



# 液相-気相転移アクチュエータアレイの加熱による 力覚ディスプレイの基礎検討

山浦一輝<sup>1)</sup>, 平木剛史<sup>2)</sup>

1) 筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, yamaura@pml.slis.tsukuba.ac.jp)

2) 筑波大学 図書館情報メディア系 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2, hiraki@slis.tsukuba.ac.jp)

**概要:** 力覚ディスプレイは、バーチャルリアリティや拡張現実の分野での情報提示技術として広く活用されている。しかし従来の机の上に置いて使用する形式の力覚ディスプレイは、多数のアクチュエータを面積に比例して広域に配置し電気信号等で制御する必要があったため、多くの配線が必要であり高いコストがかかるという問題があった。そこで本研究では、液相-気相転移アクチュエータを並べて熱制御することで、柔軟かつ大面積な力覚提示を可能にする力覚ディスプレイを提案する。作製方法は簡単で、低沸点液体とプラスチックフィルム、3D プリンタで操作したはんだごてを用いて低コストで作製することができる。また、開発した力覚ディスプレイを高感圧タッチパッドに密着させ、その圧力分布を測定することで提示できる力覚の空間解像度を評価する。

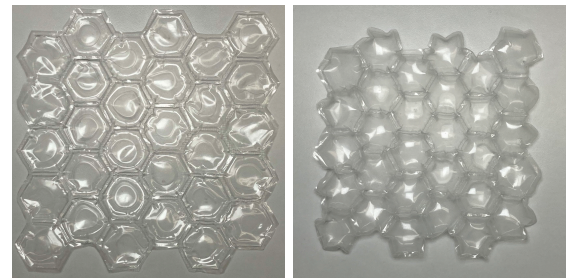
**キーワード:** 力覚提示, 触覚ディスプレイ, 液相-気相転移アクチュエータ

## 1. はじめに

力覚ディスプレイとは触覚の中でも特に力覚提示を実現する装置のことで、新しい情報提示技術としてバーチャルリアリティや拡張現実感をはじめとする分野で盛んに研究されている。力覚ディスプレイは、主に対象の形を再現して触覚提示を行う形式 [1] と、ユーザの皮膚表面を変形させて触覚提示を行う形式 [2] の 2 種類に大別される。

対象の形を再現する形式のものは、立体的な形状を再現して直接提示できるため、ユーザは装置せずに力覚を体験できる。またプロジェクタを用いて映像を力覚ディスプレイに直接投影することで、視覚情報提示との組み合わせが可能である点で優れている。一方で、非常に多くのアクチュエータをピンアレイなどの形で高密度に並べて電気信号等で制御する必要があるため、多くの配線が必要になり、装置が大型化しやすく高コストであるという課題が存在する。

液相-気相転移アクチュエータ [3, 4] は、袋に密閉した低沸点液体を加熱することで気化膨張が起こり、袋が膨らんで強い力を発生させることができるアクチュエータである。熱で状態を制御するため、従来の空気圧アクチュエータ [5, 6] で必要だった嵩張るコンプレッサやチューブなどを必要とせず、柔軟で出力が大きいという力覚ディスプレイに適した特徴を利用することができる。浦宗ら [7] はペルチェ素子を用いて加熱・冷却を行い液相-気相転移アクチュエータを制御することで、軽量で柔軟な質感の触覚ディスプレイを開発し、その触覚提示における有用性を示した。しかし、ここで提案されている触覚ディスプレイは指に装着して皮膚表面を変形させて触覚提示を行う形式のものであり、ユー



(a) 加熱前

(b) 加熱後

図 1: ハニカム構造の液相-気相転移アクチュエータアレイ

ザの掌全体に力覚を提示するような大面積のディスプレイの開発は行われていなかった。

そこで本研究では、液相-気相転移アクチュエータをアレイ状に並べて配置し、作製することで、柔軟で大面積かつ低コストな力覚ディスプレイを実現する。作製した液相-気相転移アクチュエータアレイの様子を図 1 に示す。液相-気相転移アクチュエータは加熱により駆動するのでコンプレッサやチューブを必要とせず、配線を省力化できる。また、アクチュエータ作製手順は容易で、プラスチックフィルムの熱融着と低沸点液体の封入のみで作製することができるため、設計の変更も容易である。加えて、ディスプレイ自体がプラスチックフィルムと低沸点液体のみで構成されるので、構造が柔軟であり、安価で簡単に大面積化できるという特徴も持つ。

本稿では提案した液相-気相転移アクチュエータアレイの設計、作製方法を述べるとともに、全体的に加熱し駆動さ

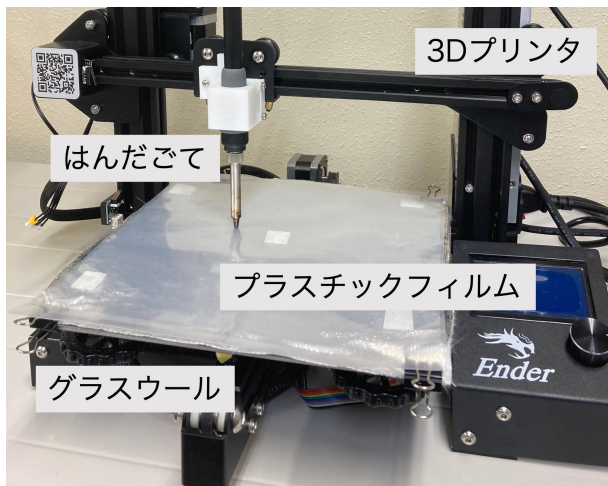


図 2: 液相-気相転移アクチュエータアレイ作製装置の様子

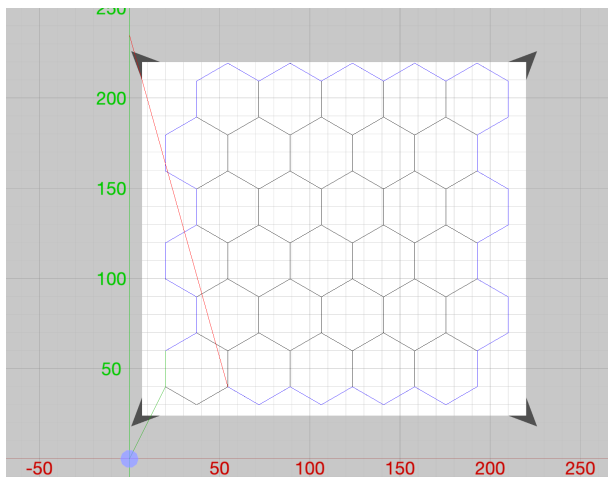


図 3: SVG ファイルから Gcode を生成するソフトウェア

せた力覚ディスプレイを高感圧タッチパッドに密着させることで、その提示可能な圧力の大きさおよび空間解像度について評価する。

## 2. 提案手法

本研究では、柔軟で大面積かつ低コストな力覚ディスプレイを、液相-気相転移アクチュエータアレイを設計、作製することで実装する。具体的には、低沸点液体を封入した大面積のプラスチックフィルムを、熱融着を利用して区画ごとに分割することで液相-気相転移アクチュエータアレイを作製する。

液相-気相転移アクチュエータは、2枚のプラスチックフィルムを熱融着させて袋状の構造とし、ここに低沸点液体を注入、袋の口にあたる部分を熱融着して閉じることで作製する。そこで、3DプリンタをXYZステージとして使用してはんだごてを操作することで、ハニカム構造などのユーザが設計したパターンの液相-気相転移アクチュエータアレイを作製することができる装置を開発する。また、この装置を用いて実際にアクチュエータアレイを作製するための手順を検討する。

### 2.1 材料・作製装置

液相-気相転移アクチュエータを作成するための素材として、低沸点液体 (Novec 7000, 3M Company) とプラスチックフィルム (ナイロンポリ B タイプ規格袋, 福助工業) を使用した。Novec 7000 は沸点が  $34^{\circ}\text{C}$  と低く、また化学的にも安定な物質である。

作製装置の開発にあたっては、3Dプリンタ (Ender-3, CREALITY 3D) とはんだごて (FX888D-01SV, 白光) を使用した。図 2 に開発した作製装置の外観を示す。3DプリンタをXYZステージとして使用し、はんだごてを操作するためには、3Dプリンタのヘッド部分にはんだごてを固定する必要がある。そこで、アタッチメント部品を3Dプリンタで作製し、取り付けることではんだごてを固定した。この際、熱融着によりプラスチックフィルムを圧着するため、はんだごてのこて先は金属ヤスリで削って平坦にした。これは、こて先と装置のベッドとの接触面積を広げるためである。また、こて先にかかる摩擦力を軽減して、はんだごてを円滑に移動させるために、3Dプリンタのベッドに耐熱ガラスウールを敷くこととした。

### 2.2 作製手順

開発した装置を用いて、以下の手順に沿って液相-気相転移アクチュエータアレイを作製する。

1. プラスチックフィルムを上下に2枚重ね、装置のベッドに両面テープで貼り付ける。
2. アクチュエータアレイの外形の輪郭線について、 $200^{\circ}\text{C}$  に熱したはんだごてを操作して2枚のフィルムを熱融着する。この際、低沸点液体を注入するための注入口となる部分については、熱融着せずに開けておく。
3. シリンジで低沸点液体を注入口からフィルムに注入する。
4. はんだごてを操作して注入口を熱融着で閉じる。
5. 密閉されたプラスチックフィルムの区間を分割する内側の線について、熱融着する操作を行う。

装置におけるはんだごての操作には、操作コードである G-Code を生成するソフトウェアである LaserWeb4 を元に、多角形の集合で構成された SVG ファイルから G-Code を生成するソフトウェアを開発し、これを使用した。図 3 にこのソフトウェアを使用している際の様子を示す。

この作製手順においては、密閉後に1つの大きな液相-気相転移アクチュエータを分割する形で液相-気相転移アクチュエータアレイを作製するため、分割作製された液相-気相転移アクチュエータ間で最終的に封入された液体の量に偏りが生じてしまうことがある。この偏りが著しく表れる場合は、その影響を少なくするため、液体を封入する前に予め区間をある程度分割しておく G-Code をソフトウェアで生成し、それを用いて再度作製を行う。

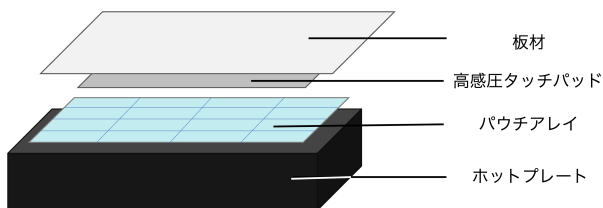


図 4: 測定環境の概要



(a) 外観



(b) 板材の裏側に接着された高感圧タッチパッド (感圧面)

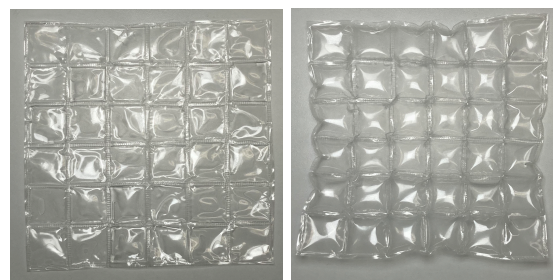
図 5: 測定環境の様子

### 3. 評価

#### 3.1 測定条件

提案した力覚ディスプレイの空間解像度と提示可能な圧力を評価するため、実験を行った。この測定のため、図 4 に示すような測定環境を構築した。圧力の測定には、圧力分布を取得できる高感圧タッチパッド (Sensel Morph, Sensel) を使用した。また、アクチュエータの駆動は、液相-気相転移アクチュエータアレイをセラミックホットプレート (CHP-250DF, アズワン) の台上に両面テープで固定して加熱することで行った。ここで、図 5a に示すように、力覚ディスプレイの真上に、高感圧タッチパッドの感圧面を力覚ディスプレイ側に向けて固定する事で、膨張した液相-気相転移アクチュエータによって得られる圧力を測定した。

力覚ディスプレイには 1 辺が 25 mm の正方形の液相-気



(a) 加熱前

(b) 加熱後

図 6: 評価に使用した液相-気相転移アクチュエータアレイ

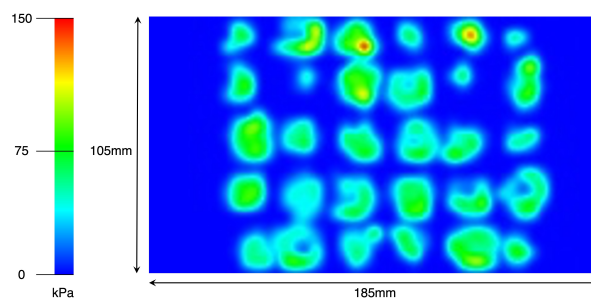


図 7: 高感圧タッチパッドから得られた圧力分布

相転移アクチュエータを格子状に配置した形の液相-気相転移アクチュエータアレイを使用した (図 6)。また、セラミックホットプレートの設定温度は 40 °C とした。タッチパッドの感圧面とホットプレートとの距離は 8 mm とした。

#### 3.2 結果

測定の結果、図 7 に示すような圧力分布が得られた。この圧力分布は縦 105 mm、横 185 mm で、1 ピクセルが実際の 1 mm<sup>2</sup> と対応している。また、表示可能な圧力の上限を 150 kPa としており、各ピクセルごとにかかっている圧力を対応する色に変換して表している。この圧力分布の圧力の最大値は 129 kPa で、平均値は 17 kPa だった。またこれを積分して全体で出力される力を計算したところ、331 N であった。

測定した圧力分布から、圧力が概ね 5 × 6 の格子状に並んで示されていることがわかる。これは、使用した液相-気相転移アクチュエータアレイが、一辺が 25 mm の正方形の液相-気相転移アクチュエータを格子状に配置する形で設計し作製されていることに起因すると考えられる。このことから、配置された各液相-気相転移アクチュエータはそれぞれ独立して力覚提示が可能であり、力覚ディスプレイは液相-気相転移アクチュエータアレイの設計と直接対応した空間解像度を得ることが可能であるといえる。

また、提案した力覚ディスプレイにおける液相-気相転移アクチュエータひとつあたりの出力する力は平均で 11 N であった。この出力は、多くの既存の力覚ディスプレイ [8] よりも大きいことから、それぞれのアクチュエータが人が知覚するのに十分な力を提示できているといえる。以上より、提案する力覚ディスプレイが人が知覚するのに十分な力覚を

提示できると同時に、液相-気相転移アクチュエータアレイの設計と直接対応した空間解像度を持つことを確認できた。

一方で、計測した圧力分布から、各液相-気相転移アクチュエータ間で計測した圧力に差が生じていることが読み取れる。これは各液相-気相転移アクチュエータ間で液体の封入量や空気の混入量が異なることによって起こると考えられる。

また、今回計測したデータについては、使用した液相-気相転移アクチュエータアレイに完全に依存しており、提案する力覚ディスプレイの仕組みそのものの性質と完全に一致するわけではない。液体の封入量や空気の混入量、またそれらのアクチュエータ間の偏り、液相-気相転移アクチュエータアレイの形状、大きさなどの要因によって、提示可能な圧力や空間解像度は変化すると考えられる。

#### 4. まとめ

本稿では、柔軟で大面積かつ低コストな力覚ディスプレイを、液相-気相転移アクチュエータアレイを作製することで実現する手法について基礎的な検討を行った。また、その提案した力覚ディスプレイを高感圧タッチパッドに密着させてその圧力分布を測定することで、人が知覚するのに十分な力覚を提示できると同時に、設計と直接対応した空間解像度を持つことを確認した。

今後の展望としては、この液相-気相転移アクチュエータアレイを様々なパターンによって作製してより詳細な特性の評価を行う他、レーザー等による選択的な遠隔加熱手法を用いた力覚提示を実現していきたいと考えている。

**謝辞** 本研究は、JSPS 科研費 JP20K19847, JP21H05798、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501) の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] Nakagaki, K., Fitzgerald, D., Ma, J. Z., Vink, L., Daniel, L., Silva, D. C. and Ishii, H.: inFORCE: Bi-directional ‘Force’ Shape Display for Haptic Interaction, *TEI '19: Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 615–623 (2019).
- [2] Schorr, B. S. and Okamura, M. A.: Fingertip Tactile Devices for Virtual Object Manipulation and Exploration, *CHI '17: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 3115–3119 (2017).
- [3] Akagi, T., Dohta, S., Fujimoto, S., Tsuji, Y. and Fujiwara, Y.: Development of Flexible Thin Actuator Driven by Low Boiling Point Liquid, *International Journal of Materials Science and Engineering*, pp. 55–59 (2015).
- [4] Narumi, K., Sato, K., Nakahara, K., Seong, a. Y., Morinaga, K., Kakehi, Y., Niiyama, R. and Kawahara, Y.: Liquid Pouch Motors: Printable Planar Actuators Driven by Liquid-to-Gas Phase Change for Shape-Changing Interfaces, *IEEE Robotics and Automation Letters*, pp. 3915–3922 (2020).
- [5] Niiyama, R., Sun, X., Sung, C., An, B., Rus, D. and Kim, S.: Pouch Motors: Printable Soft Actuators Integrated with Computational Design, *Soft Robotics*, pp. 59–70 (2015).
- [6] Wu, W. and Culbertson, H.: Wearable Haptic Pneumatic Device for Creating the Illusion of Lateral Motion on the Arm, *IEEE World Haptics Conference*, pp. 188–198 (2019).
- [7] Uramune, R., Ishizuka, H., Hiraki, T., Kawahara, Y., Ikeda, S. and Oshiro, O.: HaPouch: A Miniaturized, Soft, and Wearable Haptic Display Device Using a Liquid-to-Gas Phase Change Actuator, *IEEE Access*, pp. 16830–16842 (2022).
- [8] Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi, M., Frisoli, A., Hayward, V. and Prattichizzo, D.: Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives, *IEEE Transactions on Haptics*, pp. 580–600 (2017).