



積層セラミックコンデンサを用いた ピンアレイ型触覚ディスプレイ (第一報) 積層された積層セラミックコンデンサの振動特性検証

Pin array tactile display using multilayer ceramic capacitors (first report)

藤亘輝¹⁾, 関口大陸²⁾, 溝口泉¹⁾, 梶本裕之¹⁾

Kouki FUJI, Dairoku SEKIGUCHI, Izumi MIZOGUCHI and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1,
{fuji, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) Lucid Vision Labs

概要: エッジ形状まで提示するような触覚フィードバックのためには, コンパクトで高解像度な触覚提示が可能であり, かつ開発コストが低いことが求められる. 一般的にピンアレイ型の高分解能の提示方式は空間的解像度の高い触覚表現を可能とする一方で, 特殊なアクチュエーション技術が必要とすることで装置のサイズや開発コストの高さなどの課題を持つ. これに対して本研究では, 積層セラミックコンデンサ(MLCC)が圧電効果により微小に変形することを利用し, これをさらに積層することで, 変位を拡大する手法を検討する. MLCC は非常に低コストでありかつ入手が容易でサイズバリエーションも豊富であるという利点がある. 本報告では予備的検討として, 1 素子の試作を行い, 周波数特性を評価した.

キーワード: キーワード コンデンサ, 積層, ピンアレイ, 触覚ディスプレイ

1. はじめに

VR 空間において物体のテクスチャや柔らかさといった感覚を利用者に提示することは, 体験の没入感を高めるうえで極めて重要である. 現在, 振動による触覚提示は商業的にも広く用いられており, 主要な触覚フィードバック手法の一つとされる. 振動は, テクスチャ感覚提示[1],[2],[3]だけでなく, 圧覚提示[4]も可能とされている.

多くの振動提示が指一本に対する単一のアクチュエータによる提示を試みているのに対し, 指先本来の高い空間解像度に対応した触覚提示も多く試みられている. 高い解像度に対応した触覚提示が実現すれば, 例えば指で把持した物体のエッジが明瞭となり, 形状知覚が行えるようになると考えられる. 我々が例えば鉛筆を把持する際には指先が鉛筆のエッジを感じ取り正しい向きに把持していることを考えると, 高解像度の触覚提示は特に作業性を向上させる重要な要素であると言える.

Kim らは, ピエゾアクチュエータを用いた触覚ディスプレイにより, 高繊細な触覚提示を可能としている[5]. Ujitoko らは, 認識性能を向上させるためには, 接触点の密度とカバーエリアの両方が不可欠であるとし, 空気圧アク

チュエータを採用することで解決した[6]. Shen らは, 薄型で低消費電力の高解像度形状変化フィンガーパッドアレイを開発した[7]. しかしこれらのデバイスは現時点では個々のアクチュエータから独自に開発する必要がある. このためコストは高く, マトリクス状の触覚ディスプレイを使ってみようというユーザが手軽に製作, 利用できるものではなかった. 個々のアクチュエータを不要とする手法として電気触覚ディスプレイが挙げられ, 高い解像度の触覚提示を実現できるが[8],[9], 感覚強度の調整などの課題も多い.

我々は, 商用の積層セラミックコンデンサ (MLCC) を振動アクチュエータとして活用し, 高解像度な触覚提示を手軽に実現する手法を提案する.

本提案は, MLCC が電圧印加時の圧電効果により微小な機械的変位を生じるという事実に着目している. これは, MLCC の本来の用途である電氣的フィルタリングやデカップリングとは別に, 振動源としての応用可能性を示唆するものである. 特に, 1 mm 以下の極めて小型な MLCC は広く普及しており, 安価かつ容易に入手可能である. これらをそのまま振動子として利用し, 図 1 のようにアレイ状に配置することで, 多点かつ高密度な触覚提示デバイスの

構築が可能となる．さらに，その入手性の容易さから，用途別の振動素子を簡便に作成することも可能である．

本報告では，MLCC を用いたマトリクス状の指先振動触覚提示の予備的検討として，1 素子の試作と周波数特性の測定結果を示す．

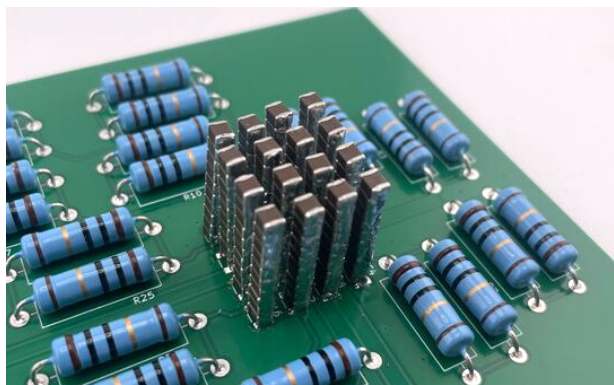


図1 積層した積層コンデンサをアレイ状に並べた触覚ディスプレイ

2. 測定

2.1 概要

MLCC を積層することで振動子として利用する本手法が有用であるかを検証するため，その周波数特性を測定した．

2.2 測定環境

測定では，図 2（左）に示す MLCC（Y5V3225，村田製作所）を用いた．この MLCC は静電容量 $10\ \mu\text{F}$ ，定格電圧 $50\ \text{V}$ であり，長辺 $3.2\ \text{mm}$ ，短辺 $2.5\ \text{mm}$ ，高さ $2\ \text{mm}$ の寸法を持つ．これを図 2（右）のように 10 個垂直方向に積層した．これは，MLCC 単体での駆動は十分な振幅が得られないため，多層に積み重ねることで十分な振幅を確保することを目的としている．また，短絡を防ぐため，振動子には $22\ \Omega$ の抵抗を 4 つ並列接続した．

正弦波信号はソフトウェア（Cylinder'74 & MI Max8）により生成し，オーディオインタフェースを介して，ステレオパワーアンプ（FX-AUDIO FX202A/FX36A PRO，North Flat Japan）を通して振動子に印加された．オシロスコープのプロブをパワーアンプの出力端子に接続し，パワーアンプからの出力が指定の振幅電圧になるよう毎回の測定時にアンプのボリュームを調節した．測定にはマルチカラーレーザ同軸変位計（CL-P015G，KEYENCE）を用い，サンプリング周波数は $10\ \text{kHz}$ ，移動平均は 1 回に設定した．

2.3 測定条件

測定は，パワーアンプからの出力振幅電圧が $2.5, 5, 7.5, 10, 12.5\ \text{V}$ の 5 条件，入力信号の正弦波周波数が $4, 8, 16, 32, 64, 128, 256\ \text{Hz}$ の 7 条件で実施した．

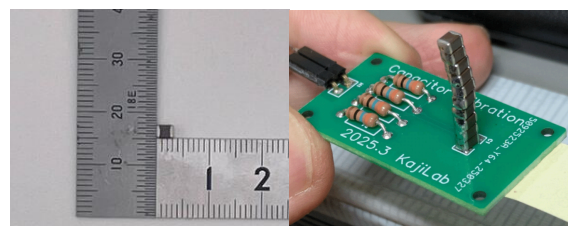


図2 測定に使用した MLCC（左）と MLCC の積層（右）

2.4 測定結果

電圧印加後，数秒以内に測定を開始し，結果の分析には $500\ \text{ms}$ 間（5000 points）のデータを用いた．振幅は，入力信号の周波数に対応する 1 周期分のデータ区間における最大変位と最小変位から算出した値を， $500\ \text{ms}$ 間に含まれる全周期に対して行い，その平均値として算出した．

計測の一例として，パワーアンプからの出力電圧振幅が $10\ \text{V}$ ，入力信号の周波数が $8\ \text{Hz}$ の場合の測定結果を図 3 に示す．

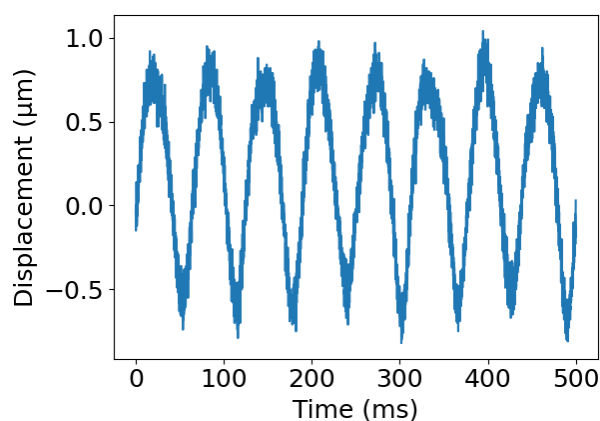


図3 $10\ \text{V}$ ， $8\ \text{Hz}$ における測定波形

図 3 から，出力波形は $y = |\sin(2\pi ft)|$ で表されることがえられる．この式において y は変位量， f は入力信号の周波数， t は時間を表す．全ての測定条件において得られたデータに対して高速フーリエ変換 (FFT) を実行しピーク周波数を算出したところ，その周波数は入力信号の周波数の 2 倍であり，全ての条件下で上記の式で表される波形が確認された．これは，MLCC に印加される電圧の絶対値に応じて振幅が変化していることを意味している．すなわち，MLCC に印加される電圧の絶対値が最大になるときに振幅も最大になり，電圧が 0 のときに振幅が最小になると考えられる．

次に，各測定条件における振幅の平均と標準偏差をまとめたグラフを図 4 に示す．

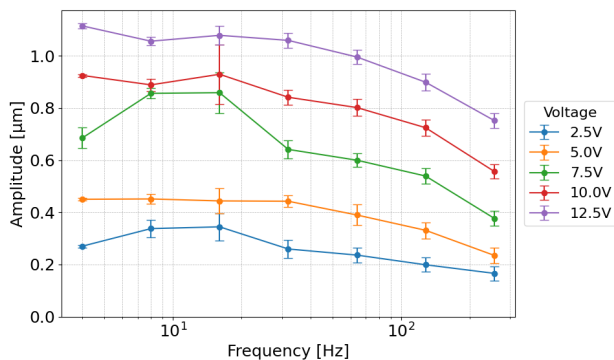


図4 周波数特性

図4より、印加する電圧が大きくなるにつれ振幅も増加する傾向が示された。特に、周波数が64 Hzでの振幅に着目すると、12.5 Vの条件で1.0 μm、7.5 Vの条件で0.6 μmとなり、印加電圧にほぼ比例した振幅が得られていることが確認された。また、周波数を高くするほど振幅が減衰する結果となった。

ここで、MLCCに蓄えられる電荷量を概算すると、測定に用いた回路は100 μFのコンデンサと5.5 Ωの抵抗を接続したRC回路と見なせるため、以下の方程式が成立する。

$$A \sin(2\pi ft) = R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{C} \quad (1)$$

ここで、 A はアンプからの出力振幅電圧、 f は信号の周波数、 R は抵抗値、 C は静電容量、 $q(t)$ はコンデンサに蓄えられた電荷を表す。

この回路の時定数 τ は、

$$\tau = RC = 5.5 \Omega \times 100 \mu F = 0.00055 \text{ s} \quad (2)$$

であるため、定常状態に約5 τ 時間かかると考えても、今回の測定は十分に定常状態であるとみなせる。そこでこの回路の定常状態を考慮すると、コンデンサに蓄えられた電荷 $q(t)$ は以下の式で表される。

$$q(t) = B \sin(2\pi ft - \varphi) \quad (3)$$

$$B = \frac{AC}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}}, \quad \varphi = \tan^{-1}(2\pi fRC)$$

この式から、コンデンサに蓄えられた電荷量はアンプからの出力振幅電圧に比例し、周波数に応じて低下することが示される。したがって、図4の測定結果は、MLCCの構造上、コンデンサに蓄えられた電荷量に応じた変位が発生していることを示唆している。特に、コンデンサへの印加電圧と静電容量との積で表される電荷量を最大電荷量として考えると、(3)式に基づき、32 Hzでは最大電荷量の95%程度まで電荷が蓄積されるのに対し、256 Hzでは73%程度までしか蓄積されない。(3)式からこの最大電荷量に対す

る割合は周波数や静電容量に依るため、適切な抵抗値、静電容量、電圧値を定める必要があると考えられる。

なお、今回の測定では、使用した抵抗値によりカットオフ周波数が300 Hz程度であったため、256 Hz以上の周波数では測定を行わなかった。人における知覚可能な閾値を考えると、MLCCのような小型の振動子での振動は単体では感じにくいと考えられるが、複数を並べることで刺激面積を大きくすることで空間加算効果が働くと考えられる[10]。その場合、高周波領域を担当するパチニ小体は知覚可能な閾値が非常に小さいため、十分に知覚させられると考えられる。一方で、受容野が小さいマイスナー小体での知覚可能な閾値が10 Hz付近で1 μm程度であること、そして本振動子が12.5 Vの振幅電圧において1 μm程度の振幅を持つことを考えると、低周波の知覚は高い解像度で行えると考えられる。

3. おわりに

本報告では、商用の積層セラミックコンデンサ(MLCC)を振動アクチュエータとして活用し、高解像度な触覚提示を低コストに実現する手法を提案し、その予備的検討としてMLCCを積層した振動子の周波数特性を測定した。測定の結果、その振幅は電圧値に比例し、周波数に応じて低減することが明らかになった。また人の知覚可能な振動振幅を出力可能であることが確認され、この振動子が高解像度触覚提示素子として有用である可能性が示唆された。

今後は、25 V以上での電圧値における振幅の調査、積層個数による影響や異なるMLCCの検討、駆動回路や駆動波形の検討、アレイ状に配置したMLCC積層振動子を用いた識別実験、およびフレキシブルな基板を用いることによる湾曲した指の形状に合わせた触覚提示などを試みる予定である。

謝辞 本研究はJSPS 科研費JP24K21321の助成を受けたものです

参考文献

- [1] U. A. Alma, R. Rosenkranz, M. E. Altinsoy, "Perceptual Substitution Based Haptic Texture Rendering for Narrow-Band Reproduction," *IEEE Trans. Haptics*, 16(2) 204-214, 2023
- [2] H. Culbertson, J. Unwin, K. J. Kuchenbecker, "Modeling and Rendering Realistic Textures from Unconstrained Tool-Surface Interactions," *IEEE Tran. Haptics*, 7(3), 381-393, 2014
- [3] B. L. Kodak, Y. Vardar, "FeelPen: A Haptic Stylus Displaying Multimodal Texture Feels on Touchscreens," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 28(5) 2930-2940, 2023
- [4] T. Morisaki, Y. Ujitoko, "Towards Intensifying Perceived Pressure in Midair Haptics: Comparing Perceived Pressure Intensity and Skin Displacement Between LM and AM

- Stimuli," in Haptics: Understanding Touch; Technology and Systems; Applications and Interaction, *EuroHaptics 2024.*, 107-119, 2025
- [5] S. -C. Kim et al., "Small and lightweight tactile display (SaLT) and its application," *World Haptics*, 69-74, 2009
- [6] Y. Ujitoko, T. Taniguchi, S. Sakurai, K. Hirota, "Development of Finger-Mounted High-Density Pin-Array Haptic Display," *IEEEAccess*, 145107-145114, 2020
- [7] V. Shen, T. Rae-Grant, J. Mullenbach, C. Harrison, C. Shultz, "Fluid Reality: High-Resolution, Untethered Haptic Gloves using Electroosmotic Pump Arrays," *Proc. UIST*, Article 8, pp. 1–20, 2023
- [8] T. Sakamoto, M. Sobue, K. Ushiyama, I. Mizoguchi, H. Kajimoto, "Displaying Sense of Adhesion by Electro-tactile Display", *World Haptics Conf.*, 2025
- [9] Y. Akiba, K. Ushiyama, I. Mizoguchi, H. Kajimoto, "Force Rendering via Electrical Stimulation of Fingernail and Finger Pad", *World Haptics Conf.*, 2025
- [10] E. R. Kandel, J. D. Koester, S. H. Mack, and S. A. Siegelbaum, Eds., *Principles of Neural Science*, 6th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2021.