



MEMS 触覚センサによるアレイ化静電触覚ディスプレイの出力特性評価

Output characterization of an Arrayed Electrostatic Tactile Display Using MEMS Tactile Sensors

佐野 竜雅¹⁾, 野村宏貴¹⁾, 安部隆¹⁾, 寒川雅之¹⁾

Ryuga SANO, Hiroki NOMURA, Takashi ABE, and Masayuki SOHGAWA

1) 新潟大学 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地, f25k006f@mail.cc.niigata-u.ac.jp)

概要: 一般的に静電引力型触覚ディスプレイを用いて十分な出力を得るには, 100 V 以上の電圧印加を必要とする. 我々の先行研究にて電極をアレイ化することで, 印加電圧を変化させることなく, 静電引力が増加することを確認し, 低電圧化の可能性を示した. 研究では, さらに摩擦力の増加を定量的に評価するために電極をアレイ化した触覚ディスプレイの電極をなぞった際の最大静止摩擦力の变化の定量的な評価を目的として MEMS 触覚センサを用いて計測を実施した. その結果, センサ出力は印加電圧に対して二次関数的に増加し, アレイ化によって低電圧での顕著な摩擦力の増加が確認された.

キーワード: 触覚, MEMS 触覚センサ, アレイ化, 静電引力, 低電圧触覚ディスプレイ, Al_2O_3

1. 緒言

ヒトの五感に働きかけるデバイスの研究は, これまで視覚や聴覚への刺激を中心に進められてきた. しかし近年では, これら以外の感覚に着目した研究も注目を集めており, なかでも触覚提示技術は, オンラインショッピングや VR 空間における没入感の向上が期待されることから, 特に活発に研究が進められている.

触覚提示技術としては, 電気刺激[1], 静電気力[2], および超音波[3]を利用したデバイスが広く研究・開発されており, 近年ではさらなる性能向上に向けた取り組みが進められている[4][5]. 我々はこれまで, 比誘電率が高い Al_2O_3 や ZrO_2 薄膜を用いた静電引力型触覚ディスプレイの開発に取り組んできた[6][7]. 比誘電率を上げることで, 静電引力を増加させ, 低電圧で大きな摩擦力を提示することが可能となる. さらに, 静電引力型触覚ディスプレイの電極のアレイ化によってエッジ効果を活用し, 電界集中を促進することで静電引力を高め, 駆動電圧の低減を図る手法も検討してきた[8].

しかしながら, これらの提示方式に対する評価は, 官能評価による定性的な手法が中心であり, 定量的な評価にはフォースプレートなどが用いられているものの, 精度面に課題があり, 接触部における局所的な力の変化を高精度で捉えることが困難であった.

我々は, MEMS 技術を応用することにより, 接触荷重・摩擦・振動等の複合的触覚情報を高精度で取得可能な MEMS 触覚センサを開発しており[9][10], これを用いた静

電引力型触覚ディスプレイの最大静止摩擦力の変化の定量的評価に成功している[11]. しかし, 従来までの触覚センサの接触部は絶縁性の樹脂を用いており, 電極を備えたスライダ(18×15 mm)を介した計測しかできなかった. この計測では, スライダの接触面積がアレイ化電極に対して大きいため, 局所的な摩擦力変化の評価が困難であった.

そこで本研究では, 高誘電率絶縁材料である Al_2O_3 を絶縁膜とし, アレイ化電極を用いた静電引力型触覚ディスプレイに着目し, その出力特性を低電圧領域で定量的に評価することを目的とする. 具体的には, 同触覚ディスプレイにおける摩擦力の変化を, MEMS 触覚センサを用いて計測することで, 提示性能の定量的な把握を試みた.

2. センサ・デバイスの概要

2.1 MEMS 触覚センサ

触覚センサは, MEMS 技術を用いた表面微細加工によりチップ上に作製したマイクロカンチレバー構造を荷重検知素子とし, 弾性樹脂である PDMS(polydimethyl-siloxane)により封止を行っている. 図 1 に触覚センサの設計図を, 図 2 に測定に用いたセンサを示す. センサのチップ上には自由端の向きをそれぞれ変えた 3 つのカンチレバーと温度補正用の測温抵抗を配置しており, カンチレバーの固定端部にたわみ検知のための NiCr ひずみゲージを搭載している. 従来までのセンサチップ表面は PDMS で封止されており, その上に接触部として絶縁性の PDMS を用いていた. 本試験では, 接触部の PDMS を Al の円柱突起とす

ることで、触覚ディスプレイとの接触部兼静電引力を発生させるための電極とした。図3に本センサの荷重検出原理を示す。本センサはチップ上の突起に荷重が印加されると、それに追従してカンチレバー周辺のPDMSが変形し、カンチレバーのたわみ変化が生じる。これにより、固定端部のひずみゲージの電気抵抗が変化し、その抵抗変化を計測することでセンサに加わった荷重を検出可能としている。

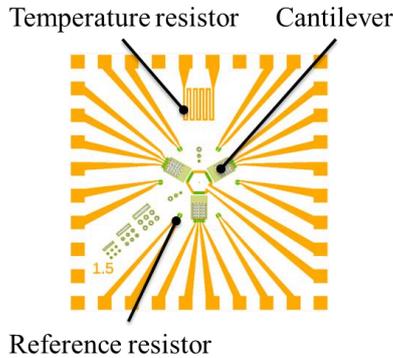


図1：MEMS 触覚センサ設計図

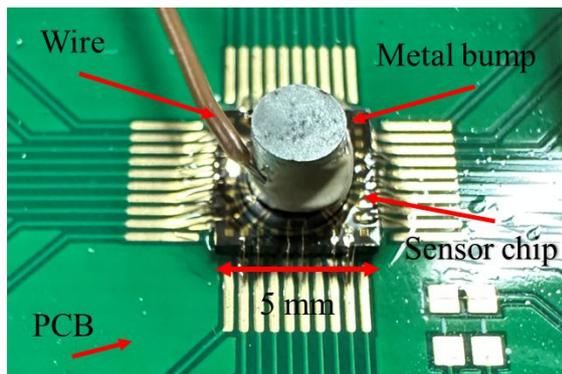


図2：使用したMEMS 触覚センサ

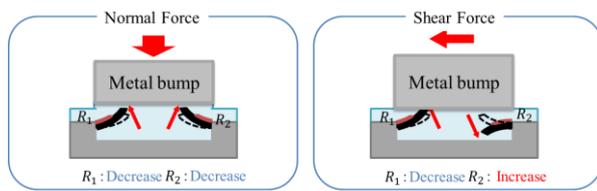


図3：荷重検出原理

2.2 電極アレイ化静電引力触覚ディスプレイ

本研究で作製した触覚ディスプレイの構造を図4に、作製工程を図5に示す。Si ウェハに熱酸化法によりあらかじめSiO₂が500 nm成膜されたものを使用し、SiO₂上に真空蒸着装置を用いてCrを接着層としてAuを成膜した。Cr,Auのパターニングを行い、アレイ化電極を作製した。その後、ウェハ上に絶縁膜としてAl₂O₃を金属有機化合物分解法を用いて200 nm程度成膜し、周囲の電極取り出し部のAu上のAl₂O₃を除去し導電性ペーストで配線を接続した。電極に電圧を印加することで、Al₂O₃を介して生じるクーロ

ン力によって、アレイ化電極とセンサのAl突起の電極間に引力を生成し、実効的に摩擦力を増加させることで触覚の提示を行った。

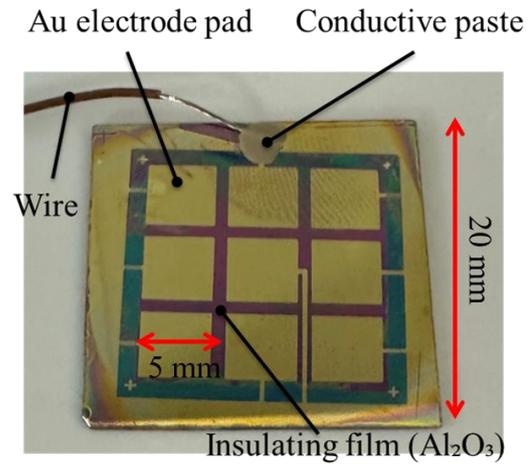


図4：作製した触覚ディスプレイ

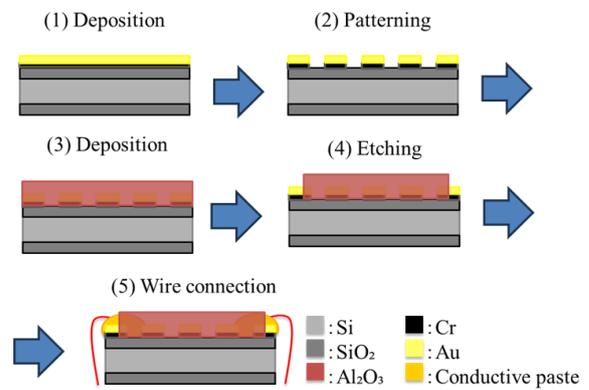


図5：触覚ディスプレイの作製工程

3. 静電引力触覚ディスプレイの出力特性評価方法

触覚ディスプレイのアレイ化電極とセンサの金属突起間に電圧を印加した際の摩擦力の変化について、触覚センサを用いて計測を行った。図6に試験系を示す。本試験では、触覚ディスプレイを治具を介して参照用力覚センサに固定し、Z軸ステージを用いてセンサとディスプレイを0.5 Nの垂直荷重で接触させた。その後、ディスプレイに正弦波電圧100 Hzを21.2 V(60 V_{pp})まで印加し、下部の触覚センサが取り付けられたXYステージをY軸方向に10 μm/sで100 μm水平移動させた際の摩擦力の変化を触覚センサで計測した。なお、摩擦力の増加に伴う、センサ出力(ひずみゲージの抵抗変化)はマルチメータを用いて計測した。

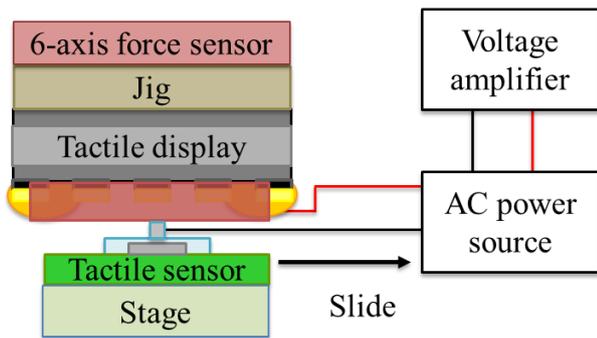


図6：摩擦試験系

4. 実験結果及び考察

まず、触覚センサのせん断荷重印加時の出力について評価を行った結果を図7に示す。せん断力に対して線形な出力が確認でき、センサ感度は1030 ppm/Nと良好な感度が得られた。MEMS触覚センサを用いて触覚ディスプレイのアレイ化電極と単一電極に電圧を印加した際の最大静止摩擦力の計測を行った。図8にアレイ化電極に電圧を印加した際の摩擦力の変化に伴うMEMS触覚センサの出力とその際にセンサ部に生じた力の大きさを推定したものを示す。なお、荷重の推定はセンサの抵抗変化率を先に求めたせん断力に対するセンサ感度で除することで求めた。ステージの移動開始後、センサ出力は徐々に増加しピークに達したのち減少へと転じ、やがてほぼ一定値を示す。この挙動は、接触面において最大静止摩擦力を超えるまでは摩擦力が増加し、それ以降は動摩擦領域に移行するためと考えられる。電圧印加により静電引力が増加した結果、最大静止摩擦時のセンサ出力が増大し、動摩擦領域への移行までの時間も長くなっている。次にアレイ化電極への印加電圧に対する最大静止摩擦時のセンサ出力と摩擦力の依存性を図9に示す。アレイ化電極を用いた触覚ディスプレイの摩擦力は2次関数的に増加した。これは、最大静止摩擦力の増加は印加電圧の2乗に比例するためであると考えられる。本研究では15Vで約0.05Nの摩擦力増加が確認でき、アレイ化による電界エッジ効果の利用で大幅な低電圧化に成功した。また、高誘電材料である ZrO_2 は Al_2O_3 と比べて2倍以上の誘電率を示すが、 Al_2O_3 と比べて出力が安定しないものの摩擦力も2倍程度増加すると考えられる。今後これらを組み合わせることでさらなる印加電圧の低減が可能であると考えられる。

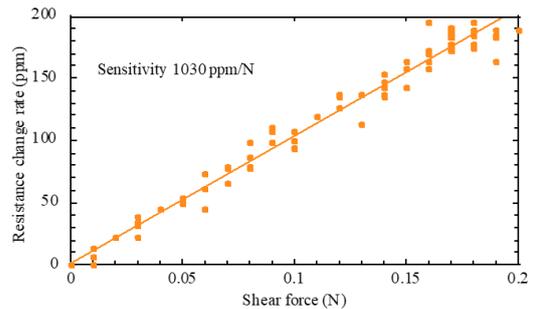


図7：せん断力印加に対するMEMS触覚センサの出力

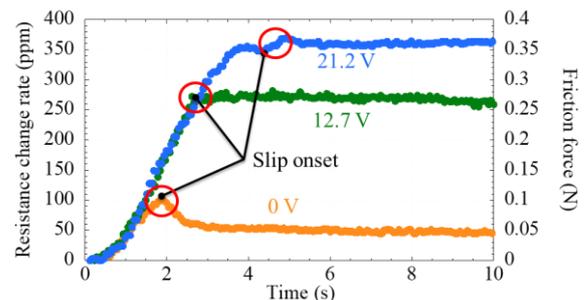


図8：アレイ化電極への電圧の印加によるMEMS触覚センサ出力の比較

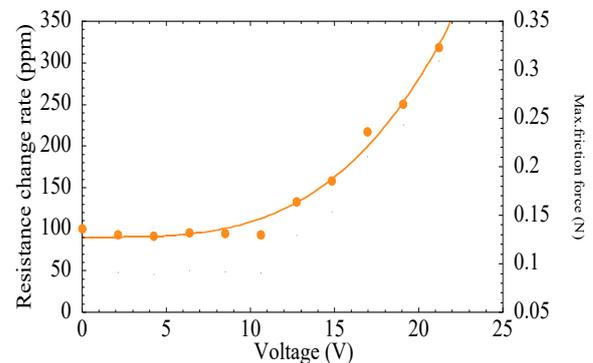


図9：アレイ化電極への印加電圧に対するMEMS触覚センサ出力と最大静止摩擦力

5. 結言

本研究では、MEMS触覚センサによる、高誘電絶縁材料を用いた静電引力型触覚ディスプレイのアレイ化電極の定量的評価を目的として、印加電圧に対する摩擦力の増加を触覚センサを用いて計測した。その結果、アレイ化電極に接触させた際に、 $\Phi 3$ 程度の接触面積でも最大静止摩擦力の増加が見られ、15V程度の十分に低い電圧でも大きな摩擦力の増加が確認された。今後は、アレイ化電極の更なる微細化を行った際の最大静止摩擦力の変化についての計測や触覚センサと触覚ディスプレイの接触面積の最適化を行っていく。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23K22713, JP22H00542, JP23K26066, JP25K22076 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 梶本裕之, 菅野米藏, 舘暲: 日常的装具としての電気触覚ディスプレイ, 計測と制御, 第 47 巻, 第 7 号, 2008 年月号, pp. 601-605, 2008.
- [2] 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, 2P2-B23, 2006.
- [3] 星貴之, 岩本貴之, 篠田裕之: 空中超音波フェーズドアレイによる触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集, 3A2-2, 2008.
- [4] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人: 触覚認識メカニズムと応用技術-触覚センサ・触覚ディスプレイ, 第一章第一節, pp.3-18, S&T 出版, 2014.
- [5] Shogo Okamoto, Hikaru Nagano, Yoji Yamada : Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 6, No. 1, pp. 81-93, 2012.
- [6] 高橋駿, 近藤雅敏, 佐藤淳喜, 安部隆, 寒川雅之: 触覚ディスプレイにおける摩擦制御のための静電引力提示デバイスの低電圧化, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2B1-5, 2022.
- [7] 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, 第 38 回「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.
- [8] 野村宏貴, 佐野竜雅, 安部隆, 寒川雅之: 静電触覚提示素子の電極微細加工による低電圧化, 日本機械学会北陸信越支部合同講演会, 2025.
- [9] 橘弘人, 釜鳴志郎, 美馬達也, 寒川雅之, 金島岳, 奥山雅則, 山下馨, 野田実, 野間春生, 樋口誠良: 3 方向カンチレバーを用いた多軸触覚センサの作製と基礎特性, 電気学会論文誌 E, Vol. 130, No. 6, pp.223-229, 2010.
- [10] 高橋春暁, 難波勇太, 安部隆, 寒川雅之: 触覚センシングにおける振動覚検知のためのマイクロカンチレバーの作製と評価, 電気学会論文誌 E, 139 巻, 11 号, pp.375-380, 2019.
- [11] 佐野 竜雅, 野村 宏貴, 安部 隆, 寒川 雅之: 静電引力・温冷複合触覚ディスプレイの試作と触覚センサによる定量的評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-K06, 2025.