

超音波によるマルチモーダルボリュームディスプレイ

平山 竜士

University College London, 66-72 Gower Street, London, WC1E 6EA, UK

E-mail: r.hirayama@ucl.ac.uk

概要：本研究課題では、通常の2次元ディスプレイが持ち得ない情報を有する次世代型ディスプレイとして、ボリューム（体積型）ディスプレイに着目し、その特殊な3次元構造を活かした映像表示手法の実現を目指して研究を行ってきた。研究当初の目的は、複数の2次元画像を3次元構造体に組み込んだ新たなディスプレイ表示であった。しかしその研究課程において、超音波フェーズドアレイを用いた、視覚・聴覚・触覚のコンテンツを同時に表示可能な空中表示ボリュームディスプレイ、“MATD: Multimodal Acoustic Trapping Display (マルチモーダル音響浮遊ディスプレイ)”を世界で初めて開発することに成功したので、本成果論文で紹介する。MATDは、超音波によって小さなポリスチレン粒子を浮遊させ、LEDで色を照射しながら（ブラウン管テレビにおける電子ビームのように）高速に走査することで、肉眼で視認可能なカラー3次元像を空中に表示する。超音波の波が運ぶ音圧を利用することにより、手で感じる圧力を作ることができることができ、また、空気の振動により可聴音を生成することも可能である。

1. はじめに

3次元ディスプレイはその表示原理に基づき、ホログラフィックディスプレイ（波）、ライトフィールドディスプレイ（線）、そしてボリュームディスプレイ（点）の3種類にたびたび分別される[1]。中でもボリュームディスプレイは「実際に3次元像がある場所に散乱点もしくは発光点を有するディスプレイ」と定義され、3次元像を結像するためのいわゆるスクリーンを必要としない。そのため、3次元像を観察する場所に制限がない（もしくは少ない）という利点を有する。

ボリュームディスプレイ方式の中でも、SF映画に登場するような、フリースペー

スに3次元像を表示できる手法として、高出力レーザによって発生させたプラズマ[2,3]や、屈折率の違いを利用し光を曲げる[4]ことによって3次元像を描画する手法などが提案されている。また最近では、光や[5]音[6,7]、電場[8]を利用することで小さな粒子を浮遊させ、十分高速に走査することで空中に3次元像を描く手法も提案されている。

本講演では、音響浮遊技術を利用して開発した粒子走査型のボリュームディスプレイである“MATD: Multimodal Acoustic Trapping Display (マルチモーダル音響浮遊ディスプレイ)”[6]を紹介する。MATDは、超音波フェーズドアレイを用いて粒子を

高速に走査することで 3 次元像が描けるだけでなく、超音波が運ぶ音圧を利用して手で感じるができる圧力を作り出すことができ、また、空気の振動により可聴音を生成することも可能である。つまり、一つの原理に基づき、視て・聴いて・感じるができる 3 次元コンテンツを生成可能な新たなディスプレイである。

2. MATD の動作原理

2.1. システムの概要

MATD は、互いに向き合うように上下に配置された 2 つの超音波フェーズドアレイからなる (図 1)。各アレイは 16×16 個の超音波振動子 (Murata MA40S4S, 直径 1 cm, 40 kHz,) で構成されており、フェーズドアレイ上に搭載された FPGA ボード (Waveshare, CoreEP4CE6) が生成する 12 Vpp の矩形信号によって、各振動子を独立に制御可能となっている。

MATD のシステムでは、直径 2 mm のポリスチレン粒子を浮遊させるためのトラップ (図 1 右上) と触覚を提示するための焦点 (図 1 右下) の位置を、時分割多重化して提示する。高速に (10 Hz 以上で) 走

査された粒子はフルカラー LED 照射で色を付けられることによって視覚コンテンツを生成し、低周波 (本実験では 250 Hz) に変調された焦点は人の手で感じるができる触覚コンテンツとなる。さらに周波数変調によって、人の耳では聞こえない超音波から任意の可聴音を同時に生成することもできる。必要な計算をすべて FPGA 内に実装し、40 kHz (超音波の周波数) という高速なアップデートレートを実現することで、このようなマルチモーダルなコンテンツの提示が可能となった。

2.2. 視覚コンテンツの生成

各超音波振動子は 40 kHz の矩形波によって駆動される。矩形波を遅らせることで位相を 64 段階で制御し、矩形波のデューティ比を変化させることで振幅を 33 段階で制御する。3 次元上の位置 \mathbf{p}_p で焦点 (位相 ϕ_p) を作るためには、各振動子の位相 ϕ_t は以下のように求められる。

$$\phi_t = \left(-\frac{32}{\pi} k |\mathbf{p}_p - \mathbf{p}_t| + \phi_p \right) \bmod 64. \quad (1)$$

ここで \mathbf{p}_t は超音波振動子の位置を、 k は波数を表す。この計算はルック・アップ・

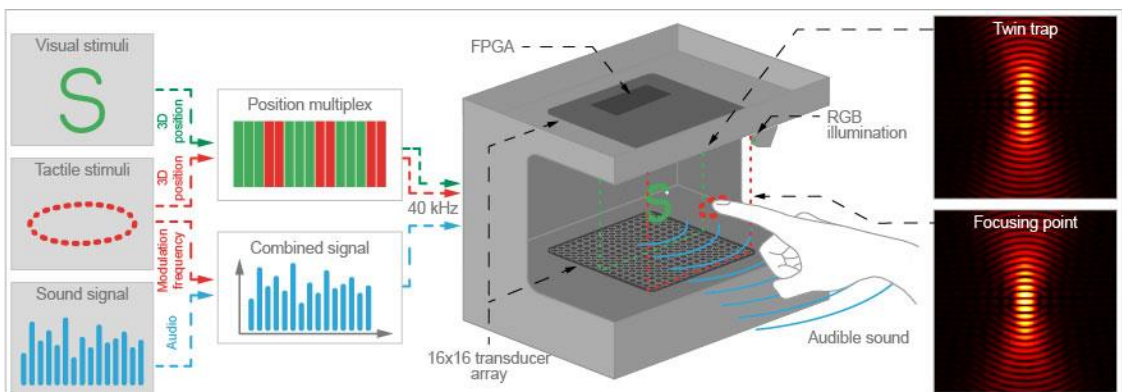


図 1 : MATD の概要図 ([6]より引用) .

テーブルによって FPGA 内に実装されている。トラップを生成する場合は、式(1)のように焦点を生成するための位相を計算した後に、上部の振動子のみ位相遅れ π rad を加える(文献[9]と同様)。すると、上下の振動子が互いに打ち消し合うことで位置 p_p において音圧が最小となり、その上下を高い音圧に挟まれたような音場のパターンが得られ(図 1 右上)、結果としてその位置に粒子が浮遊する。位置 p_p について 40 kHz という高いアップデートレートで更新可能であるため、粒子を高速に移動させることができる。

また FPGA は、パルス幅変調によって LED の輝度を制御する。そのため、粒子を高速に走査する場合でも、粒子の位置および色を正確に制御可能である。粒子の走査スピードが十分に高速であった場合(10 Hz 以上)に、目の残像効果(Persistence Of Vision: POV)によって 3 次元像が得られる。

2.3. 触覚コンテンツの生成

式(1)で生成した焦点において、音圧を低周波数(今回の実験では 250 Hz)で変調する(もしくは位置を変化させる)ことで、人の手が触覚として感じやすくなる[10]。MATD のシステムでは、計算を簡略化することで 40 kHz という高速なアップデートを実現している。しかし一方で、計算を簡略化して実装したため、浮遊させるためのトラップか触覚を提示するための焦点のうち、どちらか一方のみしか同時に生成できない。そこで、これらを 3:1 の割合で時分割多重化することで、あたかも同時に提示しているようにする。

2.4. 聴覚コンテンツの生成

超音波を変調して放射すると、空気中で自己復調現象が生じて可聴音を生成することができる[11]。本システムでは、単側帯波変調と呼ばれる変調方式を、浮遊トラップおよび触覚提示のための焦点の生成と組み合わせて用いることで、視覚・触覚・聴覚のコンテンツを同時に提示可能である。変調度としては 0.2 を用いた。

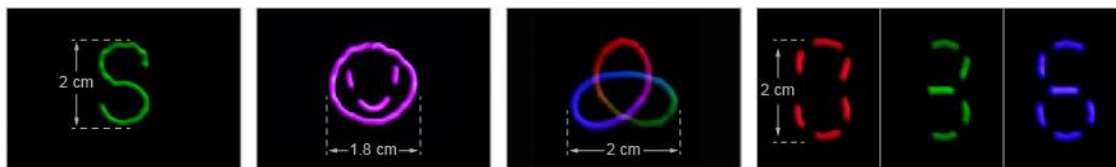


図 2: MATD で表示可能な POV コンテンツ. 左から“S”, “スマイルフェイス”, “3D トーラスノット”, “数字(音声も同時に提示)”を表す([6]より引用)。

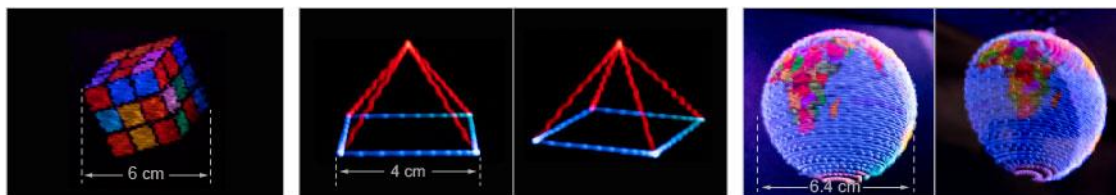


図 3: 長時間露光撮影. 左から“キューブ”, “ピラミッド”, “地球”([6]より引用)。

3. 結果

3.1. 3次元コンテンツの表示結果

MATD で空中に表示可能な2次元・3次元像を図2に示す. このようなシンプルな形状であれば100 ms以内で描画可能であるため, POVコンテンツとして人の目にも映像として視認できる. 結果から, 粒子の位置とLEDを高速に同期制御できていることが確認できる. さらに図2右の画像は, 数字を表した視覚コンテンツと同時に, 音声も同時に提示したときの様子を撮影したものである. 表示する画像はリアルタイムに更新可能であるため, LeapMotion等の入力デバイスを用いたインタラクティブなシステムとしても利用可能である.

図3には, MATDで表示したより複雑な形状を示す. 現状のMATDのシステムではこれらの画像をPOVの時間(100 ms)内に描画することはできず, 20秒の長時間露光により撮影したときの写真を表す. 左から順番に, 2次元のラスタ画像, 3次元のベクタ画像, 3次元のラスタ画像を表している.

3.2. 定量評価

まずはMATDの移動最高速度を求めるために, 線形スピードテストを行った. -5 cmの位置で静止した状態から一定の加速度で中心点まで移動し, そこから減速して+5 cmの位置で再び静止するように, トラップの位置を移動させる(図4左の太線プロット). このとき, 中心点における速度を変更してテストしていき, 粒子を浮遊させたまま無事に移動できる速度をテストしたところ, 移動最高速度は水平方向に3.75 m/s, 垂直方向に8.75 m/sであった. また, この実験のときに, LEDをストロボのように光らせることで粒子の実際のスピードおよびトラップの位置との距離を測定した(図4左). グラフより, 粒子はトラップの位置から一定の範囲に常に位置していることが確認できる.

図4真ん中のグラフは, 3Dプリンタのアームに固定したマイクを用いて音圧を測定した結果を示す. 人の手を模したシリコンの人差し指に触覚を提示するように焦点を作り, その指の2 mm下の面をスキャンして音圧レベルをプロットした. このとき同時に, 視覚コンテンツを提示するた

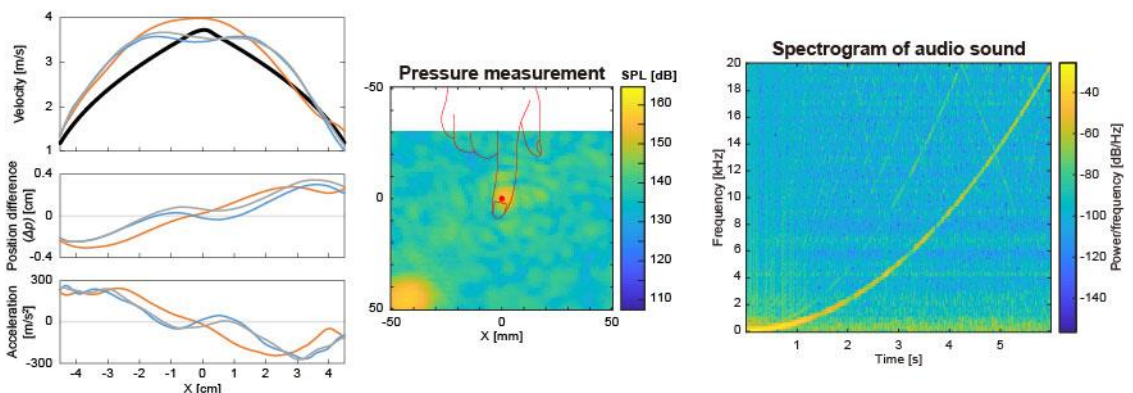


図4: 定量評価. 左から水平移動速度, 音圧測定, オーディオ測定 ([6]より引用).

めの浮遊トラップも同平面(グラフの左下)に生成している。グラフが示すように、触覚を提示するのに十分な音圧を指に作り出せる。

図4右のグラフは、オーディオとして0 Hz から 20 kHz までのチャープ信号を入力したときに、MATDが実際に生成したオーディオを測定したときのスペクトログラムを表す。MATDが人の可聴音を十分にカバー可能な領域の音を生成できることが確認できた。

4. まとめ

超音波フェーズドアレイを用いることで、視覚・触覚・聴覚に関するコンテンツを同時に生成できるボリュームディスプレイ(MATD)を構築できることを実験的に示した。現状のMATDシステムで生成できる3次元像はシンプルな形状(図2)のみに制限されるが、マルチモーダルな3次元ディスプレイとしての可能性を十分に示す結果である。今後の展望としては、本技術の実用化に向けて粒子の並列走査や移動速度の向上などの課題に取り組む。

謝辞

本研究は、公益財団法人高柳健次郎財団の助成によるものであることを記し、関係各位に謝意を表す。

参考文献

[1] D. Smalley, T. C. Poon, H. Gao, J. Kvalve, and K. Qaderi, “Volumetric displays: turning 3-D inside-out,” *Opt. Photonics News* **29**(6), 26–33 (2018).

- [2] H. Kimura, T. Uchiyama, and H. Yoshikawa, “Laser produced 3D display in the air,” In *Proc. ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies* (2006).
- [3] Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, J. Rekimoto, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, “Fairy lights in femtoseconds: aerial and volumetric graphics rendered by focused femtosecond laser combined with computational holographic fields,” *ACM Trans. Graph.* **35**, 17 (2016).
- [4] J. Ruiz-Avila, “Holovect: Holographic Vector Display,” *Kickstarter* <https://www.kickstarter.com/projects/2029950924/holovect-holographic-vector-display> (2016).
- [5] D. Smalley, E. Nygaard, K. Squire, J. V. Wagoner, J. Rasmussen, S. Gneiting, K. Qaderi, J. Goodsell, W. Rogers, M. Lindsey, and K. Costner, “A photophoretic-trap volumetric display,” *Nature* **553**, 486–490 (2018).
- [6] R. Hirayama, D. M. Plasencia, N. Masuda, and S. Subramanian, “A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping,” *Nature* **575**, 320–323 (2019).
- [7] T. Fushimi, A. Marzo, B. W. Drinkwater, and T. L. Hill, “Acoustophoretic volumetric displays using a fast-moving levitated particle,” *Appl. Phys. Lett.* **115**, 064101 (2019).
- [8] J. Berthelot and N. Bonod, “Free-space micro-graphics with electrically driven levitated light scatterers,” *Opt. Lett.* **44**,

1476–1479 (2019).

- [9] A. Marzo and B. W. Drinkwater, “Holographic acoustic tweezers,” *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **116**, 84–89 (2018).
- [10] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, Drinkwater, and S. Subramanian, “UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces,” In *Proc. UIST 2013* 505–514 (ACM, 2013).
- [11] W. S. Gan, J. Yang, and T. Kamakura, “A review of parametric acoustic array in air,” *Appl. Acoust.* 73, 1211–1219 (2012).