



超音波フェーズドアレイによる球体浮揚における回転軸制御

Rotation Axis Control in Sphere Levitation Using Ultrasonic Phased Array

吉田寛人¹⁾, 荒川岳斗¹⁾, 鈴木颯¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Hiroto YOSHIDA, Gakuto ARAKAWA, Shun SUZUKI, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, h.yoshida@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 超音波フェーズドアレイを用いて単一焦点音場を形成し、円軌道上の等間隔な点に沿って周回させることで、波長より大きな物体を空中に浮揚可能であることが知られている。この手法で球体を浮揚させる場合、空中で水平軸周りに意図しない回転が生じる。さらに、その回転軸および角速度は時間的に変化し、一定でない様子が観察されている。本稿では、浮揚球体の回転軸を所望の方向に保持するための焦点軌道の設計方法を提案する。計測実験の結果、提案手法における浮揚球体の回転軸は限定的な範囲内に保持され、回転軸の安定性の向上を確認した。

キーワード: 音響浮揚、回転軸制御、超音波フェーズドアレイ、三次元ユーザインターフェース

1. はじめに

空気と物体表面など、音響インピーダンスが異なる 2 種類の媒質の境界に音波が入射する際、音響エネルギー密度の差に起因して音響放射圧と呼ばれる微小な圧力が生じる。空中超音波は、この圧力で固体表面に非接触で力を提示することができる。位相制御によって集束させた空中超音波の音響放射圧を重力に逆らう方向に与えることで軽量の物体を浮揚させる技術を音響浮揚と呼ぶ。音響浮揚は、磁力による浮揚などと比べて浮揚対象の物性への依存が小さく、液滴 [1] や薬品 [2]、生物 [3] といった多様な対象を浮揚可能であることから、様々な応用が期待されている。例えば、VR における 3 次元ユーザインターフェースとしての活用が考えられる。仮想映像とは異なり、空中に物理的な実体を保持し、実際に操作可能な空中コントローラなどとして使用できる可能性がある。これにより、ユーザの直感的な操作や没入感向上への寄与が期待される。

初期の音響浮揚は、超音波振動子と反射板を対向させることで定在波を発生させ、音圧の節に物体を挟み込むように保持することで実現された [4]。この定在波手法は、定在波の節に物体を保持するというその原理上、半波長 (周波数が 40 kHz なら 4 mm 程度) より大きな物体は浮揚させることができない。

波長より大きな物体の波長より遠方での浮揚は、位相を個別に制御できる超音波振動子を格子状に配列した空中超音波フェーズドアレイ (AUTD) [5] を制御し、事前に最適化問題を解くことによって位相と振幅を決定することで実現された [6]。『境界ホログラム』と呼ばれるこの手法は、複雑な最適化問題を解く必要がある分、計算コストが大きい。

近年、波長より大きな物体を計算コストの小さい単一焦点音場で浮揚可能であることが明らかになった [7]。具体的

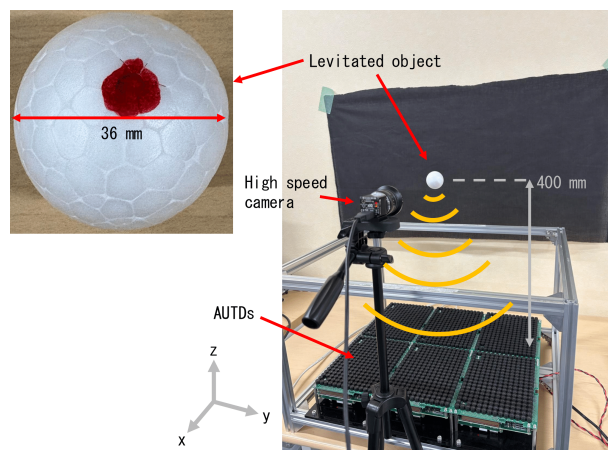


図 1: 超音波フェーズドアレイ (AUTD3) を用いた装置の外観。ハイスピードカメラは計測実験にのみ使用した。

は、浮揚球体の大きさに対し、同程度の直径の円軌道を用意する。その軌道上を単一焦点が等間隔になぞるように高速で周回することで、時間平均的に碗状の音場を形成するという手法である。この単一焦点手法では、半球状の紙風船を浮揚させて制御している。この手法を用いると、発泡スチロール製の球体についても浮揚可能であることが確認されている。この時興味深いことに、球体の浮揚に際して、空中で水平軸周りに意図しない回転が生じる。さらに、その回転軸および角速度は時間的に変化し、一定でない様子が観察されている。

本研究では、非対称的な音場を生成可能な焦点軌道の提示により、浮揚球体の回転軸を制御し、所望の方向に保持する手法を提案する。浮揚球体の安定した制御のための第 1 段階として、回転軸の安定性を向上させることを目指す。ハイスピードカメラで浮揚球体を撮影し、回転情報の計測実験を

行う。計測結果から、角速度や回転軸が未定だった従来の浮揚に対して、提案手法の回転軸の安定性と回転速度の高速性について議論する。

2. 提案手法

2.1 実験システムの概要

実験には、図 1 に示す超音波振動子を格子状に配列した 6 台の AUTD を、3 行×2 列 (x 軸方向 384 mm × y 軸方向 454.2 mm) の配置でセットアップしたシステムを使用する。各 AUTD には 249 個の超音波振動子が配列されており、6 台合計で 1494 個である。各 AUTD をデジタイズ接続で結合し、専用の Software Development Kit (SDK) で各超音波振動子の位相や振幅を電子的に制御する。これによって空中に多様な音場を形成することが可能になる。浮揚物体には、図 1 に示す直径約 36 mm、質量約 0.5 g の発泡スチロール製の球を使用する。

2.2 時空間変調による波長より大きな物体の浮揚

本節では、AUTD を制御することで波長より大きな物体を浮揚させる手法について説明する。AUTD の SDK には、音場を周期的に切り替える機能 (Spatio-Temporal Modulation, STM) が提供されている。先行研究 [7] では、STM を使用して適切な音場を形成することで、波長より大きな半球や角錐が浮揚可能であることが報告された。本研究は球体を浮揚の対象とする。

先行研究 [7] に従い、中心を 6 台の AUTD の中心から高度 400 mm の位置、半径を 19 mm として、図 2 に示すような 45 度ずつ等間隔に配置した 8 点を単一焦点が周回する音場を形成する。焦点位置は図 2 の点 8 の後再び点 1 へと切り替わり、一定の方向に周回する軌道となる。焦点位置は 560 Hz で更新する。すなわち、各点に約 1.8 ms ずつ提示する。超音波の振幅は最大振幅の 0.65 倍とする。これらのパラメータは球体が安定浮揚する条件として実験的に決定した。

本手法で球体を浮揚させる際、水平軸周りの意図しない回転が生じる。また、浮揚球体の回転軸および角速度は時間的に変化し、一定でない様子が観察されている。一度回転が生じると、それを減衰させたり停止させるといったような、自在な制御は現時点では困難である。その理由として、球体の対称性の高さから回転に対する復元力が働きにくいことや、空中では接触による摩擦が存在しないことなどがある。

2.3 往復軌道音場による浮揚球体の回転軸制御

本節では、浮揚球体の回転軸を水平面内の所望の方向に保持する手法を提案する。STM を使用し、前節で説明した音場に多少の修正を加えることで、空中で不安定な挙動を示す浮揚球体の回転軸を水平面内の所望の方向に保持可能である。

単一焦点に前節と同じ 8 点を往復させる。具体的には、図 2 に示すように、STM を使用して焦点位置を点 1 → 点 2 → ... → 点 8 と切り替えた後、折り返して点 9 → 点 10 → ... → 点 14 と往復させる。さらに点 1 で再び折り返し、点 2 → 点 3 → ...

と往復軌道を繰り返す。この際、1 度焦点位置が点 1 や点 8 に切り替わる間に、その他の点には 2 度焦点位置が切り替わることになる。つまり、図 2 に示す周回軌道では、時間平均すると音響放射圧分布がどの点でも等しくなるのに対し、図 2 に示す往復軌道では、点 1 と点 8 のみ他点と比べて弱くなる。往復軌道音場で球体を浮揚させると、点 1 と点 8 を結んだ直線と平行な方向に回転軸が偏って回転することが実験的に確認された。STM 周波数や超音波の振幅などのパラメータは、前節と同様である。すなわち、焦点位置は 980 Hz で更新する。1 度の往復軌道で 14 回焦点位置を切り替えるため、各点に約 1.0 ms ずつ提示する。

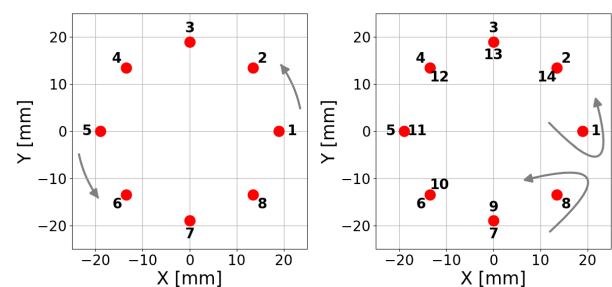


図 2: (左) 周回軌道における焦点位置の提示順。(右) 往復軌道における焦点位置の提示順。

3. 実験

3.1 実験手法

前節の 2 つの手法で浮揚させた球体をハイスピードカメラで撮影することで計測し、回転の速さや回転方向を比較する実験を行った。

まず、発泡スチロール球を周回軌道音場と往復軌道音場で浮揚させた。浮揚球体の回転情報の計測は、フレームレートを 500 fps に設定したハイスピードカメラ (XIMEA MQ003CG) を使用して行った。図 1 に示すように、ハイスピードカメラは AUTD の x 軸がカメラ方向に向かう方向に設置した。つまり、撮影時に得られる画像は浮揚球体を yz 平面に射影したものである。球体表面の対向する位置に赤と青の印を 1 点ずつ付け、浮揚開始後の球体の挙動が比較的安定し始めたタイミングから 5 秒間撮影した。ハイスピードカメラの映像から抽出した各画像から浮揚球体と印を検出した。この時の様子を図 3 に示す。フレーム間の印の位置変化から、2 つの音場で浮揚させた球体の角速度と回転軸の向きを算出した。

角速度と回転軸の向きは以下の手順で導いた。ここでは、検出した円の中心が浮揚球体の中心と一致すると仮定した。

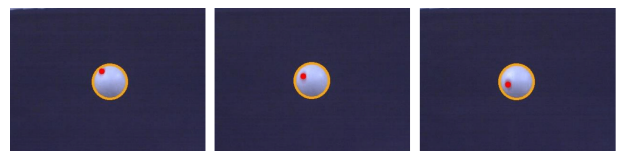


図 3: ハイスピードカメラで撮影した連続画像から浮揚球体とその表面の印を検出した様子。

ハイスピードカメラでの計測から, yz 平面上の射影の円中心と印の座標と円半径が得られた. 画像上の印の座標を (k, l) , 円中心の座標を (m, n) , 印の円中心からの距離を d とすると, d は以下の式で求められる.

$$d = \sqrt{(k - m)^2 + (l - n)^2} \quad (1)$$

さらに, $\arctan(\frac{l-n}{k-m})$ は図 4 の 3 次元極座標における方位角 ϕ に等しい. また d は, 球表面の印から x 軸に下ろした垂線の長さに等しい. 次に, 浮揚球体を図 4 の y 軸方向から見た際の xz 平面上の射影を考える. 印の円中心からの距離は検出した円半径と等しく, x 軸に下ろした垂線の長さは d である. 円半径を r とすると $\arcsin(\frac{d}{r})$ は図 4 の 3 次元極座標における極角 θ に等しい. 浮揚球体の実際の半径と方位角 ϕ , 極角 θ から印の 3 次元座標を求めた. 浮揚球体の実際の半径を r , フレーム間の 2 つの印の 3 次元座標をそれぞれ $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ とすると, それらのなす角 $\Delta\theta$ は以下の式で求められる.

$$\Delta\theta = \arccos(\frac{\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2}{r^2}) \quad (2)$$

フレーム間の間隔は $\frac{1}{500}$ 秒であるため, フレーム間の瞬間角速度を $\Delta\omega$ とすると, $\Delta\omega$ は以下の式で求められる.

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\theta}{1/500} \quad (3)$$

回転軸の向きは, 浮揚球体の角速度ベクトルの向きと等しい. あるフレーム間の角速度ベクトルを ω , フレーム間の 2 つの印の位置ベクトルを $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$, 速度ベクトルを $\mathbf{v}$ とすると, 角速度ベクトルは以下の式で求められる.

$$\begin{aligned} \omega &= \mathbf{p}_1 \times \mathbf{v} \\ &\approx \mathbf{p}_1 \times \frac{(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1)}{\Delta t} \\ &= \frac{1}{\Delta t}(\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2) \end{aligned} \quad (4)$$

これより, フレーム間の 2 つの印の位置ベクトルの外積は, 角速度ベクトルを定数倍したものである. 本研究では, 回転軸の向きを位置ベクトルの外積から求めた.

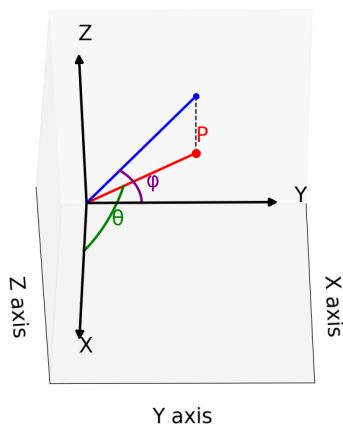


図 4: 本実験における座標系と極角 θ , 方位角 ϕ の定義. カメラは x 軸方向から yz 平面に向かって撮影する.

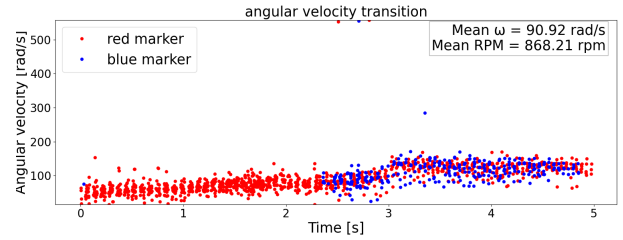


図 5: 周回軌道音場における浮揚球体の瞬間角速度の経時変化.

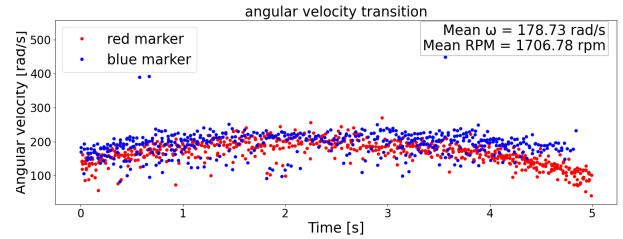


図 6: 往復軌道音場における浮揚球体の瞬間角速度の経時変化.

3.2 結果

周回軌道音場と往復軌道音場における浮揚球体の $\Delta\omega$ を比較した. $\Delta\omega$ の経時変化をプロットし, 平均値を算出した結果を図 5 と図 6 に示す. 図 5 に示すように, 周回軌道音場では, 角速度は約 91 rad/s であった. 青色のプロットが後半から出現するのは, 5 秒間の撮影時間の前半は青色の印がカメラで撮影できないような回転をしていたためである. 一方, 図 6 に示すように, 往復軌道音場では, 角速度は約 179 rad/s であった. 周回軌道音場に比べ, 往復軌道音場では浮揚球体の角速度が約 2 倍になった. 目視で浮揚球体を観察した際も, この角速度の差は認識できた. 印の色による $\Delta\omega$ の差はほとんど無く, $\Delta\omega$ のばらつきは往復軌道の方が大きくなった.

周回軌道音場と往復軌道音場の角速度ベクトルの向き, すなわち回転軸を比較した. 撮影した 5 秒間で, 同じ色の印が 2 フレーム連続して検出された区間において, フレーム間の印同士の位置ベクトルの外積から求めた回転軸の各成分の分布を図 7 と図 8 に示す. 図 7 に示すように, 周回軌道音場では回転軸の各成分が横軸上で広範囲に分布しており, 軸が不安定な回転であることがわかる. 一方, 図 8 に示すように, 往復軌道音場では回転軸の各成分の分布が狭い範囲に集中していることがわかる. x 軸成分は 0.5 付近, y 軸成分は 0.8 付近, z 軸成分は 0 付近にピークが確認できる. つまり, カメラから見て斜め右前方向に突き出すような軸の向きで, 水平軸周りの回転が主成分であることがわかる. この回転軸は, 図 2 に示した 8 点の焦点位置のうち, 往復軌道の始点と折り返し点である点 1 と点 8 を結んだ直線とおおよそ平行な向きである. 実際には, 回転軸が特定の向きで安定することはなく, 水平方向の多少の揺らぎを含むことが観察された. また, AUTD を制御し, 往復軌道の始点と折り返し点の位置を変更することで, 回転軸の向きを選択できる様子が観

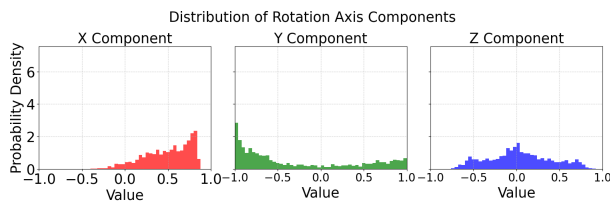


図 7: 周回軌道音場における回転軸の各成分のヒストグラム.

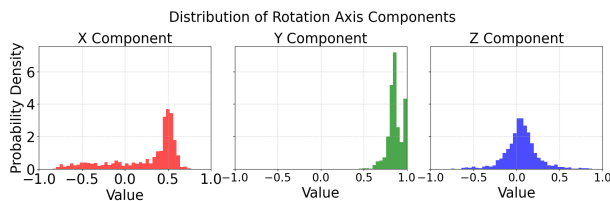


図 8: 往復軌道音場における回転軸の各成分のヒストグラム.

察された.

4. 考察

本研究で提案した往復軌道音場は, 先行研究の枕状音場を維持しつつ, 一部の焦点位置の滞在時間に差をつけることで音響放射圧分布に偏りを持たせたものである. 本手法で回転軸が往復軌道の始点と折り返し点を結ぶ直線とおおよそ平行な向きに保持されるのは, 音響放射圧の強い領域が弱い領域よりも大きなトルクを発生させ, 結果として生じる強い領域から弱い領域への回転モーメントが持続するためと考えられる.

図 8 に示すように, 本手法は回転軸を限定的な範囲内に保持可能であるものの, 完全に固定することは難しい. 今後実装することとして, 現在 8 点である円軌道上の焦点位置のサンプリング点数を増やすことが挙げられる. 実験では, 水平方向の回転軸の揺らぎが往復軌道の始点と折り返し点で抑制されるような様子が観察された. サンプリング点数を増やして焦点間隔を狭めることで, より安定した回転軸の制御を実現できる可能性がある.

今回の計測実験で得られた結果は, 基本的には目視による観察と一致している. 一方で, 撮影した画像はキャリブレーションを行わずに解析されたため, 多少の画像の歪みが結果に影響を与えている可能性がある. 本手法では, 画像上の印の 2 次元座標から実際の 3 次元座標を算出するため, 画像の歪みを正確に補正することで解析精度の向上が見込まれる.

本研究で検討した浮揚球体の回転安定性は, 実用的な応用にも繋がる. 空中で回転し続ける球体は, 位置変化を伴うことなく多角的な画像を撮影できるため, カメラキャリブレーションの効率化などに寄与する可能性がある. その際, 回転の不安定性を抑制することは重要である. 具体的には, 回転軸を安定させ, 球体表面の印配置や回転速度を一定に保つことで, 撮像間の再現性が向上し, キャリブレーションのばらつきを抑制できると期待される.

5. 結論

本研究では, 先行研究に従い AUTD を用いて周回軌道音場を形成することで, 波長より大きな球体を浮揚させた. さらに, 往復軌道音場を形成し, 音響放射圧分布に偏りを持たせることで, 多少の揺らぎが確認されるものの, 浮揚球体の回転軸を水平面内の限定的な範囲内に保持できることを確認した. 浮揚球体は空中で回転し続け, その角速度は従来手法で約 91 rad/s, 提案手法で約 179 rad/s であった.

今後は回転軸のより精密な制御に加え, 浮揚球体の角速度を任意に調整可能な手法の開発に取り組む予定である. 回転軸と角速度を自在に制御できれば, 球体浮揚はより多様な応用が期待される. また, カメラキャリブレーションに加えて, ハイスピードカメラを浮揚球体の上方に設置したり, カメラ自体の台数を増やしたりすることで, より正確な回転情報の計測を目指す.

謝辞 本研究は科研費 21H05301 および 24KJ0554 の支援を受けて行われた.

参考文献

- [1] Richard J. K. Weber, Chris J. Benmore, Sonia K. Tumber, Amit N. Taylor, Charles A. Rey, Lynne S. Taylor, and Stephen R. Byrn. Acoustic levitation: recent developments and emerging opportunities in biomaterials research. *European Biophysics Journal*, 41(4):397–403, 10 2011.
- [2] Sabina Santesson and Staffan Nilsson. Airborne chemistry: acoustic levitation in chemical analysis. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 378:1704–1709, 2004.
- [3] Wen-Jun Xie, CD Cao, YJ Lü, ZY Hong, and B Wei. Acoustic method for levitation of small living animals. *Applied Physics Letters*, 89(21), 2006.
- [4] RR Whymark. Acoustic field positioning for containerless processing. *Ultrasonics*, 13(6):251–261, 1975.
- [5] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, 14(4):740–749, 2021.
- [6] Seki Inoue, Shinichi Mogami, Tomohiro Ichiyama, Akihito Noda, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Acoustical boundary hologram for macroscopic rigid-body levitation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(1):328–337, 2019.
- [7] Ryunosuke Hirai, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Levibowl: Acoustic levitation system for interactive handling of large lightweight objects. In *Proceedings of the Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '25, New York, NY, USA, 2025. Association for Computing Machinery.