

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01458

研究課題名(和文)超音波駆動音響流による高時空間分解能空中流れ制御

研究課題名(英文)Midair Flow Control with High Spatiotemporal Resolution based on
Ultrasound-Driven Streaming

研究代表者

長谷川 圭介 (Hasegawa, Keisuke)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：20733108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,350,000円

研究成果の概要(和文)：研究成果は以下の3つに大別される。

(1) 所望の音響インテンシティ場の実現：音響インテンシティの空間分布を空間中の対象領域内において所望のものとなるべく近いものとなるようにする「所望の気流を実現する体積力決定問題」の解法を与えた。(2) 曲線状の音響ビームの生成およびこれに伴って発生する流れの確認：「曲線に沿って並ぶ焦点」を空間的に生成することによって曲線ビームおよび対応する流れの生成に成功した。(3) 二進M系列パターン投影によるマイクロホン自己定位への音場設計法の応用：2値M系列状の超音波振幅空間パターン走査によるモノラルマイクロホンの受信振幅パターンからmm単位の精度での自己定位を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のファンやジェットで実現するものよりも時空間的な自由度の高い流れを設計し、音響流を用いることで初めて生成可能な性質の気流の実現および新たな応用提案をおこなうことにより、ヒトの生活空間における空気制御の有力な手法としての音響流の利用をこれまでよりも説得力のある形で示すことができた。同時に、「目的に応じた時空間分布を持つ超音波音場(構造化超音波音場)」の新しい用途としてモノラルマイクロホンの非同期自己定位などの可能性を示し、生活空間における超音波の利用についても併せて新しい応用シナリオを提示できた。

研究成果の概要(英文)：The main results of this research are summarized into the three following topics. (1) A construction method of acoustic intensity field that corresponds to acoustic streaming field to generate is established by means of continuous optimization of amplitude distribution with a proper regularization. (2) An arc-shaped intense ultrasound beam is generated by creating series of congregative ultrasound foci that forms the beam. It is verified that the acceleration of air is done in direction of the beam tangent at each line segment of the beam. (3) Binary M-sequence pattern of ultrasound amplitude is generated in the workspace to enable a single monoaural microphone to estimate its self-position. In this framework, the amplitude pattern is spatially scanned so that the microphone position can be retrieved using amplitude signal received by the microphone as a position-dependent positional clue.

研究分野：超音波工学

キーワード：非線形音響現象 収束超音波 音響流 気流制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ヒトが存在する空間中の気流の制御については、基本的にはジェット(噴流)およびファンなどによる大まかな時空間分解能によるものにとどまっております、遠隔で空中の任意の位置に高速応答性および高い空間分解能を備えた気流制御の可能性については実現可能な研究対象として捉えられることがなかった。この状況に対し、研究代表者は収束空中超音波による音響流現象を用いた遠隔気流発生原理に基づき、過去の課題においては直線状の流れを用いることによる空中匂い輸送の研究に従事した。収束超音波は空中超音波の放射振動子を多数配列した「空中超音波フェーズドアレー」によって発生させた。ただし、空中音響流発生の事例は研究開始当初においては極めて数が少なく、実用的な工学技術基盤としての広い認知にはまだ遠い状況であった。

2. 研究の目的

この状況を鑑み、より時空間的な自由度の高い流れを設計し、音響流を用いることで初めて生成可能な性質の気流の実現および新たな応用提案をおこなうことにより、ヒトの生活空間における空気制御の有力な手法としての音響流の利用をより説得力のあるものにするを本研究の目的とした。より具体的には、従来の直線流れとは異なり、曲線状に障害物をよけて進む流れなどの生成を想定し、これを生成したい流れをまず定め、これを生成する局所的な三次元加速度の時空間分布としての音場を設計・生成するといういわゆる逆問題的な方略により実現する方法の確立を目的とした。

3. 研究の方法

上述の逆問題は、実現すべき流れに対応した放射振動子の駆動振幅・駆動位相を求める問題を定式化し、その解法を求めることに帰着される。流れと振動子の駆動信号との関係を表す音響流の物理モデルに従った音響的なパワーの空間分布の設計法の確立および、手法の妥当性の数値シミュレーション並びに実環境実験による確認を基本的な研究の手法とした。

音響流は従来、その場の音響パワーに比例した音響駆動力場によって発生する空気の流れとしてモデリングされる。しかしながらこのモデルに基づいた空中超音波による流れの発生の解析は事例が少なく、さらにこれを用いた流れの「設計」については直接的な先行研究が見当たらない。流体现象は本質的に非線形を伴うことからこのモデルが必ずしも現象を正確に表現するとは限らないため、実際は必ずしもモデルに基づいた設計に限定されない実験的な流れの設計についても併せて行った。

4. 研究成果

本研究における成果は以下の3つに大別される。

(1) 所望の音響インテンシティ場の実現

上述の方略に基づいた音響駆動場の設計において重要な点は、振幅ではなく音響インテンシティの空間分布を空間中の対象領域 (region of interest: ROI) 内において所望のものとなるべく近いものとなるようにすることが目的となる点にある。ROI 内の離散的な振幅分布と各振動子の出力複素振幅の集合は ROI および振動子位置の関係で定まるリードフィールド行列によって線形代数的な関係で結び付けられる。よって、適切な振動子出力を求める問題は与えられた振幅分布並びにリードフィールド行列についてこの関係をなるべく満たすような素子振幅を求める問題であり、一般には適切な正則化のもとでの最小二乗解を求めることがなされる。しかしながら、この方法で求められる素子振幅は与えられた複素振幅を位相も含めて実現するものであり、位相とは関係のない量である音響インテンシティの分布を生成する際には過剰な拘束のもとで問題を解いていることになる。このため、有限個の振動子を用いて少ない誤差で所望の音場を生成することのできる ROI の大きさが小さくなる問題がある。

この解決のために、研究代表者は対象音場の振幅絶対値の2乗を連続最適化する問題を代わりに設定し、L2 ノルムによる適切な大きさの正則化を加えて解くことにより、ROI 外への超音波放射を抑えつつ ROI 内の音響パワー分布を所望のものにできることを明らかにした。反復位相最適化に基づいた従来法と比較して、ROI の縁における意図しない振幅減衰を抑えられることを明らかにした。

(2) 曲線状の音響ビームの生成およびこれに伴って発生する流れの確認

上記の代数的最適化とは異なり、幾何学的に収束超音波線素を多数構成し、これらにより音響インテンシティの曲線を空中に生成することにより、曲線状の細い流れを構成することを目指した。曲線状の流れは空間内の障害物をよけて進むなど、従来のファンやジェットに基づく手法では実現不可能な応用上望ましい性質を持つ。

生成対象の曲線の線素とフェーズドアレーの列または行を対応付け、「曲線に沿って並ぶ焦点」を空間的に生成することによって曲線ビームの生成に成功した。このビームに沿って音響インテンシティが生成することを数値的に確認し、ビームに沿った流れは実験的に確認できた(図

1) しながら、この流れはビーム上の各地点においてはビーム接線方向を向いているものの、一本のきれいな曲線状の連続した流れとして安定して観察されてはならず、当初の目標を完全に達成しておらず課題が残った。

(3) 二進 M 系列パターン投影によるマイクロホン自己定位への音場設計法の応用

(1) の結果を音響流生成とは異なる実用システムである、単一マイクロホンの非同期自己定位の原理に適用した。デバイスに搭載したマイクロホンの自己定位はいわゆる IoT の文脈な d における広範な応用が見込まれる基礎的な問題であるが、従来手法の多くは複数のマイクロホンの受信信号の位相差に基づくか、複数の音源が区別できる形で音波を放射し、やはりそれらの受信信号の位相差に基づいた定位を行うことがほとんどである。両者の手法には複数の信号間の時間相関を高時間分解能で求める処理が必要であるという共通点があり、また前者の手法は複数のマイクロホンの搭載を前提とすることから、小型のデバイスにおける実用的な自己定位手法としてそのまま適用されるには課題が残る。

本研究では 2 値 M 系列状の超音波振幅空間パターンを ROI 内に投影し、これを水平に走査することによってモノラルマイクロホンが受信振幅パターンと既知の M 系列との時間相関をとることにより mm 単位の精度で自己定位を可能にする手法を提案し、実環境実験でその有効性を実証した(図 2)。この時間相関は波形そのものの時間相関とは異なり、音速より遅い任意の時間幅における受信振幅の時間変化についてごく短い時間で計算すればよく、かつ信号同士的时间同期が不要であるため、小型デバイスにおける実時間応用に向けた自己定位技術となっている。

終わりに、上述の成果および他の実験的検討によって得られた今後の研究の推進方策についての示唆について簡潔に述べる。(1) の方略で求めた体積力場を実現することで直ちに目標の流れ場を実現することは必ずしも可能でないことを数値実験、および実環境実験で確かめた。これは音響流の支配方程式における非線形性によるものであることも同時に確認し、ある境界条件の下での定常流れ場とそれを実現する体積駆動力の関係を支配方程式のみから求めても、いわゆる「ストークス近似」の成立する状況下を除いては安定した解を与える保証がないことが見積もられた。これは当初想定していた逆問題的アプローチを支配方程式に適用するのみでなく、生じる流れ場の物理的な実現可能性などを評価する指標を新たに取り入れ、これによって最終的に実現する流れ場を選定するという前処理などが必要になることを示す結果であった。今後も流れ場制御の研究は継続する予定であり、今回の研究で得た知見をもとに多様な流れの実現を目指す。

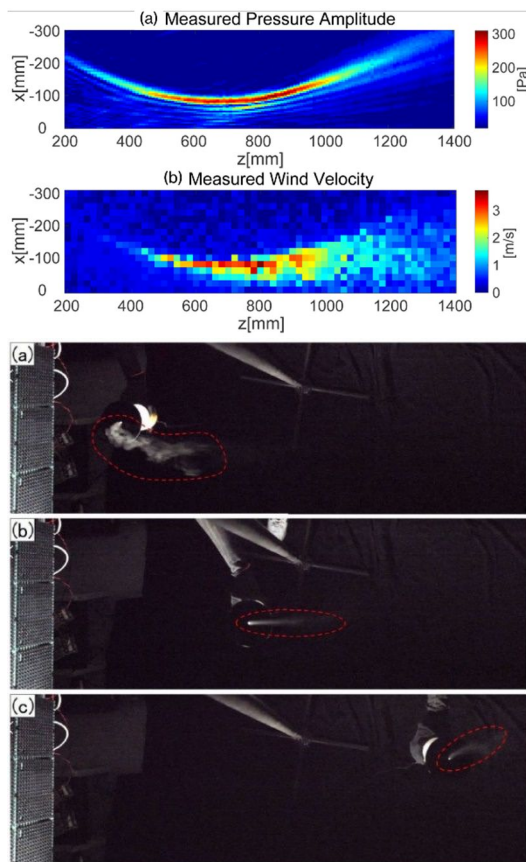


図 1：曲線ビームにおける超音波音圧分布(上図(a))並びに風速分布(上図(b))、ミストで可視化した実際の流れ(ミスト発生器位置に応じ下図(a)-(c))

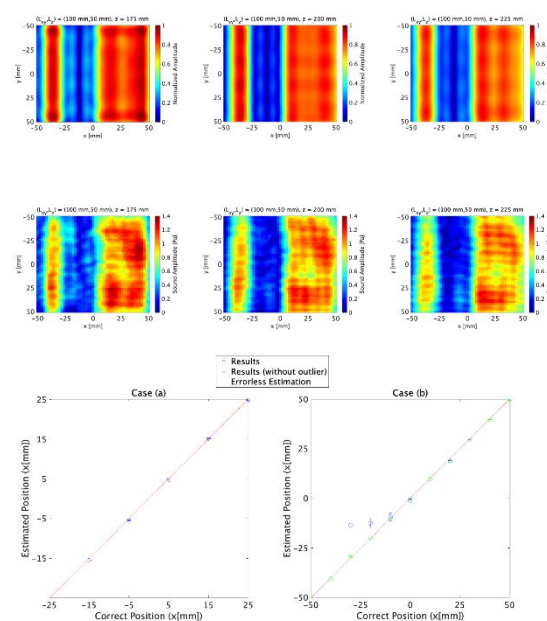


図 2：異なるアレー-マイク間距離における生成した 2 値 M 系列音圧パターンの例(上図上段：数値シミュレーション、上図下段：実環境計測)および定位結果(下図左：50mm 幅ワークスペースにおける結果、下図右：100mm 幅ワークスペースにおける結果)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 Hasegawa Keisuke, Shinoda Hiroyuki, Nara Takaaki	4. 巻 127
2. 論文標題 Volumetric acoustic holography and its application to self-positioning by single channel measurement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 244904 ~ 244904
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0007706	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 Hasegawa Keisuke, Yuki Hiroki, Shinoda Hiroyuki	4. 巻 125
2. 論文標題 Curved acceleration path of ultrasound-driven air flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 054902 ~ 054902
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5052423	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 Mukai Honoka, Hasegawa Keisuke, Nara Takaaki	4. 巻 150
2. 論文標題 Sequential structured volumetric ultrasound holography for self-positioning using monaural recording	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of the Acoustical Society of America	6. 最初と最後の頁 4178 ~ 4190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/10.0007464	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 3件）

1. 発表者名 Keisuke Hasegawa
2. 発表標題 Indoor Self Localization of a Single Microphone based on Asynchronous Scanning of Modulated Bessel Beams
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Hasegawa, Takaaki Nara
2. 発表標題 Self-Localization of Single Microphone from Ultrasound Field Generated by Sources with Subwavelength Displacement
3. 学会等名 IEEE IUS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Hasegawa
2. 発表標題 Single Microphone Positioning Based on Angular Scanning of Acoustic Bessel Beam from Symmetric Ultrasound Emission
3. 学会等名 IMEKO 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------