



3次元位置制御可能なバルーン型ディスプレイ

古本拓朗¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

1) 東京大学大学院 新領域創成科学研究科
(〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5,

furumoto@hapis.k.u-tokyo.ac.jp, {yasutoshi_makino, hiroyuki_shinoda}@k.u-tokyo.ac.jp)

概要 : 空中超音波を用いて3次元的に位置制御されたバルーンに映像を投影することによって, 空中に映像を提示するシステムを提案する. バルーンの位置制御は, 環境に配置された空中超音波フェイズドアレイを用いて非接触に力を加えることにより行われる. その結果, スクリーン側に動力を搭載することなくメートルオーダーにおよぶ位置制御範囲を実現している. 本論文では, 提案システムの構成と機能を紹介し, バルーンの位置制御実験を行った結果について述べる.

キーワード : 浮遊型ディスプレイ, 空中超音波

1. はじめに

映像を空中の自由な位置で提示するために, これまで多くの研究がなされてきた.

主要なアプローチのひとつは飛行ロボットを用いる方法である. 特に近年ではドローンを利用した方法が多く提案されている[1]-[3]. 飛行ロボットを用いるアプローチは高い運動性を獲得できるという利点を持っているが, 浮遊時間がバッテリーに制限されたり, 衝突による危険性が生じたりするなどの問題が生じる.

もうひとつのアプローチは, 電磁石[4]や空中超音波[5]などを用いて物体を浮遊させ, その物体に映像を投影する方法である. こちらのアプローチは環境側にアクチュエータが埋め込まれているため, 飛行ロボットのように浮遊時間がバッテリーに制限されることはない. ただし, その駆動範囲は現在のところアクチュエータから数センチ程度の距離に限られている.

本論文では, 音響放射圧を用いてバルーンの3次元位置を非接触に制御し, それに映像を投影することによって空中に映像を提示するシステムを提案する (図 1, 図 2).

我々は以前の研究で, 単一の空中超音波フェイズドアレイデバイス (airborne ultrasound phased array, AUPA) [6], [7] から平面波を放射し, その波面方向と出力をフィードバック制御することによって, バルーンを 1m 以上の高度で滞空させることに成功した[8]. 今回はこれを発展させ, 複数の AUPA からバルーンに向けて平面波を放射し, その出力をフィードバック制御することによってバルーンの 3次元位置を制御する. その結果, 1m 以上の高度でメートルオ

Takuro FURUMOTO, Yasutoshi MAKINO, and
Hiroyuki SHINODA

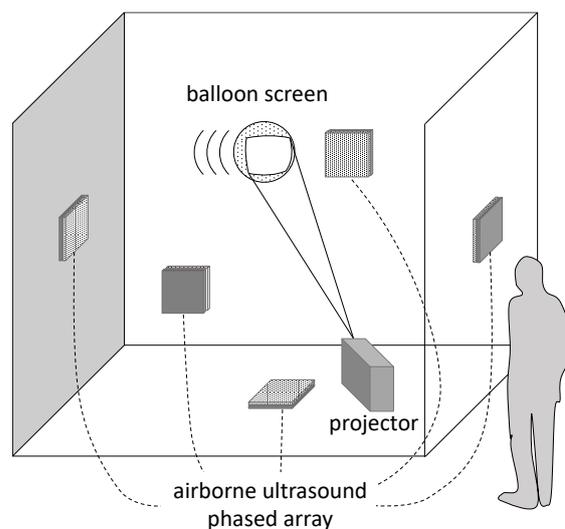


図 1 空中超音波フェイズドアレイデバイスによって位置制御されたバルーン型ディスプレイ.

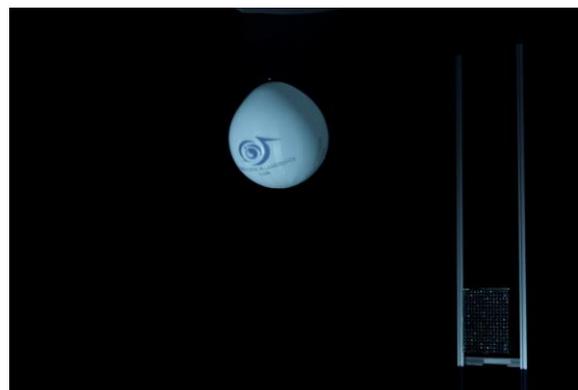


図 2 浮遊するバルーンへのプロジェクション.

ーダーの移動範囲を実現している。

また、提案システムは映像を提示するスクリーンに通常のバルーンを使用している点も特徴的である。そのため、スクリーンが汚れたり破損したりしても、安価かつ簡単に入手・交換することができる。

2. システムの構成

提案システムの構成を図 3 に示す。本システムを構成するコンポーネントは、スクリーンであるバルーンと、それを駆動する複数の AUPA、バルーンの位置を測定する深度センサ、映像を投影するプロジェクタである。

我々が製作したプロトタイプの外観を図 4 に示す。また、その座標系定義と AUPA 配置を図 5 に示す。プロトタイプには一辺 2m キューブ内に 5 基の AUPA が対向配置されている。

AUPA には文献[7]で紹介されているものと同じものを用いた。本デバイスには 40kHz で駆動する超音波振動子が計 249 個配列されている。各素子の駆動位相と駆動振幅を電氣的に制御することで、平面波の波面方向と出力を自由に制御することができる。

提案システムでは、AUPA からバルーンに向けて平面波を放射し、そのときに生じる音響放射力を用いてバルーンの位置を制御する。単一の AUPA デバイスから放射された平面波が剛体球に及ぼす音響放射力の大きさは、我々が行った実験によると 図 6 に示すようになる。我々は、この実験データに多項式をフィッティングして得られた次の式を用いて音響放射力の大きさを見積もった。

$$F_M(r) = 2.71r^3 - 9.24r^2 + 6.77r + 3.60 \text{ [mN]} \quad (1)$$

本来、音響放射力の大きさは距離と角度の関数だが、今回は簡単のために距離のみの関数としてモデル化した。音響放射力の大きさは駆動振幅の 2 乗に比例するので、駆動振幅 p における音響放射力 F は次のように書ける。

$$F = \left(\frac{p}{p_M}\right)^2 F_M \quad (2)$$

我々は式(2)で表される音響放射力の各 AUPA に関する線形和が所望の大きさと向きになるように、各 AUPA デバイスの駆動振幅を制御した。外乱環境下でバルーンの位置を安定化させるために、位置に基づく PID 制御器を用いてバルーンに与えるべき力を計算した。

バルーン位置の測定には Kinect v2 に搭載された深度センサを用いた。取得した深度画像を 2 値化し、その画像重心を用いて 3 次元位置を算出した。本システムは、ユーザーがスクリーンの傍に立って、バルーンに手で触って動かすことを想定しているの、そのような状況でもバルーンの位置が正しく検出されるように、直前のフレームでバルーンが検出された位置の周辺の画素に注目して画像処理を行った (図 7)。

映像の投影位置は深度センサで取得したバルーンの位置を用いて決定される。プロジェクタと深度センサの幾何関係は円形格子パターンを用いてキャリブレーションした。

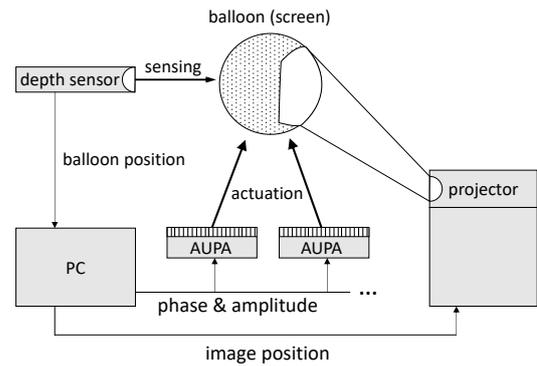


図 3 システムの構成。

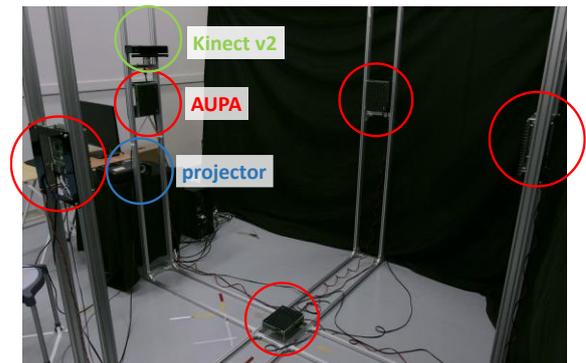


図 4 プロトタイプの外観。

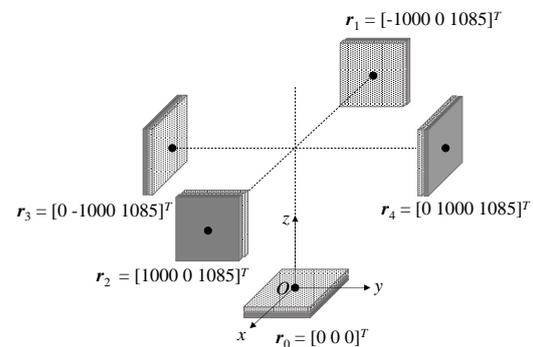


図 5 プロトタイプの座標系定義と AUPA の配置。

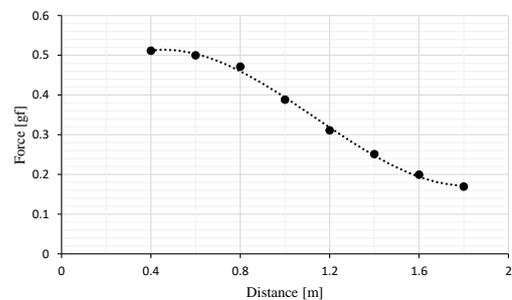


図 6 AUPA の正面に配置された直径 20cm の剛体球に向けて、AUPA から最大駆動振幅で平面波を放射したときの音響放射力の大きさ。点が実験で測定されたデータ。点線がデータにフィッティングした 3 次関数。

3. バルーン位置制御実験

我々はプロトタイプを用いてバルーンを指定した経路に沿って移動させる実験を行い、そのときの位置制御性能を評価した。

スクリーンには、ヘリウムを充填した直径 20cm のゴム風船を用いた。スクリーンの表面にはテープを貼り付け、空気よりもわずかに重くなるように調整した。実験時のスクリーンの重量は 0.3g だった。

指定した移動経路を図 8 に示す。高さ 1285mm の面内に 6 種類の目標位置（位置 A～位置 F）を用意し、10 秒おきに指定した順番で次の目標位置へとバルーンを移動させた。AUPA 配置の対称性からバルーンの制御特性はどの象限においても同じだと思われるので、今回の実験では目標位置をすべて第 1 象限内に設定した。

スクリーンの位置履歴を図 9 に示す。図を見ると、定性的にはスクリーンが目標位置に追従していることが分かる。これらの目標位置は原点直上の位置 A を除いて AUPA デバイス開口の正面から外れていることに注意されたい。そのような点であっても位置制御できていることは、AUPA を密に配置することなくバルーンの位置が制御できることを示している。

一方で位置 C や位置 E においては、目標位置とバルーンの収束位置に偏差が生じている。これらの位置においては、AUPA の出力が飽和しており、バルーンの位置制御をおこなうために必要な力が十分に確保できていないものと考えられる。

4. スクリーン位置の指定方法

プロトタイプには、スクリーンの位置を指示する方法を 2 種類実装した。

ひとつ目の方法は、3 次元座標を指示することにより、スクリーンの位置を指示する方法である。こちらの方法は、正確な 3 次元座標にスクリーンを配置したい場合や、特定の経路に沿ってディスプレイを移動させたい場合、人の手に届かない場所に配置したい場合などに便利である。

もうひとつの方法は、ユーザーがスクリーンを手で掴んで動かし、目標の位置でスクリーンを手放すことによって、スクリーンの位置を指示する方法である（図 10）。こちらの方法には、通常のプロジェクタ用スクリーンの位置を調整する場合と同じ感覚で直感的に位置を調整することができたり、制御端末にアクセスすることなくその場で位置を変更できたりするという利点がある。

ユーザーがスクリーンを掴んだか否かの判定は、ユーザーの手とスクリーンの距離で判定している。手の位置は Kinect v2 とその SDK を用いてトラッキングされており、手の位置がスクリーンに接近したまま一定時間が経過すると、スクリーンが手でつかまれていると判断され、スクリーンの位置を指示することが可能になる。スクリーンがつかまれている状態では、常に目標位置が現在位置で更新されるようになっている。



図 7 物体の位置計測の手順。上：カラー画像（参考）、左下：深度画像、右下：注目領域切り取り後の深度画像。

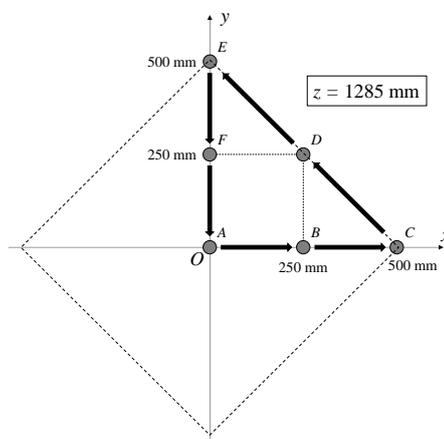


図 8 スクリーン位置制御実験における移動経路。

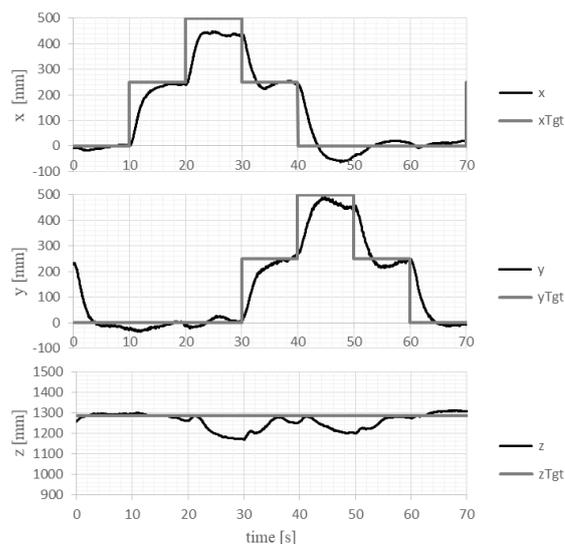


図 9 バルーン位置制御実験におけるバルーンの位置履歴。黒線は実際のスクリーン位置。灰色線は指定した目標位置。

5. むすび

本論文では、空中超音波を用いて位置制御されたバルーンに映像を投影することにより空中に映像を提示するシステムを提案した。また、そのプロトタイプを作成し、バルーン的位置制御実験を行ったところ、1m以上の高度で、メートルオーダーの範囲で移動させることに成功した。

今後は、ディスプレイとしての視認性を評価する予定である。

謝辞 本研究は科研費 201813314, および 16H06303 の支援を受けている。

参考文献

- [1] J. Scheible and M. Funk, “In-situ-displaydrone: Facilitating Co-located Interactive Experiences via a Flying Screen,” Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Pervasive Displays, 2016, pp. 251–252.
- [2] A. Gomes, C. Rubens, S. Braley, and R. Vertegaal, “Bit Drones: Towards Using 3D Nanocopter Displays as Interactive Self-Levitating Programmable Matter,” Proc. 2016 CHI Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - CHI '16, pp. 770–780, 2016.
- [3] W. Yamada, K. Yamada, H. Manabe, and D. Ikeda, “iSphere: Self-Luminous Spherical Drone Display,” Proc. 30th Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol. - UIST '17, 2017.
- [4] J. Lee, R. Post, and H. Ishii, “ZeroN: Mid-air Tangible Interaction Enabled by Computer Controlled Magnetic Levitation,” Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 327–336, 2011.
- [5] Y. Ochiai, T. Hoshi, and J. Rekimoto, “Pixie Dust: Graphics Generated by Levitated and Animated Objects in Computational Acoustic-potential Field,” ACM Trans. Graph., vol. 33, no. 4, p. 85:1--85:13, 2014.
- [6] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, “Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound,” IEEE Trans. Haptics, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010.
- [7] K. Hasegawa and H. Shinoda, “Aerial Vibrotactile Display Based on MultiUnit Ultrasound Phased Array,” IEEE Trans. Haptics, 2018 (Early access).
- [8] 古本拓朗, 長谷川圭介, 牧野泰才, 篠田裕之: 空中平面超音波による浮遊物体の動的 position 制御, 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3A1-05, 2017.

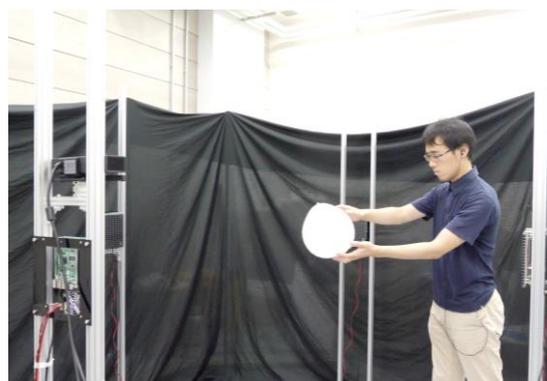


図 10 手を使った直感的なスクリーン位置の変更.