

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18813

研究課題名（和文）完全非接触で微小物体をピックアップする新技術～空中音響ピンセットへの挑戦～

研究課題名（英文）New Technology for Completely Non-contact Pickup of Small Object: Challenge to mid-air acoustic tweezers

研究代表者

大久保 寛（OKUBO, KAN）

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：90336446

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではこの空中音響ピンセットのロバスト性を向上させる．実用化へ至るための要素技術として，アレイ処理とリアルタイム適応位相振幅制御を組み合わせることで，空中音響ピンセットを深化させる．位相・振幅制御と安定した増幅が可能なシステムをコンパクトに実装した．小規模化・最適化により使用する電流が少なくなった．電源供給はモバイルバッテリーを2つ使うことで，システムを商用電源から切り離れた．すなわち，コンパクト空中音響ピンセットはオフグリッド化に成功し，システムのウェアラブル化の可能性を示した．

研究成果の学術的意義や社会的意義

空中における非接触操作の検討は工学，薬学，化学などの分野で有用である．非対向型超音波振動子アレイを用いることで，ロボットアームなどのメカニカルアームの先端に取り付けることも可能となる．超音波振動子アレイを用いた空中音響制御技術への貢献がある．

研究成果の概要（英文）：This research aims to improve the robustness of the mid-air acoustic tweezers. The gadget will be deepened by combining array processing and real-time adaptive phase and amplitude control as elemental technologies to reach practical application. A compact system with phase and amplitude control and stable amplification is implemented. The current used is reduced due to the small size and optimization. The power supply is provided by two mobile batteries, thus decoupling the system from the commercial power supply. In other words, the compact mid-air acoustic tweezers have successfully gone off-grid, demonstrating the system's potential for wearability.

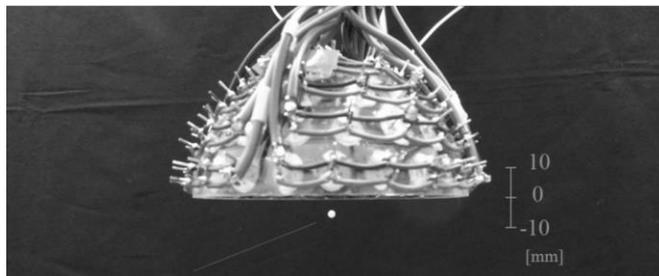
研究分野：計測工学

キーワード：空中音響ピンセット 音場制御 非接触 最適化

様式 C-19、F-19-1 (共通)

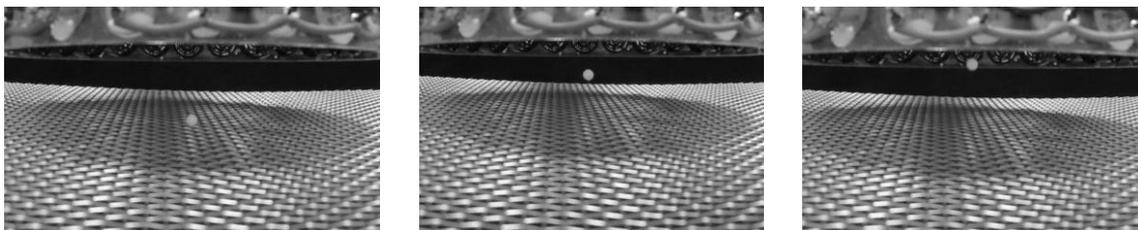
1. 研究開始当初の背景

音響放射力と呼ばれる“音波による力”（音波が異なる媒質間を伝搬するときに発生する物体を押しやるような準直流的な力）に注目した研究は古くから行われ、様々な応用が期待されている。音響放射力の利点は物理的な接触なく物体に力を与えられることである。例えば、図のように音波の力で、物体を空中にトラップし、操作することができる。



我々の研究グループでは、超音波振動子アレイに位相振幅制御を適用し、空中音響放射力を用いて非接触でピンセットのように選択的に微小物体を拾い上げ、空中に捕捉することが可能なシステム（空中音響ピンセット）を提案・試作した。

その特徴は、1) 非対向型超音波振動子アレイと位相振幅制御を用いて、2) 完全非接触で選択的に物体を拾い上げるという点である。以下、完全非接触で物体が拾い上げられる様子を示す。



超音波振動子アレイによる研究は、近年では初歩的なアレイ作製キットが販売されていることもあり、玉石混交に複数の報告が行われている。

しかし、国内外を見たときに、独自の形状や特徴的な信号制御法を導入した超音波振動子アレイによる空中音響浮揚の先進的な研究は、いくつかの研究グループでのみ実施されている。非対向型アレイによる物体浮揚については実装されているが、完全非接触で微小物体を拾い上げる技術については未実装であり、操作を行う際には、スポイトや金属製や樹脂製のピンセットなどを用いてトラップポイントにまで物体を運ぶ必要がある。すなわち、音響放射力で選択的に物体を空中に捕捉するためには初期動作して、接触操作が発生している。

2. 研究の目的

現時点では空中音響ピンセットの実現可能性は示したものの、テーブル（ステージ）の特性によっては再現性高くロバストにピックアップすることは容易ではなく、この課題を克服するために、より綿密かつより高速な位相振幅制御技術が必要不可欠である。

そこで、我々の研究グループは、非対向型アレイを用いて、アレイ入力を多チャンネル化し、入力信号の振幅位相を制御することで、反射率の高いステージや金属面からも完全非接触で物体をピックアップできることを示し、その最適化を検討する。また、実用化に向けた小型の検討を実施する。

以上を踏まえ、本研究ではこの新技術『空中音響ピンセット』のロバスト性を向上させ、実用化へ至るための要素技術として、アレイ処理とリアルタイム適応位相振幅制御を組み合わせることで、空中音響ピンセットを深化させる。

3. 研究の方法

本研究課題において最重要なのは、最適化位相振幅制御技術とアレイの最適レイアウト。

・安定したピックアップのために、近接音場のための位相振幅制御技術をベースにさらに、振動子アレイの分割化・安定化・高速化の検討。

トランスデューサレイアウトや電子回路など実機の一部を改良。

さらに、最適化を検討。再現性の向上。

完全非接触空中音響ピンセットを実装、応答性・ロバスト性を評価。

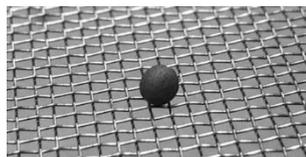
更なる振動子の最適な分割化や簡素化を検討。

本研究の主要なアイデアとしては、高速位相制御と分割化・スパース化によるアレイのレイアウト

ト最適化となる。

4. 研究成果

本研究では、超音波トランスデューサとして、MA40S4S (@Murata) を利用した。浮揚物体としては、直径約 3mm ポリスチレン球を用いた。

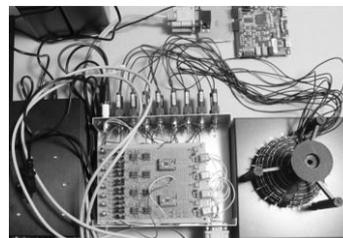
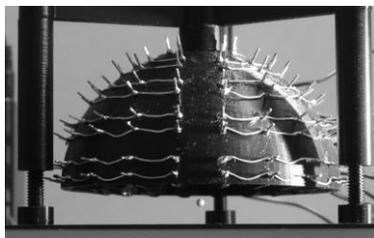
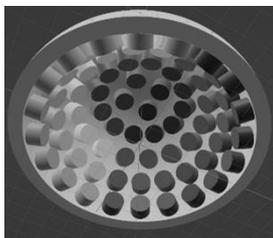


音響浮揚は、音響放射力により、物体が音波と相互作用する際にその表面に作用する圧力の差によって生成される。一般に、音波の振幅が大きいほど、音響放射力は大きくなる。超音波トランスデューサの各チャンネルの位相と振幅を適応的に調整し、半球形アレイの幾何学的対称性を利用して音波を中心軸の任意の位置に集束させることで限られたチャンネルだけで小さな物体の位置を変えることが可能になる。

これを実現するには、各チャンネルの位相と振幅を精密に最適化して、小さな物体を捕捉する位置での音場を再現する必要がある。

例として示す空中音響ピンセット・システムは、コントローラー、アンプ、電源、トランスデューサアレイから構成される。コントローラーは信号の位相と振幅を制御し、アンプは入力信号を増幅して出力電流を供給する。位相制御には FPGA を用いて、複数の信号を並列に出力することに優れている。この研究では、FPGA Xilinx ZYNQ-7010 を搭載した FPGA 評価ボード DIGILENT ZYBO Z7-10 をコントローラーとして使用している。信号の振幅制御は FPGA とデジタルポテンシオメータ Analog Devices AD5262 (B20k Ω) を用いる。

空中音響ピンセットは、72 個の超音波トランスデューサ (MA40S4S) からなる半球形アレイで構成される。数値シミュレーションから予測される、浮揚アレイの必要な最小チャンネル数は 4 つであり、この場合、72 個の超音波トランスデューサを使用する。この半球形アレイは、3D-CAD ソフトウェアを使用して設計し、3D プリンタを使用して製作される。



実験的なセットアップでは、小さな物体がまずリフレクターの近くに捕捉される。空中音響ピンセットは、その開口部がリフレクターに平行な位置に配置され、直接焦点位置の真下に小さな物体を捕らえることができる。物体は徐々に上昇し、焦点位置で停止する。

位相・振幅制御と安定した増幅が可能なシステムを実装することで、コンパクトに仕上げている。小規模化・最適化により使用する電流が少なくなり、電源供給はモバイルバッテリーを 2 つ使うことで、システムを商用電源から切り離し、すなわち、コンパクト空中音響ピンセットはオフグリッド化に成功し、システムのウェアラブル化の可能性を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 依田 一成、大久保 寛	4. 巻 44
2. 論文標題 3P4-9 フィルム型パラメトリックスピーカのアレイ化による指向性制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 218～
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24492/use.44.0_3P4-9	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 横山 裕正、大久保 寛	4. 巻 44
2. 論文標題 3P4-8 バッテリー駆動化による小型空中音響ピンセットシステムの実装	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 217～
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24492/use.44.0_3P4-8	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 横幕 実優、大久保 寛	4. 巻 44
2. 論文標題 3P2-6 マイクロフォンの非線形応答解析と差音計測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 188～
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24492/use.44.0_3P2-6	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kondo Shota, Okubo Kan	4. 巻 61
2. 論文標題 Improved mid-air acoustic tweezers using adaptive phase and amplitude control	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG8004～SG8004
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac51c4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Otsuka Hideto, Okubo Kan	4. 巻 61
2. 論文標題 Non-contact identification of moisture content of fabric based on analysis of broadband acoustic signals using multiple-frequency air ultrasonic transducer system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG8003 ~ SG8003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac51c3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto Kyoka, Okubo Kan	4. 巻 61
2. 論文標題 Arrangement design for horizontally omnidirectional audible sound source using facing ultrasonic transducer arrays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1028 ~ SG1028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4c09	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 横山裕正, 大久保寛
2. 発表標題 直感操作型ウェアラブル音響浮揚デバイス: 完全非接触小型空中音響トングの実装
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 横山裕正, 大久保寛
2. 発表標題 ポータブルオーディオプレーヤーを用いた小型音響浮揚デバイスの実装
3. 学会等名 日本音響学会第150回(2023年秋季)研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Iihoshi Yohei, Okubo Kan
2. 発表標題 Pilot Study on Aerial Wireless Superdirectional Sound Sources Utilizing Parametric Array Loudspeakers via Local 5G Networks
3. 学会等名 ISAP2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------