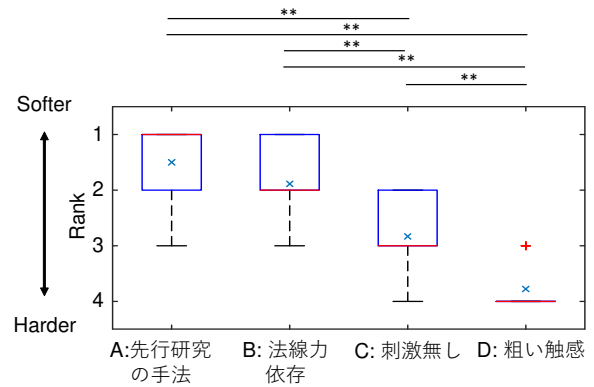


Fig.2 各刺激の平均順位の箱ひげ図. \*\* は有意水準を調整しないポストホックの Friedman test による有意差であり,  $p < 0.01$ .

ここで柔らかさの意味は「変形し易い性質」の意味として参加者には事前に説明をした. 被験者は実験を行う前に指の水油分をタオルで十分に拭き, 実験中は音をマスクするためヘッドフォンを通じてピンクノイズを聞いた.

## 4 結果

実験の結果を図 2 に示す. グラフの横軸は各刺激を, 縦軸は柔らかいと感じた順位を表す. 順位の数字が小さいほど実験者が柔らかいと感じたことになる. 4 種類の刺激の順位には有意差が認められた ( $\chi^2(3) = 39.28, p < 0.01$ , Friedman test). ポストホック検定 ( $p$  値補正なしの pair-wised Friedman 検定) により刺激 A と B の間以外の刺激の間では有意差 ( $p < 0.01$ ) が認められた.

被験者の示唆性を確かめるため粗い触感を提示した刺激 D が最も低い順位となった. これより被験者は静電摩擦刺激のみに反応したわけではなかった.

低周波の静電摩擦刺激を提示した刺激 A と B が統制刺激である刺激 C より柔らかい刺激として選ばれた. 低周波の静電摩擦刺激より柔らかさの表現ができたと考えられる. しかし, 実験の狙いとは違い, 刺激 A と B の間には有意な差が無く同位であった.

## 5 結果・議論

実験の結果, 周波数の法線力依存性により, 柔らかさを効果的に表現することが出来なかった. しかし, 同時に, 法線力依存性により柔らかさ表現の効果が下がったわけではない. 本実験では特定の摩擦現象を模擬するよりは, 法線力依存性の効果を見るために, 筆者らの合意によって刺激が設計された. 摩擦刺激をより実際の摩擦現象を模擬したものにより, 法線力依存性の柔らかさ提示への効果が上がると期待できる.

## 6 結言

本論文では摩擦力を制御することによりタッチパネルを擦る時に柔らかい触感を表現する新しい方法について調べた. その結果, 触刺激の時間周波数が法線力と指の速度に依存する静電摩擦刺激は, [10] で使われた一定の空間周波数を持つ静電摩擦刺激と同程度に柔らかさ表現に効果的であることが分かった. その原理の解明や刺激を最適化するにはさらなる研究が必要だが, これからの方法は, タッチパネルでの柔らかさ表現の可能性を広げると期待される.

## 謝辞

本研究は、MEXT KAKENHI (17H04697) の支援を一部受けて行われた。

## 参考文献

- [1] J. Kildal, Johan.
- [2] S. Kim and G. Lee, “Haptic feedback design for a virtual button along force-displacement curves,” in *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ser. UIST '13. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2013, p. 91–96. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/2501988.2502041>
- [3] A. Bicchi, E. P. Scilingo, and D. De Rossi, “Haptic discrimination of softness in teleoperation: the role of the contact area spread rate,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 496–504, 2000.
- [4] F. Kimura and A. Yamamoto, “A softness feeling display with an active tensioner controlling contact pressure distribution on a fingertip,” in *Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics*, ser. Applied Mechanics and Materials, vol. 162. Trans Tech Publications Ltd, 4 2012, pp. 463–470.
- [5] K. Fujita and H. Ohmori, “A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control,” in *World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2001, pp. 78–82.
- [6] M. Cavdan, K. Doerschner, and K. Drewing, “The many dimensions underlying perceived softness: How exploratory procedures are influenced by material and the perceptual task,” in *IEEE World Haptics Conference*, 2019, pp. 437–442.
- [7] K. Inoue, S. Okamoto, Y. Akiyama, and Y. Yamada, “Effect of material hardness on friction between a bare finger and dry and lubricated artificial skin,” *IEEE Transactions on Haptics*, 2019, doi : 10.1109/TOH.2020.2966704.
- [8] “Dynamics in sliding friction of soft adhesive elastomer: Schallamach waves as a stress-relaxation mechanism,” *Tribology International*, vol. 96, pp. 23 – 30, 2016.
- [9] K. Nakano and S. Maegawa, “Stick-slip in sliding systems with tangential contact compliance,” *Tribology International*, vol. 42, no. 11-12, pp. 1771–1780, 2009.
- [10] K. Ito, S. Okamoto, H. Elfekey, H. Kajimoto, and Y. Yamada, “Feeling softness on a hard touch panel using an electrostatic tactile texture display,” in *IEEE Global Conference on Consumer Electronics*, 2017, pp. 282–283.
- [11] L. B. Porquis, M. Konyo, and S. Tadokoro, “Representation of softness sensation using vibrotactile stimuli under amplitude control,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 1380–1385.
- [12] T. Yamauchi, S. Okamoto, M. Konyo, Y. Hidaka, T. Maeno, and S. Tadokoro, “Real-time remote transmission of multiple tactile properties through master-slave robot system,” in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 1753–1760.
- [13] Y. Visell and S. Okamoto, “Vibrotactile sensation and softness perception,” *Multisensory softness*, vol. Section 1, pp. 31–48, 2014.
- [14] K. Ito, S. Okamoto, Y. Yamada, and H. Kajimoto, “Tactile texture display with vibrotactile and electrostatic friction stimuli mixed at appropriate ratio presents better roughness textures,” *ACM Transactions on Applied Perception*, vol. 16, issue 4, no. 20, 2019.