

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05316

研究課題名(和文)音響流制御によるパーソナルな匂い環境の提示

研究課題名(英文)Personal Olfactory Environment by Controlled Acoustic Streamings

研究代表者

長谷川 圭介 (Hasegawa, Keisuke)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任助教

研究者番号：20733108

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究において、位置と方向を電子的に制御可能な直線形状の超音波ビームである音響ベッセルビームを用いて超音波音源の1m程度遠方において直径数10mm程度の断面積を持つ、位置、方向を制御可能な流れを開放空間において生成することに成功した。この基盤技術に基づき、環境中に配した匂いを超音波駆動気流によってユーザの鼻腔まで輸送することで当初の目的であった遠隔匂い提示を達成した。近接して配置された複数の匂い源が存在する場合、そのうちの任意の一つのみを選択的にユーザに提示することが可能であること、画像による顔トラッキングと組み合わせることで運動するユーザの顔に追従する匂い提示を実現できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in generating a narrow, straight and steerable airflow that is accompanied with ultrasound Bessel beam emitted from a phased array of ultrasound transducers. The cross-sectional area of the flow was observed to be almost comparable to several times of the ultrasound wavelength. Based on this technique, we achieved remote fragrance presentation to a specific user in a personalized fashion, where the scent was transported from the scent source to the user's nostril via the ultrasound-driven airflows. We also demonstrated that selective transportation of a specific kind of scent out of several sources located close to one another was also possible by our technique. We created a system that offered face-tracking scent that targeted freely moving users wearing no devices.

研究分野：応用物理学

キーワード：音響流 非線形音響 匂い提示 超音波

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの感覚器官を対象とした情報提示はこれまで多くの部分を視聴覚的な手法が担っており、これに続いて触覚情報提示が近年少しずつ広がりを見せているというのが現状であった。一方で、嗅覚がヒトにもたらす効果および応用の可能性は非常に幅広いにもかかわらず関連する情報提示技術の進展は遅れている。

視聴覚および触覚に関しては特定のユーザーのみを対象とした刺激提示が比較的容易であり、ゆえに広く実用されていると考えられる。一方で、装着型のデバイスにより匂いを提示する手法は存在するが、デバイスへの匂い物質の充填、封止および適時匂いを提示する機構などを搭載するため、可搬性のあるシステムとすることは現状では難しい。

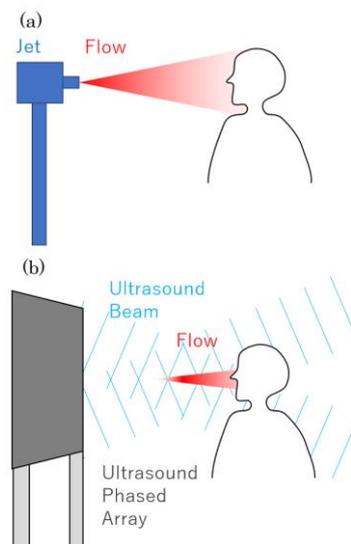
この問題を解決するため、我々は空中で匂いを遠隔輸送する方略を考えた。しかしながら一般に匂いは空気中を漂う物質によって伝達されるために通常のファンやブロウを用いた気流によって運搬する際には拡散を免れず、目的としないユーザーに匂いを提示してしまう。この問題を解決するために匂い物質を含んだ渦輪をユーザーに発射する手法が提案されており、一定の効果をあげている。

上述の渦輪ベースの手法においては移動するユーザーに対しての匂いの提示の際には渦輪発射ノズルを機械的に動かす必要があるための大掛かりな機構を必要とする、遠くまで届く渦輪を作るためには渦輪の半径を大きくせざるを得ず、結果としてパーソナルな匂い提示の達成は近距離に限られるといった原理的な制限があった。また、匂いのソースは装置の内部に配置しなければならないため、システムの用途はあらかじめ用意した匂いの提示に限定される。

これに対し我々はすでに環境中に置かれた物体の発する匂いを超音波駆動気流を利用して任意の位置まで空中輸送するという方略でデバイスレスかつパーソナルな匂い提示の実現を考えた。音響流は超音波の伝播に伴って発生する気流であり、音場の存在下での体積当たりの駆動力は正弦波音源からの音響パワーに比例することが知られている。十分な開口の音源を用いることで、音響パワーは空間的には音源からの距離によらず波長程度まで絞ることが可能である。すなわち、空間内の任意の位置に細い断面積の流れを自在に作る事が原理的に可能である(図1)。この流れを用いて匂いを特定の箇所に空中輸送することを目指した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は「空中超音波音場を生成し、これによって発生する音響流で環境中の匂いを特定のユーザーの鼻腔まで空中輸送する」ことを可能とする技術の確立である。より具体的な目的として、以下を設定した。



(図1) 通常の流れ（上図）と超音波駆動音響流（下図）。

### (1) 匂いを空中輸送する狭い断面積の流れを実現する音場の設計

音場の生成はここに出力波形が制御可能な多数の超音波振動子を搭載した「超音波フェーズドアレー」によって行った。特定のユーザーのみに匂いを輸送するためには空間的に局在した流れが必要であり、これには空間的に局在した音響パワーの場を生成する必要がある。どのような形状の音場が実現可能であるか、これを実現するためには各振動子の駆動波形はどうであるべきか、について理論的に決定することを目的とした。

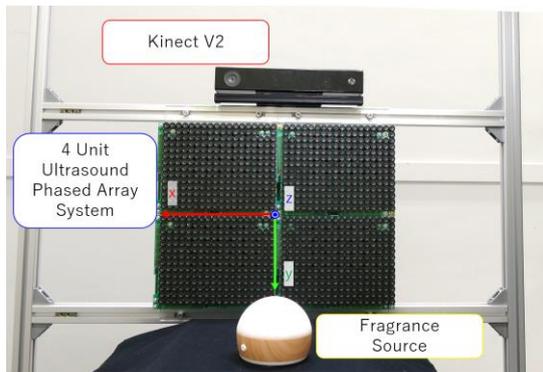
### (2) ヒトを対象とした匂い提示システムの作製

設計した流れを用いた場合、これが実際にユーザーに匂いを運ぶことができるかについて、実際にプロトタイプシステムを作成し、時間遅れやワークスペースの観点で評価を行った。プロトタイプシステムには画像による顔トラッキング機能を搭載し、電子的にフェーズドアレーの出力波形を切り替えることにより音場を時々刻々と変化させ、ユーザーの顔を追従する匂い付きの気流の実現を目指した。

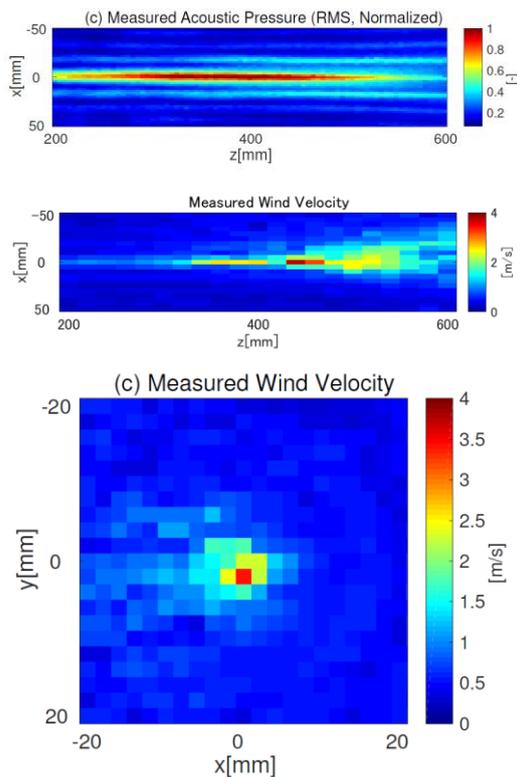
## 3. 研究の方法

(1)については、フェーズドアレーの各振動子の出力波形の位相及び振幅を決定した際それがどのような音場を作るかを数値シミュレーションで確認しながら音場の設計を行った。その後、実際に生成された音場および音響流の流速分布について、先端にマイクロホンおよび流速計を搭載したロボットアームによりスキャンすることによって計測をおこなった。また、生成する音場に応じて気流の方向が変化した際の効果も実験的に確認した。

(2)については、アルミフレーム管体に超音波フェーズドアレー及び顔トラッキング



(図 2) 制作したプロトタイプシステム。

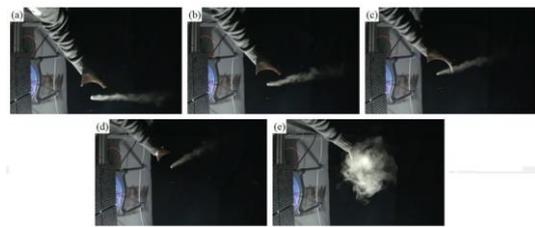


(図 3) 計測した音響パワー分布（上図）、流速分布（中図）、 $z=400\text{mm}$ における流速分布（下図）。 $z$ 軸はビームの伝播方向。

のためのセンサ Kinect V2 を固定し、さらにフェーズドアレーの先に匂い源としてアロマディフューザーを配置することによりプロトタイプを作成した(図 2)。ユーザーの顔の位置と匂い源を結ぶ直進流れを生成することにより、任意の位置のユーザーに匂いを遠隔提示する。

#### 4. 研究成果

直進する非回折ビームとして知られるベッセルビームを生成することにより狭い断面の流れを実現できることを示した。これ

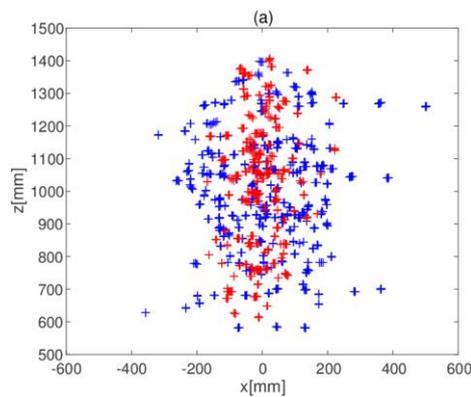


(図 4) ビームを傾けた場合の流れの方向の変化をミストによって可視化。(a)~(d)がそれぞれ  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$  の角度をつけた場合に対応、(e)はビームを放射しない場合。

は円錐状の波面を持つビームであり、開口が十分に大きければ波長程度の断面積の領域にパワーの大部分を収束させることができる。超音波フェーズドアレーの素子の発振周波数は  $40\text{kHz}$  であり、これに対応する波長は  $8.5\text{mm}$  である。実際に音響パワーおよび流速分布を計測すると、フェーズドアレーから  $40\text{cm}$  離れた地点において  $10\text{mm}$  程度の断面積に音響パワーおよび流速の大きな部分が集中していることが確認された(図 3)。また、円錐波面を傾けることでビームの伝播方向および流れの方向も傾けることができることを示した(図 4)。これらの結果は応用物理の国際的な論文誌である Applied Physics Letters に掲載され、当該集の Editor's Picks に選出された。

匂い提示システムのプロトタイプについて、基本的な性能評価を行った。まず、伝播方向を固定した直進流が匂いを空中輸送する際に、それが十分に特定のユーザーのみに匂いを提示できているかについて実験的に評価したところ、匂い源から  $1\text{m}$  程度離れた地点において直径  $20\text{cm}$  程度の領域に匂いが局在していることがわかった。続いて、ユーザーが運動した場合にこれを追従するビームによりユーザーをトラッキングする匂いについて、ワークスペースの広さを評価した。結果として、幅  $40\sim 50\text{cm}$  程度の領域においてユーザーが匂いを感じることができるとわかった(図 5)。また、システムの時間遅れについては、発生する気流が最大でも  $3\text{m/s}$  程度であること、ビームの形成は瞬間的に行われるが流れが最高速度に達するまでには数秒かかることが分かった。これらのシステムは国内外 (デジタルコンテンツエキスポ 2017, SIGGRAPH ASIA 2017) でデモを行い好評を得たほか、VR 関連の主要国際会議 IEEE VR での学会発表を行ったものが IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 誌の Special Issue として採録されるなど、新技術として注目されつつある。

現状のシステムでは提案原理に基づいてパーソナルな匂い提示を達成することは可



(図 5) ユーザーが匂いを感じた地点の散布図。x 軸は水平方向、z 軸は奥行き方向。Z=350mm の地点に匂い源を配置。赤点は z 軸と重なるビームを位置、方向固定で放射した際の匂いを感じた地点。青点はビームのトラッキングを行った際に匂いを感じた地点。

能であると結論付けられると考える。一方で、空気砲を用いた手法などに比べ、現状のシステムのセットアップではワークスペース、局在性および時間的な遅れについて明らかな優位性を主張できるほどの性能を達成できたとはいえない。これは今後、アレーの開口を大きくする、より匂いの空中運搬に適した音場を設計するなどの技術的な課題を克服することで、瞬間的に局在化した加速度分布を生成可能であるという超音波駆動流れの原理的な特徴を最大限に生かした形で達成されることを引き続き目指す。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. Keisuke Hasegawa, Liwei Qiu, Hiroyuki Shinoda, “Midair Ultrasound Fragrance Rendering,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 24, no. 4, pp. 1477-1485, April 2018, [doi:10.1109/TVCG.2018.2794118](https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794118) (査読有、IEEE VR 2018 で口頭発表したものが論文誌に採録。当該発表は下の学会発表には含めず。)
2. Keisuke Hasegawa, Liwei Qiu, Akihito Noda, Seki Inoue, Hiroyuki Shinoda, “Electronically Steerable Ultrasound-Driven Narrow and Long Air Stream”, Applied Physics Letters, 111, 064104 (2017);

[doi:10.1063/1.4985159](https://doi.org/10.1063/1.4985159) (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

1. Mitsuru Nakajima, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda: Remotely Displaying Cooling Sensation via Ultrasound-Driven Air Flow, IEEE Haptics Symposium 2018, Oral Session 7B (Technical Papers), 25-28 March, San Francisco, California, USA, 2018. (査読有)
2. 長谷川圭介, 仇力維, 篠田裕之, “超音波駆動音響流による匂い環境制御,” 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 1781-1784, 仙台, 12/20-12/22, 2017. (査読無)
3. 中島 允, 長谷川圭介, 牧野 泰才, 篠田 裕之, “音響ビームによる任意方向への冷気の誘導に基づく遠隔冷覚提示,” 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 1996-1997, 仙台, Dec. 20-22, 2017. (査読無)
4. K. Hasegawa, L. Qiu, and H. Shinoda. Interactive midair odor control via ultrasound-driven air flow, In SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies, SA '17, pp. 8:1-8:2, Bangkok, Thailand, Nov. 27-30, 2017. (査読有、デモ発表)
5. 中島 允, 長谷川圭介, 牧野泰才, 篠田裕之, “音響流ベッセルビームを用いた遠隔冷覚提示,” 第 22 回バーチャルリアリティ学会大会, 1D3-03, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島, Sep 27-29, 2017. (査読無)
6. Qiu Liwei, Keisuke Hasegawa, Yasutoshi Makino, Hiroyuki Shinoda: “Simulation of Acoustic Streaming for Odorant Display Controlled by Airborne Ultrasound”, Proc. SICE Annual Conference 2016, pp.1228-1233, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, September 20-23, 2016. (査読有)
7. Qiu Liwei, 長谷川圭介, 牧野泰才, 篠田裕之, “空中匂い分布制御に向けた音響流の数値シミュレーション”第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 12B-04, つくば国際会議場, つくば, Sep 14-16, 2016. (査読無)

8. 長谷川 圭介, 牧野 泰才, 篠田 裕之:  
音響ベッセルビームによる匂いの空間  
分布制御の基礎的検討, 第20回日本バ  
ーチャルリアリティ学会論文集,  
pp.62-63, 芝浦工業大学, 東京都江東  
区豊洲, 2015/9/9-11. (査読無)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷川 圭介 (Hasegawa, Keisuke)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科  
特任助教  
研究者番号: 20733108