



# 空中超音波によるメッシュ平面上の物体位置操作

Manipulation of Objects on a Mesh Plane by Airborne Ultrasound

荒川 岳斗<sup>1\*</sup>, 神垣 貴晶<sup>1)</sup>, 牧野 泰才<sup>1)</sup>, 篠田 裕之<sup>1)</sup>

Gakuto ARAKAWA, Takaaki KAMIGAKI, 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, \* arakawa@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 本稿では空中超音波を用いて材質によらない軽量の物体をメッシュ平面上で位置操作する手法を提案する。本手法は実物体の自律的移動などに応用できる。提案手法では、メッシュ平面の下方に空中超音波フェーズドアレイを配置し、メッシュを透過した集束超音波による力を外力として用いる。このとき集束超音波の照射される物体底面を半楕円体型の凹面にしておくことで、超音波によって与える外力が焦点に対する復元力としてはたらくことを確認した。また復元力により物体に超音波焦点を追従させ、約 500 mg の物体が平均 24 mm/s の速さで 60 mm の直線上を往復できることを確認した。

**キーワード:** 物体操作, 非接触操作, 空中超音波フェーズドアレイ, タンジブルインタフェース

## 1. はじめに

物体の自律移動は物体の知能化や非接触操作にとって重要なテーマである。特に人とコンピュータの新たな関わり方を追究する HCI (ヒューマンコンピュータインタラクション) 分野では、GUI の実体化などにも利用できるため、タンジブルインタフェース [1] のような領域で積極的に研究されている。例えば物体に電子部品が内蔵されたロボットを利用したインタフェース [2, 3] や、厳密に自律的ではないが、磁力のように人が視認できない方法で外力を加えて操作し、自律移動を模擬する磁性体を用いたインタフェース [4, 5] がその具体例である。疑似的なものを含む自律移動が物体の材質制限なく可能になれば、先述のようなインタフェースが持つコンセプトを機械部品や磁性を持たない物体にも拡張でき、他にも部品や材料を運搬するシステムとして応用できる可能性がある。

本研究の目的は、人が視認できない方法で実物体に外力を加え、平面上の位置を操作することで、疑似的な自律移動を実現するシステムの構築である。そのコンセプトを図 1 に示す。

対象に外力を加える方法には超音波の音響放射力を用いる。これは媒質中を伝搬する音波が媒質の境界で反射する際に発生する力である。空中では空気を介して伝わるため人には視認できず、操作対象は磁性のように特殊な性質を必要としない。空中超音波フェーズドアレイ [6] は 1 台あたり 249 個の振動子を制御し、超音波を空間中の任意の点に集束させることができる。4 台を用いた場合には、その焦点で物体に作用する音響放射力は数十 mN 程度になる。

空中超音波を用いた物体の操作については、これまで三次元空間での微小物体 [7] あるいは低密度物体 [8] の研究が行われた。二次元平面上では超音波振動子でワークスぺ

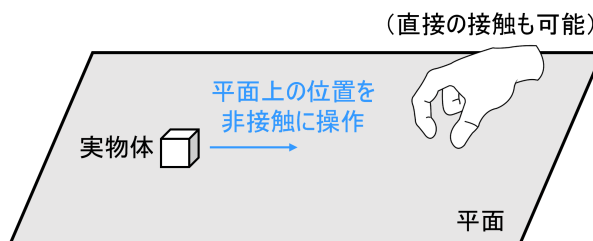


図 1: 目指す物体操作システムのコンセプト

スの側方を取り囲む方法で物体操作が行われた [9]。これらの研究は、操作対象の物体に合わせて複雑な音場の設計やセンシングによるフィードバックを前提とした方法で実現されている。本稿では操作対象となる物体の形状をあらかじめ設計しておくことで、複雑な音場の生成や動的制御を必要とせず、単一焦点の位置制御のみにより操作対象の平面上の位置操作を行う手法を提案する。なお本研究は物体の浮揚ではなく位置の操作を主眼とするため、ワークスペースは平面上に限定している。いくつかの形状を持つ物体を試作した結果、超音波焦点が照射される底面を凹面としたものが操作に適することが実験的に判明したため、本稿で報告する。

## 2. 空中超音波を用いた物体位置操作

### 2.1 構成: 空中超音波フェーズドアレイとメッシュ面

本稿で用いるシステムは図 2 のように、空中超音波フェーズドアレイ、メッシュスクリーン、操作対象の物体から構成される。メッシュは気体粒子の動きをほとんど遮らず、本稿で使用したメッシュスクリーンでは音圧振幅で見ても約 95% の超音波が透過するため、メッシュのない場合と同等である。このメッシュ上に操作対象の物体を置き、下方のフェー

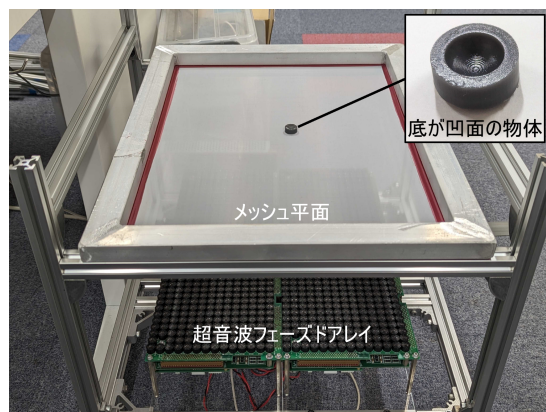


図 2: 製作したシステムの外観図

ズドアレイから集束させた超音波を物体の底面に当てることで物体を操作する。この方略には、物体と面との間の摩擦力を低減できる、ユーザ等の視野を遮らない、面上に配置された他の物体に超音波が遮られない、といった利点がある。

## 2.2 提案手法：焦点に対して復元力がはたらく凹面の設計

音響放射力は境界面で音波が反射する際にはたらく力のため、主に面に垂直な方向の成分を持つ。したがって、境界面の形状のデザインにより受ける力の向きをある程度決めておくことができる。音波が集束する範囲は波長 (=音速/周波数) のオーダーであり、本稿では 40 kHz の超音波を扱うため、面の代表長は 8.5 mm 以上を目安とする。

本稿ではこの面として凹面を用いた。焦点に対する復元力が凹面にはたらく原理は、単純化すると次の通りである。半径  $r$  の球の中心を原点とし、 $z > 0$  の部分の半球を凹面として考える。半球面上の位置ベクトル  $\vec{x}$  と法線ベクトルは同じ向きのため、この位置ではたらく面に垂直な力は  $\vec{F} = |\vec{F}|(\vec{x}/r)$  と表される。 $x, y$  方向では、 $F_x = (|\vec{F}|/r)x$  が  $x$  に比例するように、凹面中心から見て力のはたらく点に向かう力(復元力)となる。 $z$  方向の力は凹面を持つ物体にかかる重力と対向し、物体と接地面との間の摩擦を減少させる。

以上の原理に基づき、凹面上の力がはたらく点(焦点)を連続的に変化させれば、復元力によって焦点を追従するように凹面物体を動かすことができる。

図 3 に波長オーダーの広がりを持つ 40 kHz の焦点と、平面上に置かれた凹面との関係を図示する。凹面の底面は円であり、この半径を  $r$ 、最大深さが  $h$  である。焦点中心が原点にあり、半透明な凹面の中心は  $\vec{x}_c = (2, 0, 0)$  の位置にある。このとき  $x$  軸方向の正味の音響放射力は負方向にはたらく。これをもとに半球型と半楕円体型の凹面に対してはたらく変位方向の力を数値計算すると、図 4 のようになる。ここで焦点径は  $d = 8.5$  mm とし、各凹面は  $2r > d$  を満たすよう、 $r = h = 6$  mm の半球(形状 a)と、 $r = 6, h = 4$  mm の半楕円体(形状 b)で計算した。なお焦点内部の音圧分布は  $p(x, y) = \text{sinc}(x/d)\text{sinc}(y/d)$  としており、 $z$  軸方向には一定とした。

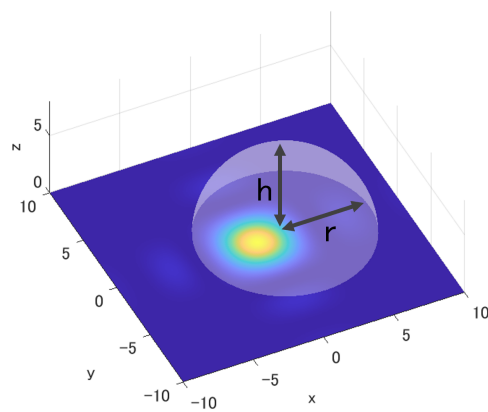


図 3: 広がりを持つ超音波焦点とそれを覆う凹面のイメージ

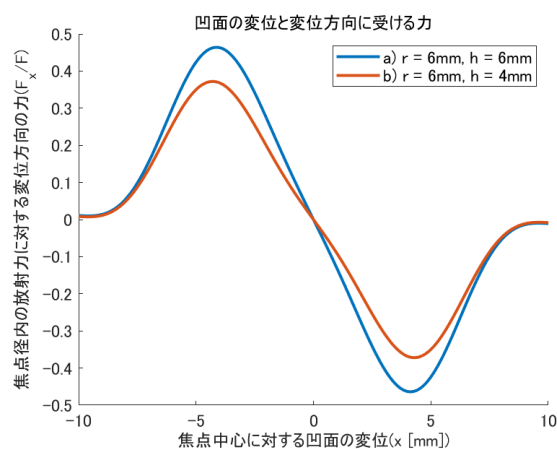


図 4: 超音波焦点から凹面が受ける力の数値計算結果

変位が小さく、凹面に焦点が収まるような位置では概ね線型な力となり、凹面から焦点が外れると線型から大きく外れる。凹面から焦点が外れたとき、凹面の外側で押し戻すようにはたらく力は考慮していないことに注意する。安定した動作のためにはこの範囲の変位を保持することが望ましい。最大深さ  $h$  が浅いと、鉛直方向へ力を受けやすくなるため、その分変位方向に受ける力は弱くなる。使用したフェーズドアレイおよびその制御ソフトウェアの焦点位置の分解能は 0.1 mm 以下と、保持すべき変位の値に対して十分である。

## 3. 実験による操作手法の検証

### 3.1 実験概要

操作手法の検証のため、次の二つの実験を行った。凹面を持つ物体にかかる力の計測による、焦点に対する復元力の確認(実験 1)。実際に直線軌道上で物体を往復させることによる、操作の安定性の確認(実験 2)。

本実験では 2.2 節で数値計算した、形状 a) および b) をそれぞれ持つ立体を操作対象とした。これらは光造形の 3D プリンタ (Formlab 3+) で作成した。超音波フェーズドアレイは 4 台使用し、その直上 170 mm の高さにメッシュ平面を水平に設置した。

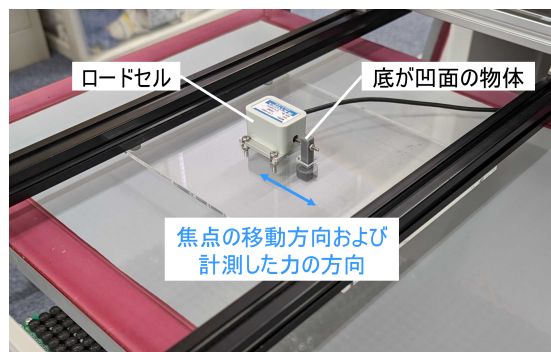


図 5: (実験 1) メッシュ平面上での復元力計測

### 3.2 実験条件

**実験 1: 復元力の計測** 図 5 のように, メッシュ平面上で形状 a), b) を持つ物体それぞれにロードセル (LTS-50GA) を接続し, 変位方向の力を計測した. ロードセルは軸方向の力の向きと大きさを取得できるため, 凹面に対する超音波焦点の変位方向をこの向きに合わせた. 0.25 mm 間隔で焦点を動かし, 各位置では 5 秒間継続して照射した平均の値をとった. なお超音波焦点はメッシュ平面の高さに形成し, 超音波の振幅は最大 (100%) とした. 凹面はメッシュ面に接するように固定しており, 押しつけ力ははたらいていない.

**実験 2: 物体の軌跡の確認** 超音波焦点を直線軌道で単振動するように 3 往復させて形状 b) を持つ物体を動かし, その挙動をカメラ (BU238MCF) で撮影した. 用いた物体の重さは 487 mg である. 本実験では移動する直線の長さは 60 mm, 移動の周期を 5 s/往復とした (平均 24 mm/s). 超音波の音圧振幅は, 安定した動作を事前に確認した値 (65%) で固定している.

### 3.3 結果

実験 1 の結果を図 6 に示す. なお使用した構成で超音波焦点での音響放射力を測ったところ 13 mN だったため, 実測値はこの値で正規化した.

形状 b) は  $|x| \leq 2.5$  mm でほぼ線型である. 数値計算による傾きよりやや小さいが, これは焦点の  $z$  方向の音圧分布によるものと思われる. また数値計算と比べて復元力のピークおよびそのときの変位が小さいが, これは凹面から外れた焦点が物体の外側から押し戻す力の影響と考えられる. またこのため, 変位の絶対値が大きくなり焦点のほとんどが凹面から外れる位置では, 水平方向の力の符号が逆転している.

これに対して形状 a) は数値計算と大きく異なる結果が確認された. まず  $|x| \leq 7$  mm の範囲でほぼ線型であるが, 傾きが正のため復元力としてはたらない. これはおそらく凹面の底面半径  $r$  に対して深さ  $h$  が大きいため, 凹面内側に進行できずに外側で反射する割合が大きくなり, 超音波が集束していないためである. 円の円周角が  $90^\circ$  であることから, 一番深いところでは  $x$  正負方向ともフェーズドアレイからの高さと同じ幅までの位置にある振動子から超音波が

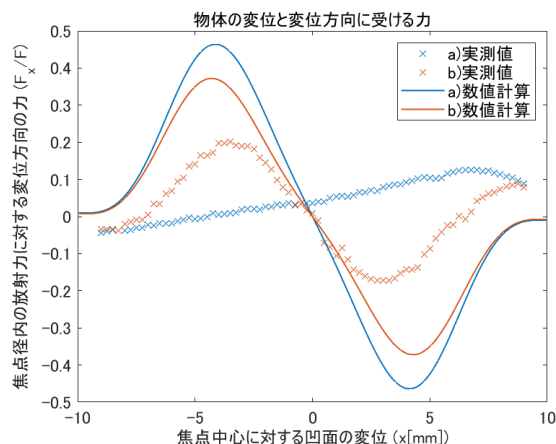


図 6: (実験 1) 物体にはたらく復元力の計測結果

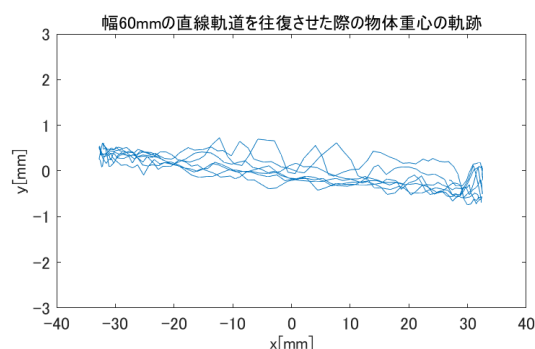


図 7: (実験 2) 形状 b) を持つ物体の重心の軌跡

到達する. 本実験の構成ではその高さ (170 mm) がフェーズドアレイ 1 台の幅 ( $x$  方向は振動子部分で 180 mm) より小さく, 外縁の振動子からの音波は凹面内部に到達せず, 物体側面に遮られ反射してしまう. 底面に近い位置ではこの現象がより顕著に表れ, 外側から押される力が支配的になり, 結果として復元力にならなかったと考えられる.

実験 2 の結果を図 7 に示す. 形状 b) は  $x$  方向に約 60 mm の直線上を往復したことが確認できる. 軸に対して少し傾いているのはカメラ画像の歪みのためと考えられる.  $y$  方向のずれはカメラ画像からの物体検出のゆらぎを含めても 1 mm 程度であり, 移動方向の動きに対して十分小さく, 復元力によって軌跡から外れない程度である.

### 3.4 考察

実験 1 で滑らかな復元力が取り出せる形状 b) は, 実験 2 で安定して操作できることを確認した. しかし形状 a) は復元力がはたらかず, 安定した操作は困難であった. この差についてはフェーズドアレイの開口と凹面の底面半径に対し, 凹面深さが大きすぎることを要因として述べた. そのため半楕円体凹面のサイズ調整や, その他の凹面形状を設計する際にはフェーズドアレイの開口と, フェーズドアレイからの距離を考慮する必要がある.

操作可能な物体の重さ上限は, 物体とメッシュとの間ではたらく摩擦力によって決まる. 復元力がはたらくには変位方向の力が摩擦力を越える必要があり, 動き出しでは質

量を  $m$ 、重力加速度を  $g$ 、静止摩擦係数を  $\mu$  とし、運動方程式  $F_x > \mu(mg - F_z)$  を整理すると下式となる。

$$mg < \frac{1}{\mu} F_x + F_z \quad (1)$$

したがって復元力がはたらくべき最小変位を与え、その変位での  $F_x$ 、 $F_z$ 、および静止摩擦係数を求めることで重さの上限が決まる。本実験の場合には、最小変位を 0.1 mm、静止摩擦係数を 0.1 と仮定すると、上限はおおよそ  $|\vec{F}|$  となる。フェーズドアレイが形成する焦点での音響放射力は 13 mN であったため、1.3 g 程度が操作できる物体重さの上限と概算される。

線型な復元力がはたらく範囲で操作を実行するとき、物体に与えることのできる加速度の上限は、見かけ上のばね定数により求められる。実験 1 の形状 b) に関する結果をもとに  $|x| \leq A$  の範囲を線型とみなすと、ばね定数は  $k = F_x(A)/A$  である。摩擦を無視すると、物体に与えられる加速度は以下ようになる。

$$\begin{aligned} |a| &\leq \frac{kA}{m} \\ &= \beta g \end{aligned} \quad (2)$$

ここで  $|\vec{F}| = mg$ 、 $\beta = F_x(A)/|\vec{F}|$  とした。図 6 の b) 実測値を参照し、 $A = 0.25$  mm とみなすと  $\beta \approx 0.175$  のため、 $|a| \leq 1.72$  m/s<sup>2</sup> で加減速する運動であれば滑らかに操作できることになる。なお線型ばねによる単振動の周期が  $T = 2\pi\sqrt{m/k}$  で表されるため、焦点形成の間隔を  $T/2 = \pi\sqrt{\frac{A}{\beta g}}$  に収めることで、揺り戻しのような動きを抑制できる。

#### 4. 結論

本稿では空中超音波フェーズドアレイを用いた凹型の底面をもつ軽量物体のメッシュ平面上での位置操作を目的とし、その検証を行った。実験では特定の半楕円体凹面を持つ物体にはたらく力を計測し、実際に操作可能であることを確認した。今回のセットアップでは、487 mg の物体が 60 mm の直線上を平均 24 mm/s の速さで安定した往復運動が可能であった。同構成で 1 g 程度までの物体は操作できるはずであり、フェーズドアレイの台数を増やすことでさらに重量の上限を引き上げられる。今回用いた凹面の寸法は、過去に試験的に製作したものの中で最も操作の安定性が高いものを採用しており、最適条件については追加検討が必要である。

本稿で十分に検討・確認ができていない課題として、半楕円体凹面の最適な寸法、多様な軌道での安定した操作、音響流の影響、などが挙げられる。またカメラによるフィードバック制御の導入、プロジェクションマッピングとの組み合わせなどにより、実際に利用価値のあるインタフェース構築を目指す。

謝辞 本研究は科研費 21H05301 の支援を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] H. Ishii and B. Ullmer, "Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms," In Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems, ACM, pp. 234–241, 1997.
- [2] M. Le Goc, Lawrence H. Kim, Ali Parsaei, Jean-Daniel Fekete, Pierre Dragicevic, and Sean Follmer, "Zoids: Building Blocks for Swarm User Interfaces," In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, ACM, pp. 97–109, 2016.
- [3] K. Nakagaki, J. L Tappa, Y. Zheng, J. Forman, J. Leong, S. Koenig, and H. Ishii, "(Dis)Appearables: A Concept and Method for Actuated Tangible UIs to Appear and Disappear based on Stages," In Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing System, ACM, Article 506, pp. 1–13, 2022.
- [4] G. Pangaro, D. Maynes-Aminzade, and H. Ishii, "The actuated workbench: computer-controlled actuation in tabletop tangible interfaces," In Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM, pp. 181–190, 2002.
- [5] R. Suzuki, J. Kato, M. D. Gross, and T. Yeh, "Reactile: Programming Swarm User Interfaces through Direct Physical Manipulation," In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, Paper 199, pp. 1–13, 2018.
- [6] S. Suzuki, S. Inoue, M. Fujiwara, Y. Makino and H. Shinoda, "AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display," in IEEE Transactions on Haptics, vol.14, no.4, pp.740-749, 2021,
- [7] Y. Ochiai, T. Hoshi, and J. Rekimoto, "Pixie dust: graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field," ACM Transactions on Graphics, Vol. 33, Issue 4, Article 85, pp. 1-13, 2014.
- [8] T. Furumoto, T. Kasai, M. Fujiwara, Y. Makino, and H. Shinoda, "Midair Balloon Interface: A Soft and Lightweight Midair Object for Proximate Interactions," In The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '21), ACM, pp. 783–795, 2021.
- [9] M. Marshall, T. Carter, J. Alexander, and S. Subramanian, "Ultra-tangibles: creating movable tangible objects on interactive tables," In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp. 2185–2188, 2012.