



# 空中超音波による浮遊平面の方向制御

Direction control of a floating plane using airborne ultrasound

笠井匠<sup>1)</sup>, 古本拓朗<sup>1)</sup>, 藤原正浩<sup>1)</sup>, 牧野泰才<sup>1)</sup>, 篠田裕之<sup>1)</sup>  
 Takumi KASAI, Takuro FURUMOTO, Masahiro FUJIWARA,  
 Yasutoshi MAKINO and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-0033 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, [kasai@hapis.k.u-tokyo.ac.jp](mailto:kasai@hapis.k.u-tokyo.ac.jp))

**概要:** 空中超音波による音響放射力を用いて, 空中につり下げられた平面状の板の方向を制御するシステムを提案する. 本システムは, 空中超音波フェイズドアレイを使って適切な位置に焦点を当てることでトルクを与える. 本システムは, 映像を投影することで空中スクリーンや, 様々なテクスチャを提示可能な遭遇型触覚提示デバイスに応用できると期待される. 本稿では, 提案システムの構成と制御性能を確認する基礎実験を行った結果について述べる.

**キーワード:** 空中超音波, 音響放射圧

## 1. はじめに

本稿では, 空中に浮遊させた平面状の板に対して, 超音波により遠隔から力を与えることで, その方向を制御するシステムを提案し (図 1), その制御性能を確認する. 板はヘリウムを充てんしたバルーンから吊り下げることにより浮遊させ, 超音波は環境に配置された空中超音波フェイズドアレイデバイス (Airborne Ultrasound Phased Array, AUPA) を用いて非接触にトルクを与える.

空中で物体の運動を非接触に制御する技術は, ボクセルディスプレイ[1]や空中ディスプレイ[2], 遭遇型触覚提示[3], タンジブルインターフェース[4]など, インターフェース分野で様々な応用が検討されている.

平面の方向を自由に制御可能になれば, 例えば, 浮遊する平面に映像を投影することで, 回転可能な空中スクリーンとして利用することが考えられる. 他にも, 平面に複数のテクスチャを貼り付けることによって, 様々な触感を提示することが可能な遭遇型触覚提示装置として利用するなど, 更なる応用の幅が広がると考えられる (図 2).

## 2. システム構成

### 2.1 概要

提案システムの構成を図 3 に示す. 本システムは, 平面を浮遊させるためのバルーン, バルーン位置制御システム, および本研究で新規に開発した平面方向制御システムで構成されている.

### 2.2 超音波フェイズドアレイ (AUPA)

今回, 超音波フェイズドアレイは文献[5]と同一のシステムを使用した. AUPA は図 5 に示すように, 縦 14 個, 横



図 1 提案システム.

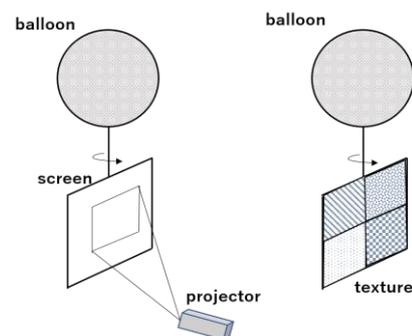


図 2 システムの応用例. (左) スクリーンとしての利用. (右) 異なる触覚提示としての利用.

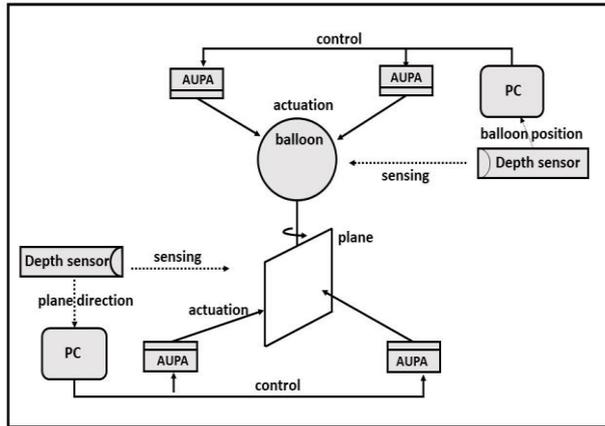


図3 システムの概要.

18個、計249個の超音波振動子が配置されている。各振動子の振幅及び位相を個別に制御することにより任意の位置に焦点を作り出し、AUPA1台当たり10 mN オーダーの音響放射力を与えることができる。

### 2.3 バルーン位置制御システム

バルーンの位置制御には、古本らによって提案された手法[6]を用いる。

バルーンの3次元位置は Kinect v2 を用いて取得する。取得された位置座標に応じて、システムの上部に設置された AUPA がバルーンに適切な強度で超音波を照射することで、バルーンの位置を制御する。各 AUPA の音響放射力の合力が所望の大きさとなるように各デバイスの駆動振幅を調節し、位置に基づくフィードバック制御を用いてバルーンの位置を安定化させる。

### 2.4 平面方向制御システム

平面方向制御システムは、PC、AUPA2台、Kinect v2 から構成される。AUPA はシステムの下部（床面）に設置されている。作成したプロトタイプの座標系と AUPA の配置を図6に示した。本システムでは Kinect を原点とした座標系を定義した。

平面の方向は Kinect v2 で取得した深度画像から推定する。取得した点群の中から、座標のしきい値を設定することで3次元注目領域内の点群を抽出する。得られた注目領域内の点群の各座標と推定平面との距離の和が最小となるように、最小二乗法を用いて平面を推定する。平面の角度は、平面の法線ベクトルを Kinect 座標系での  $xz$  平面に射影したベクトルと  $z$  軸との角度で定義する。今回の定義では、 $y$  軸に対し右手系で回転する向きを正の角度としている。

推定した角度を用いて、振動子の出力を PID 制御する。各 AUPA の焦点の位置は固定しており、目標角度と推定角度の偏差の正負に応じて焦点の位置を反転させることで逆向きのトルクを与えて方向制御を行った（図7）。



図4 システムの外観.

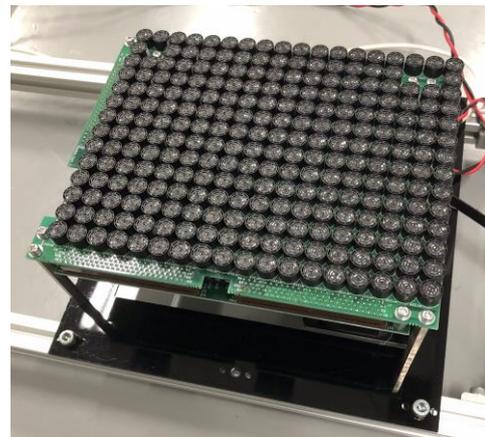


図5 超音波フェイズドアレイ (AUPA).

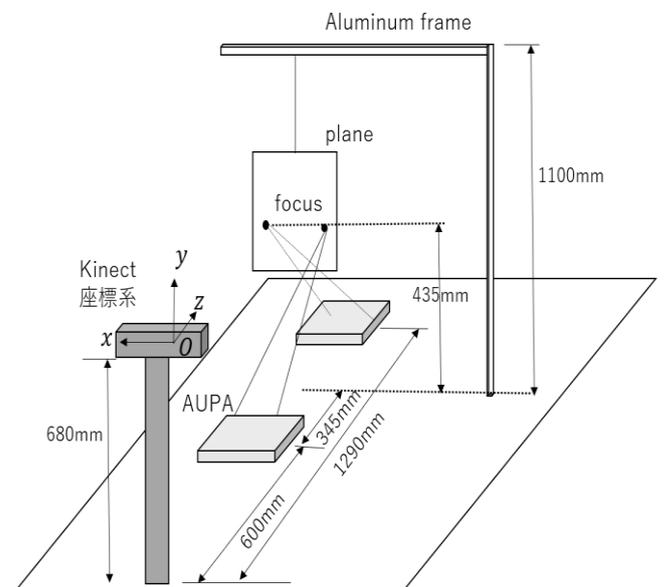


図6 プロトタイプ（固定吊り下げ実験装置）の座標系定義と AUPA の配置。各 AUPA と平面との距離は等しい。

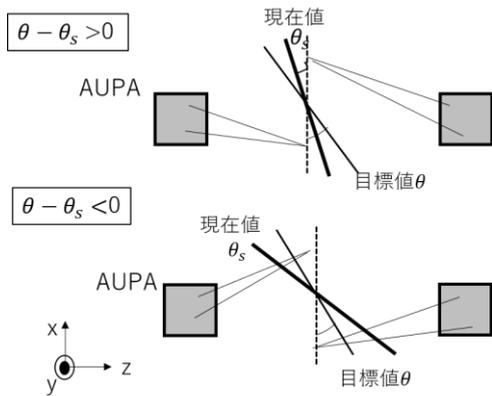


図7 焦点の切り替え. +y方向から見た図. 目標角度 $\theta$ , 推定角度 $\theta_s$ .

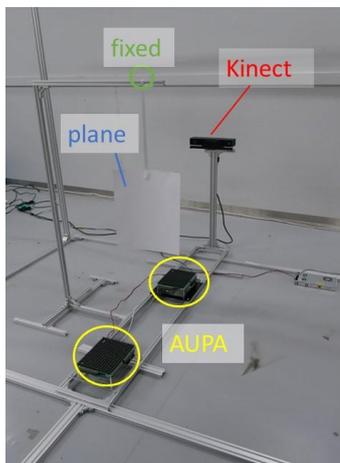


図8 固定吊り下げ実験装置.

### 3.実験

#### 3.1 実験1: 固定吊り下げ平面方向制御実験

はじめに, 平面の回転軸を固定した際の制御性能を検証するために, 平面を固定した位置に吊り下げて方向を制御する実験を行った. 作成した実験装置を図8に示す. 平面は, 質量 20.1g, 縦 380mm, 横 270mm の紙を使用した. 目標角度は 30 度として制御を行った.

実験結果を図9に示す. 図9から読み取れるように, 立ち上がりオーバーシュートが現れ, その直後に目標値を下回るものの, その後は目標値に向かって収束していることが分かる. 収束した後は, 誤差 5 度以内の範囲の値に収まり続けている.

#### 3.2 実験2: 浮遊平面の方向制御実験

次に, 平面をバルーンに吊り下げて浮遊させている状態で, その方向を制御する実験を行った. バルーンの位置は一定に保ったまま, 平面の方向制御を行った. 質量 6.3g, 縦 300mm, 横 300mm の紙を使用した. 本実験では剛体の平面を想定しているので, 剛性を高めるため上端を 15mm, 下端を 20mm 折り曲げた. 実験1と同様に目標角度は 30 度として制御を行った. 平面の方向履歴とバルーンの位置履歴をそれぞれ図10, 図11に示す. 図10から読み取れるように, 開始から約 15 秒間は目標値に収束せず 20 度付

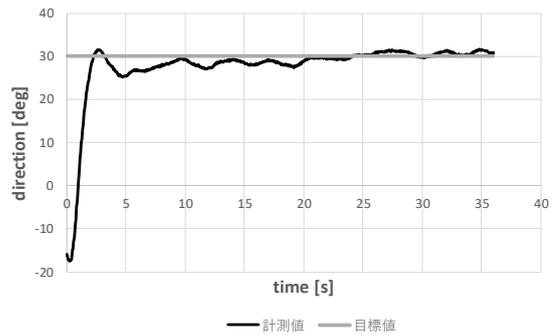


図9 実験1における平面の方向履歴. 黒線は実際の平面の方向. 灰色線は指定した目標方向.

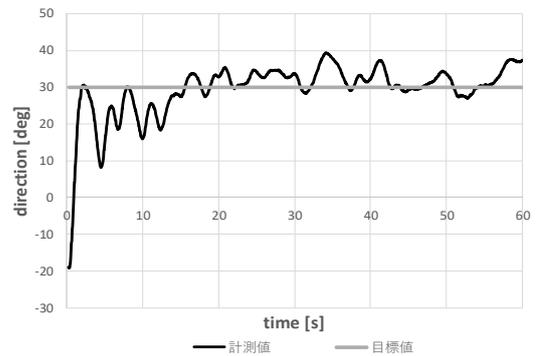
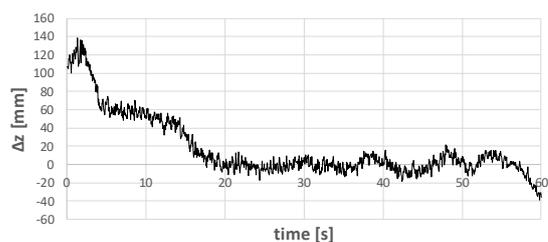
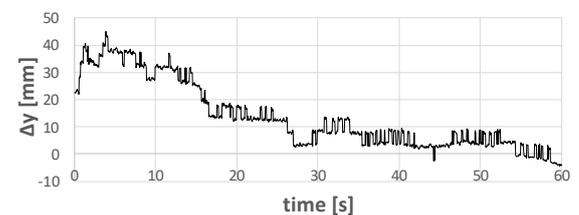
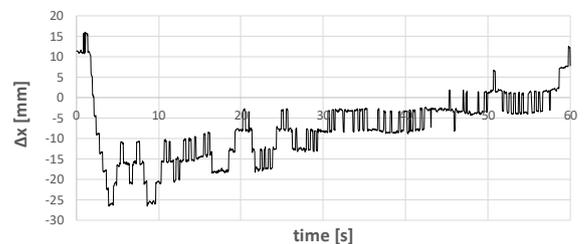


図10 実験2における平面の方向履歴. 黒線は実際の平面の方向. 灰色線は指定した目標方向.



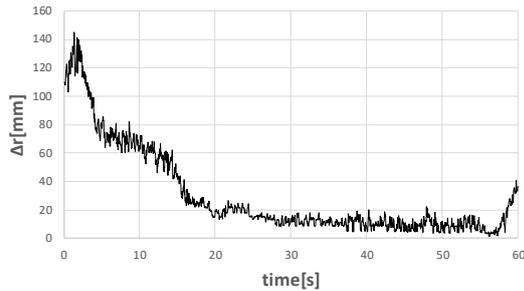


図 11 実験 2 におけるバルーン的位置履歴.

縦軸は実際位置と目標位置との誤差.

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}.$$

近で振動し、その後は目標値に向かって収束していることが分かる。収束した後は、誤差 10 度以内の範囲の値に収まり続けている。

実験 1 と比べ誤差が大きくなった原因は、バルーン的位置制御誤差に由来する回転軸のずれであると考えられる。図 11 にバルーンの目標位置と実際の位置との誤差を示す。図 11 より、x 方向、y 方向、z 方向のいずれも実験開始直後の誤差が大きいたことが分かる。この開始直後の誤差が平面の方向制御にも影響していると考えられる。特に平面の回転軸が x 軸方向にずれることで、各 AUPA が与えるトルクに差が生じ、平面の方向制御誤差も大きくなったと考えられる。

#### 4.まとめと今後の展望

本稿では、空中超音波フェイズドアレイとバルーンを用いた浮遊平面方向制御システムを提案した。プロトタイプを試作して浮遊する平面の方向を制御する実験を行った。

軸が固定された平面の回転では 10 秒以内に目標角度に対して 5 度以内に制御できることを確認した。また、浮遊しているバルーンに吊り下げた場合には、15 秒程度で目標角度に収束することを確認した。

今後は、制御対象とする物体の形状を、平面から多面体へと拡張したいと考えている。バルーン自体の形を多面体にして、その位置と姿勢の制御を試みる予定である。

**謝辞** 本研究は科研費18J13314および16H06303の支援を受けている。

#### 参考文献

- [1] Y. Ochiai, T. Hoshi, and J. Rekimoto, "Pixie Dust: Graphics Generated by Levitated and Animated Objects in," *ACM Trans. Graph.*, 2014.
- [2] 古本拓朗, 牧野泰才, 篠田裕之: 3次元位置制御可能なバルーン型ディスプレイ, 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 33B-1, 2018.
- [3] 砥出悠太郎, 古本拓朗, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之: 軽量浮遊物体によるVR環境での遭遇型触感呈示, 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 34A-3, 2018.
- [4] J. Lee, R. Post, and H. Ishii, "ZeroN: Mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation," in *UIST'11 - Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2011.
- [5] S. Inoue, Y. Makino, and H. Shinoda, "Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2018.
- [6] T. Furumoto, K. Hasegawa, Y. Makino, and H. Shinoda, "Three-Dimensional Manipulation of a Spherical Object Using Airborne Ultrasound Plane Waves," *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. PP, p. 1, Nov. 2018.