

空中超音波触覚ディスプレイに伴う気流の研究

Study on Airflow Accompanying Airborne Ultrasound Tactile Display

○西山 雄太 星 貴之 鳥越 一平 (熊本大)

Yuta NISHIYAMA, Takayuki HOSHI, and Ippei TORIGOE, Kumamoto University
069t3817@st.kumamoto-u.ac.jp, {star, torigoe}@kumamoto-u.ac.jp

The airflow that accompanies the tactile sensation provided by the Airborne Ultrasound Tactile Display is investigated. Due to it, some people say that they feel something like airflow although the display generates steady pressure in air. We have two ideas what causes it: One is the gradient of pressure distribution and the other is the acoustic streaming. In this paper, experiments are conducted to observe the phenomenon arises around the ultrasound beam. The airflow is visualized with smoke and also its spatial distribution is measured with a pressure sensor. As far as the results, the idea of the acoustic streaming is supported.

Key Words: Tactile display, Airborne ultrasound, Acoustic radiation pressure, Acoustic streaming

1. 緒言

近年 3D 映像技術への注目が高まっている。3D 映画が公開され、家庭用 3D テレビも発売されようとしている。また特殊な眼鏡を必要とせず、裸眼で見ることのできる 3D 映像ディスプレイの研究も行われている。このような技術によりバーチャル物体などが目の前に浮かんで見えるようになったとき、その映像に触れた感覚を人間の手にフィードバックすることができれば、現実感や操作性の向上が期待できる。

そのために利用可能な技術として、我々は空中超音波の放射圧を利用して非接触で触覚を提示する装置（空中超音波触覚ディスプレイ）の開発を進めている[1]。このデバイスを学会や展示会で実演すると、放射圧と同時に気流のような触覚も発生していると体験者からしばしば指摘される。今後リアルな触覚の再現を目指す際には、このような不要な気流を発生させないことが望まれる。

本研究では、気流の可視化および空間分布計測によりその特徴を見出し、発生原理を明らかにすることを目指す。

2. 空中超音波触覚ディスプレイ

空中超音波触覚ディスプレイ (図1) は、超音波の音響放射圧を利用して触覚を空中に提示する。音響放射圧は超音波の進行が物体によって遮られる際に物体の表面に働き、その圧力 P [Pa] は式(1)のように表される。

$$P = \alpha E = \alpha \frac{p^2}{\rho c^2} \quad (1)$$

ここで、 α は物体表面における超音波の反射特性によって決まる定数である。また、 E [J/m³] は超音波のエネルギー密度、 p [Pa] は音圧、 ρ [kg/m³] は媒質の密度、 c [m/s] は媒質中での音速である。式(1)によると、 N 個（本稿では91個）の振動子からの超音波を空中のある一点（以下、焦点と呼ぶ）に集束させて音圧を N 倍にしたとき、放射圧は 1 個の場合の N^2 倍になる。これにより、触覚として感じられる程度まで強めることができる。

3. 発生原理の仮説

気流の発生原理として、我々は次の 2 つを考えている。1 つは放射圧分布の勾配、もう 1 つは音響流[2]である。

超音波触覚ディスプレイ出力時、音響放射圧が物体表面に発生することで、焦点内部と外部の間に圧力差が生じる。そのため高圧側から低圧側へ向けて気流が発生すると考えるの

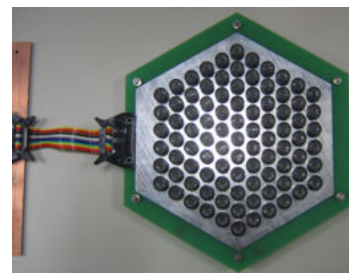


Fig. 1 Annular array of 91 ultrasound transducers.

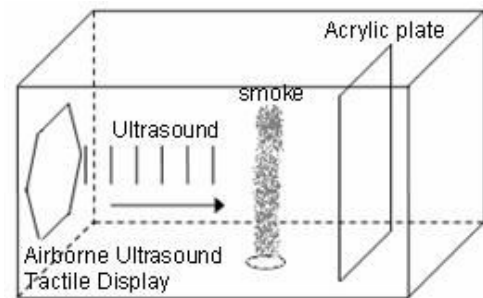


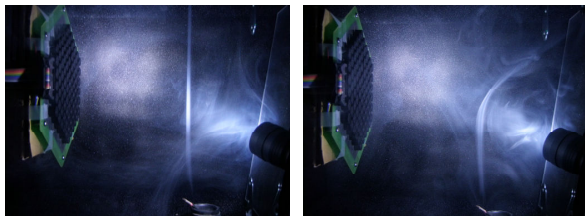
Fig. 2 Setup for visualization with smoke.

が 1 つ目の仮説である。この場合、障害物があるときに限り焦点から外側に向かって気流が生じることになる。

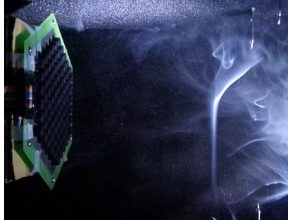
また 2 つ目の仮説である音響流とは、粘性のため超音波の進行方向に媒質流体自体の流れが生じる非線形現象である。こちらが原因である場合には、障害物が存在しないときでも焦点に向かう気流が発生する。

4. 実験 1: 煙による可視化

気流の有無を確認するため、煙を用いて空気の流れを観察した。図2は実験装置の模式図である。ディスプレイを地面向して水平方向に超音波を出力できるように設置し超音波の進行方向に線香を用いて煙を発生させる。気流が発生しているならば、煙の動きに変動が起きるはずである。外部の影響が無いように実験はアクリルケースの中で行った。アクリルケースの内壁には超音波の反射を減少させるために厚さ 30mm のスポンジを貼り付けた。超音波の進行方向にアクリル板をディスプレイと平行に設置し、超音波の進行を妨げ音響放射圧を発生させる。アクリル板は焦点の位置（ディスプレイから 200mm 離れた位置）に設置する。また、比較のためアクリル板を設置しない場合でも同じ観察を行う。



(a) Ultrasound off. (b) Ultrasound on with an obstacle.



(c) Ultrasound on without an obstacle.

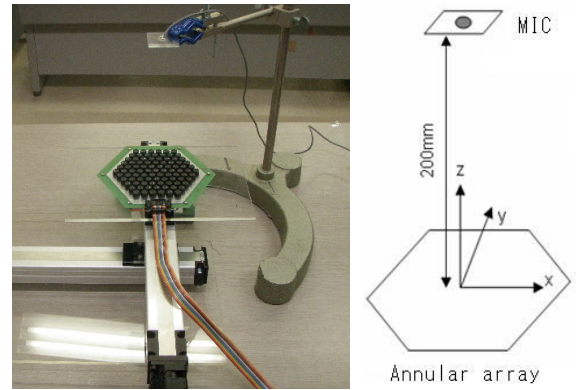
Fig. 3 Results of visualization with smoke.

結果を図 3 に示す。ディスプレイ非出力時は動かなかった煙 (図 3. (a)) が出力時には大きくゆらいだ (図 3. (b))。これにより気流の発生が確認された。また、アクリル板を設置しない場合でも同じ結果になった (図 3. (c))。アクリル板の有無に関わらず気流が発生していることから、2つ目の仮説である音響流が気流の原因ではないかと考えられる。

5. 実験 2 : 空間分布の計測

気流の発生の分布を確認するためにディスプレイ上部 200mm の圧力の分布を、コンデンサマイクロフォンを用いて二次元的に計測した。測定装置は図 4 のとおりである。コンデンサマイクロフォンはディスプレイの上部 $z = 200 \text{ mm}$ で固定したまま、ディスプレイを自動 xy ステージに乗せ動かした。ディスプレイの中心の超音波振動子の位置を原点とし図 4. (b) のように xyz 軸をとり、 $-14 \text{ mm} \leq x \leq 14 \text{ mm}$ 、 $-14 \text{ mm} \leq y \leq 14 \text{ mm}$ の間を 2mm ずつ動かし計 $15 \times 15 = 225$ 点計測した。超音波には 100Hz の変調をかけ、デジタルオシロスコープの FFT 機能を利用して 100Hz 成分の振幅を計測した。ディスプレイには常に一定振幅の信号を加えており、理想的には放射圧の振幅が変動することはないはずである。しかし、放射圧の時間変動が見られる場所があった。これは気流の発生によるものと考えられる。そのため各点 60 秒間観測し、その間の最大値と最小値を記録した。

図 5. (a) は最大値、最小値の平均値の二次元分布、図 5. (b) は最大値、最小値の差 (気流による放射圧の変動) を示したものである。最も高い強度の放射圧を 1 とするよう規格化してある。放射圧の分布は理論に近いものとなった。半値幅 8mm 程度のメインローブ (焦点) に加えて、非対称ではあるがサイドローブも見られた。気流の分布については、音響放射圧の強度が高い部分に発生している様子が見られた。また、この結果を見ると焦点以外ではサイドローブ周辺でも気流が発生していることもわかる。



(a) Photo. (b) Illustration.

Fig. 4 Setup for spatial distribution measurement.

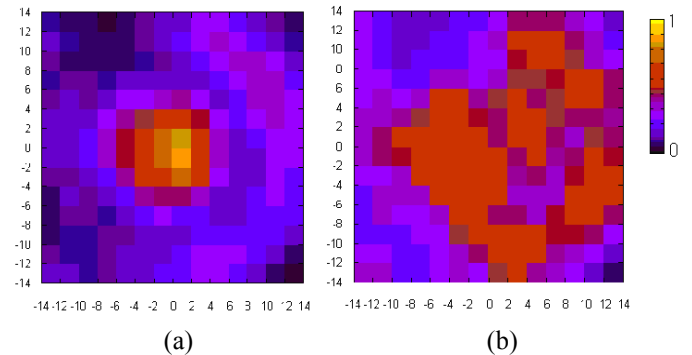


Fig. 5 Results of measurement of spatial distribution. (a) radiation pressure and (b) airflow (fluctuation of pressure).

6. 結言

本論文では、空中超音波触覚ディスプレイ出力時に発生する気流に関して研究した。まず、煙に対してディスプレイから超音波を出力することにより気流発生の有無を確認した。その結果から、気流の原因は媒質の粘性による音響流ではないかと推測された。次に、ディスプレイの焦点周りの放射圧の強度分布を調べた。また、放射圧の強度の時間変動に注目することにより気流の発生箇所の分布も調べた。放射圧の強度分布と気流発生箇所の分布を比較すると、メインローブ、サイドローブにかかわらず放射圧強度の高いところに気流が発生していることがわかった。

今後、原因に関するより詳細な検討をするとともに、触感への影響について調べる予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会・科学研究費補助金・若手研究 (スタートアップ) (21800039) の助成を受けたものである。

文献

- [1] 星貴之, 岩本貴之, 篠田裕之: 空中超音波振動子アレイによる触覚提示, Proc. ROBOMECH2009, 1A1-A14(1-4), 2009.
- [2] 三留秀人: 音響流の発生機構について, 電子情報通信学会論文誌, vol. J80-A, no. 10, pp. 1614-1620, 1997.