



絶縁膜薄膜化による静電触覚ディスプレイの印加電圧 低減と圧電ディスプレイとの複合化

Applied Voltage of Electrostatic Tactile Display by Thinning Insulating Film Reduction and Combination with Piezoelectric Displays

高橋駿¹⁾, 近藤雅敏¹⁾, 安部隆¹⁾, 寒川雅之¹⁾

Shun TAKAHASHI, Masatoshi KONDO, Takashi ABE and Masayuki SOHGAWA

1) 新潟大学大学院 自然科学研究科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050, sohgawa@eng.niigata-u.ac.jp)

概要: 我々は開発した表面凹凸や振動, 摩擦などを複合的に計測できる MEMS 触覚センサを用いて物体の触感を複合的にデータ化し, 振動提示と摩擦力提示を組み合わせた触覚ディスプレイ上で計測した触感を再現するシステムの実現を目指している. このシステムにおける触感を提示する触覚ディスプレイにおいて, 摩擦力提示に用いる静電引力提示デバイスは印加電圧が高いことが課題であったが, 絶縁膜の膜厚低減と高誘電率化により 50 V 以下に抑えることができた.

キーワード: 触覚ディスプレイ, 静電気力, 摩擦力制御, 薄膜

1. はじめに

近年, 遠隔医療や VR などの幅広い分野で物体の触感の再現が期待されており, 触覚提示技術の研究が盛んに行われている[1]. しかし, 触覚は振動, 摩擦などが複合した複雑な感覚であり, よりリアリティの高い提示には, これらを併せたデータ化・提示の必要がある. そこで我々は, 開発したこれらをセンシング可能な MEMS 触覚センサを用いて, 物体をなぞった際の出力を計測し, その計測データをもとに複合化触覚ディスプレイ上で提示するシステムの実現に向けて研究を行っている. この複合化触覚ディスプレイにおいて, 静電引力を摩擦力変化の提示に, 圧電アクチュエータを振動の提示に利用することを考えているが[2], 従来の研究では十分な摩擦力変化の提示できる静電引力の出力には, 100 V 以上の高電圧を要することが難点としてあげられる[3].

そこで, 本研究では高い絶縁性を持ち, 塗布条件により膜厚制御が可能なフッ素樹脂(Cytop, AGC)や, 比誘電率が高く, 理論上同じ印加電圧で出力できる静電引力が増加する Al₂O₃ などの酸化物薄膜を絶縁膜とした静電引力提示デバイスを作製し, 出力特性の評価を行った.

2. 静電引力提示デバイス

2.1 静電引力提示デバイスの構造

図 1 は作製した静電引力を提示するためのデバイスの構造の一例を示したものである. 基板上に電極材料が成膜されており, その上に絶縁膜が成膜されている. 本研究で

は印加荷重の統一と安全性の観点からスライダを用いて摩擦力測定を行っている. スライダはデバイスよりも小さい 1.5mm 角程度にカットした基板の上に電極材料を成膜したものである[4].

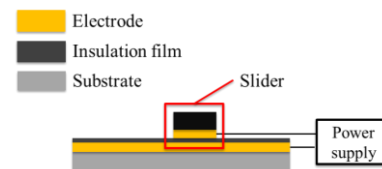


図 1: 静電引力提示デバイスの構造

2.2 静電引力提示原理

図 2 は静電引力提示デバイスによる摩擦力変化提示原理を表したものである. スライダ側の電極を負, デバイス側の電極を正になるように直流電圧を印加する. そうすると両者の電極間は絶縁層を挟んだ平行平板型コンデンサとして見なすことができ, 上部電極, 下部電極にそれぞれ電荷が蓄積した状態になる. このとき, 電極間では静電引力が発生し, スライダとデバイスの接触面に対して垂直方向に働く. この静電引力は, スライダの自重による垂直抗力と方向が等しいため, 静電引力が増加すると摩擦力もそれに伴い増加する. 垂直荷重 P が印加されたときの摩擦力 F_{μ} はアモントン・クーロンの法則により

$$F_{\mu} = \mu P = \mu(F_z + F) \quad (1)$$

となり、 μ , F_z , F はそれぞれ摩擦係数、スライダの垂直抗力、静電引力である。摩擦力 F_{μ} は垂直荷重 P に比例して増加し、 P はスライダの垂直抗力と静電引力の合力であるため静電引力の増加に伴い提示される摩擦力が増大する。このとき静電引力 F は

$$F = \epsilon \frac{S}{2d^2} V^2 \quad (2)$$

と表される。ここで、 S はスライダとの接触面積、 ϵ は絶縁膜材料の誘電率、 d は電極間距離、 V は印加電圧を示す。(2)式から、静電引力は電圧の二乗に比例するため理論的には下に凸の2次関数に従って増加し、印加する電圧を制御することで任意の摩擦力を提示することが可能となる。また、電極間距離の二乗に反比例するため、電極間距離の短縮、すなわち形成する絶縁膜を薄くすることと、誘電率の高い絶縁膜材料の選択がより大きな摩擦力の提示を可能にする。

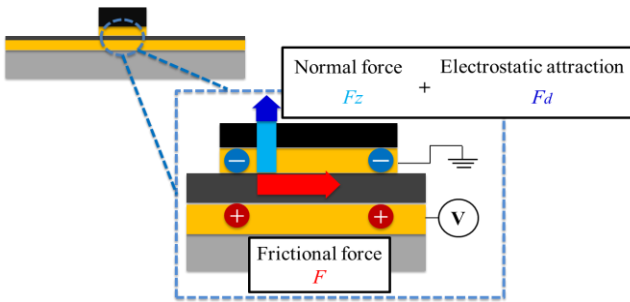


図 2: 静電触覚ディスプレイの触覚提示原理

2.3 絶縁膜材料の選択

本研究ではコーティングにより薄膜形成可能な絶縁膜材料として、前述したように絶縁性や誘電率の面から Cytop, Al_2O_3 を用いて低電圧化を目指した[8][9]. 表 1 は使用した材料の比誘電率を表したものである。Cytop と比べると、 Al_2O_3 は膜厚が小さくなり、また比誘電率が高いため、同じ電圧で発生する静電引力が大きくなり、低電圧化が期待できる。

表 1: Cytop, Al_2O_3 の比誘電率及び膜厚比較[5][6]

	Cytop	Al_2O_3
Relative permittivity	2.0 ~ 2.1	9.5
Film thickness (μm)	4.4	0.55

3. 実験方法

作製した静電引力提示デバイスの出力評価を行うために、直流電圧を印加しスライド運動をした時に生じる摩擦力を測定した。図 4 は測定方法の概略図である。提示デバイスの裏側に両面テープを接着してフォースプレート

(TF-2020, テック技販)上に固定し、DC 電源を用いて直流電圧をデバイスに印加した状態で、1 軸ステージによりスライダを水平に一定速度(0.005 mm/s)でスライドさせた。このときにスライダとの間で発生する水平方向のせん断力をフォースプレートにより測定した。また、スライダに印加する垂直荷重は、人が指でモノを触るときの力を参考に 0.2 N とした[7].

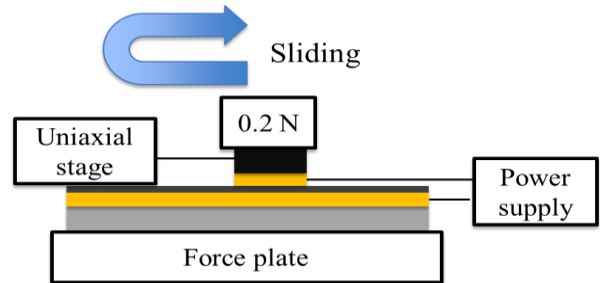


図 3: 摩擦力測定の実験系

4. 実験結果と考察

4.1 フッ素樹脂(Cytop)を用いた静電引力提示デバイス

図 6(a)は Cytop を絶縁膜として用いたデバイスにおいて、100 V 印加時と非印加時で実験を行った際に生じる摩擦力の測定結果を比較したグラフである。実験開始後から静止摩擦力により徐々に水平方向のせん断力が増大し、ある点で最大摩擦力に対応する最大値となり、それ以降は動摩擦状態に移行するためせん断力が減少するという結果となっている。また、電圧を印加しない場合に比べ印加時のほうが提示された摩擦力が増大した。また、図 6(b)は生じた最大静止摩擦力の印加電圧依存性を表したグラフである。350V で絶縁破壊を起こしたが、印加電圧に追従して提示される摩擦力も増加した。

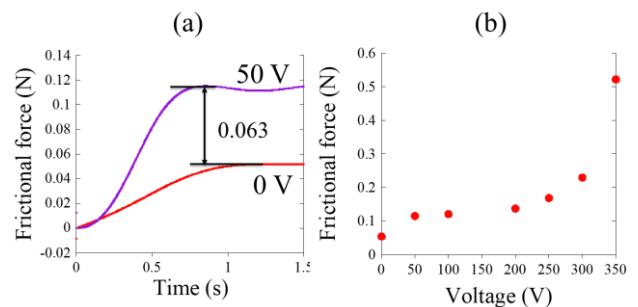


図 6: Cytop を用いた静電引力提示デバイスにおける、(a)電圧印加の有無によるスライド時に生じる摩擦力の時間変化および(b)最大静止摩擦力の印加電圧依存性

4.2 Al_2O_3 を用いた静電引力提示デバイス

図 7(a)は Al_2O_3 を絶縁膜として用いたデバイスにおいて、20 V, 50 V 印加時と非印加時で実験を行った際に生じる摩擦力を比較したグラフである。Cytop を用いた場合と同様に、電圧を印加することにより生じる最大静止摩擦力の増加が確認できた。また、図 7(b)は生じた最大静止摩擦力の印加電圧依存性を表したグラフである。 Al_2O_3 を用いた場

合、50 V の電圧印加により最大静止摩擦力は 0.022 N 増加することが確認できたが Cytop では 0.063 N の増加でありそれに比べると摩擦力の増加は小さくなった。Al₂O₃ の膜厚が 1/8、誘電率が 4~5 倍であることを考えると、式(2)よると計算上では静電引力は 200 倍以上になるが、実際には逆に減少している。この原因としては、帯電や薄膜中の固定電荷の影響で Al₂O₃ 中の電界が相殺され、実効的な電位差が下がり静電引力が小さくなっている可能性が考えられる。

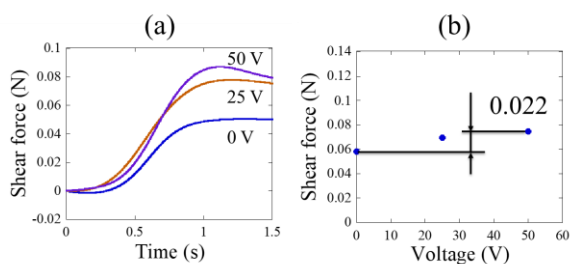


図7: Al₂O₃ を用いた静電引力提示デバイスにおける、(a) 電圧印加の有無によるスライド時に生じる摩擦力の時間変化および(b)最大静止摩擦力の印加電圧依存性

5. 結論

本研究では摩擦・振動複合提示触覚ディスプレイの摩擦力提示のための静電引力提示デバイスの印加電圧の低減を目的とし、その絶縁膜として膜厚制御と誘電率の面からフッ素樹脂 Cytop, Al₂O₃ を適用し作製・評価した。いずれの絶縁膜を用いた場合でも、50 V 以下の印加電圧にて摩擦力の増加を確認できた。誘電率が高い Al₂O₃ においては、理論上は更なる低電圧化が可能であると考えられるが、表面粗さや帯電性により想定よりは発生する静電引力が小さく、成膜条件等の更なる改良の余地があると考えている。現在、目標とする摩擦・振動複合提示触覚ディスプレイでは、静電引力による摩擦提示デバイスとしては、市販ポリイミドフィルムを絶縁膜として用いているが、0.15 N の摩擦力増加に 500 V の高電圧を必要としており、今回作製し

たデバイスを用いることで、印加電圧を 1/10 に低減でき、十分に低電圧化が達成できたといえる。

参考文献

- [1] Y. Monnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, K. Yoshino, S. Inoue, H. Shinoda : "HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen", UIST '14 (Proceedings of the 27th annual ACM symposium on user interface software and technology), pp.663-667 (2014)
- [2] 本間遼, 佐藤淳喜, 安部隆, 寒川雅之: 「振動刺激と摩擦力を同時に提示可能な複合触覚ディスプレイの基礎検討」, 第 11 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 27P2-MN2-5, 2020.
- [3] 山本晃生, 石井利樹, 樋口俊朗: 「摩擦力制御を用いた静電皮膚触覚ディスプレイ」, 計測自動制御学会論文誌, Vol.40, No.11, 1132/1139(2004)
- [4] 中山央己, 篠田裕之: 「静電型柔軟触覚ディスプレイ」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集(CD-ROM) 巻, No.06-4, pp.2P2-B23(2006)
- [5] https://www.agc-chemicals.com/file.jsp?id=jp/ja/fluorine/products/cytop/download/pdf/CYTOP_JP_Brochure.pdf
- [6] <https://www.ceramics-shimizu.co.jp/tokuseihyou/>
- [7] 永井正太郎, 福本梨乃, 山下久仁子, 岡田明: 「タッチパネル使用時における手指操作特性の世代間比較」, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol 20, No 4, (2018)
- [8] 佐藤淳喜, 本間遼, 安部隆, 寒川雅之: 「小型化・低電圧化に向けた絶縁樹脂薄膜静電触覚ディスプレイ基礎検討」 電気学会 E 部門総合研究会, MSS-20-28, 2020
- [9] 近藤雅敏, 佐藤淳喜, 安部隆, 寒川雅之: 「Al₂O₃ 絶縁薄膜を用いた静電型触覚ディスプレイに関する基礎検討」 「センサマイクロマシンと応用システム」シンポジウム, 10P3-SSP-27, 2021