

空中超音波による触覚提示

○ 岩本 貴之 (東京大学)

篠田 裕之 (東京大学)

Displaying Tactile Sensation with Airborne Ultrasound

Takayuki Iwamoto (The University of Tokyo)

Hiroyuki Shinoda (The University of Tokyo)

We have proposed a method which produces high fidelity tactile stimuli using nonlinear phenomenon of ultrasound; acoustic radiation pressure. Until now, we have developed a prototype. The prototype consists of 320 PZT transducers, a water bath and an ultrasound reflective film and is able to produce 2-D patterns of radiation pressure. In this paper, we discuss the feasibility of using air as medium instead of water. One of the problems of using air as medium is low efficiency of radiation from transducers to the air. However, with adequate number of airborne ultrasound transducers, it is possible to produce sufficient intensity of radiation pressure for tactile stimulus. The design for a prototype display using airborne ultrasound is also explained.

1. はじめに

我々は、現在までに、超音波音響放射圧を利用した触覚提示法の研究を行ってきた[1]. Fig. 1 および Fig. 2 に現在までにその提示法に基づいて開発した触覚ディスプレイを示す. 従来は、音波の媒質として水または水と同等の音響的特性を持ったゲルを用いてきた. これらの媒質には、以下に挙げるような利点があった. まず、音響インピーダンスが圧電振動子と比較的近いため、放射効率がよい. また、水中では 3 MHz の超音波の波長は 0.5 mm 程度となるため、指先など触覚が鋭敏な部位への提示にも十分な解像度で圧力場を生成できる.

しかしながら、一方で、水を媒質として用いることは、実用性を考えた場合、液体であるため取り扱いがしづらく、また、水と皮膚との音響インピーダンスがほぼ等しいため、皮膚への透過を防ぐための反射膜が必要となるなどの問題もあった. 反射膜があることで、皮膚上に提示される圧力場は、本来放射圧によって生じている圧力場に空間的なローパスフィルタをかけたものになってしまう. また、皮膚が反射膜に触れていなければならない、反射膜自体の触感が、デバイスが提示する触感に影響を及ぼす.

本稿では、上記の点を改良するため、媒質として空気を用いる空中超音波による触覚提示法について提案する. 媒質に空気を用いた場合、そもそも空気と皮膚との音響インピーダンスが異なるため、音波は皮膚表面において反射をし、皮膚内部に透過をしないため、反射膜が必要ない. そのため、自由空間において、特殊な装着具を用いることなく、触覚の提示が可能である. 立体視ディスプレイや HMD による映像提示と組み合わせることで、3D 映像のインタラクティブな操作や、より臨場感の高い VR 空間の生成に効果的であると考えられる. その一方で、振動子と空気との音響インピーダンスの違いによる放射効率の低さや、空中における減衰などの問題も

あり、それらに留意する必要がある.

以下に本稿の構成を示す. 第 2 章では、提示原理について述べる. 音響放射圧について述べた後、空中超音波を用いた場合の提示力について考察する. 第 3 章においては、それらの試算に基づいて、現在製作中のデバイスの概要を示す.

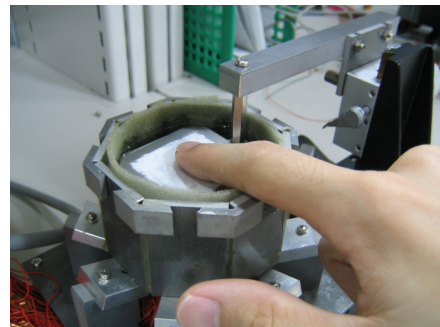


Fig. 1 2-D ultrasound tactile display we proposed in [1]. The display uses water as medium. Users put their fingers on the ultrasound reflective film.

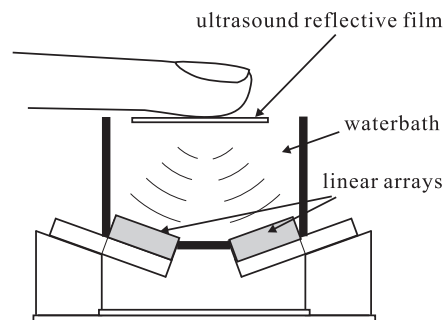


Fig. 2 Schematic drawing of 2-D ultrasound tactile display

2. 原理

超音波による音響放射圧 P [Pa]は、式(1)により与えられる[2].

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

ここで、 α は対象物体の超音波反射特性に依存する係数、 E は超音波のエネルギー密度[J/m³]、 p は音圧[Pa]、 c は媒質における音速[m/s]、 ρ は媒質の密度[kg/m³]である。式(1)にあるように、音響放射圧の強度は超音波のエネルギー密度に比例するため、超音波のエネルギー密度の時空間パターンを制御することで、提示圧力の時空間パターンを制御することが可能である。

以下では、空中超音波による提示力を試算する。試算に際してはいくつかの仮定をおいた。以下の仮定は粗いが、本試算の目的は、おおよその提示力を算出し、それが触覚提示可能な程度かどうかを示すことにある。

超音波の放射には、距離センサ等に用いる空中超音波送信用素子をアレイ状に配置して用いるものとする。 N 個の振動子から放射された超音波の位相が提示領域において揃い、単純に音圧の足し合わせが起こるといふ仮定をする。その時、式(1)の右辺は、単一の振動子によって生成される音圧を p' とすると、 $\alpha(Np')^2/c^2$ と表される。また、超音波の周波数を 40kHz とし、音速を 340 m/s とすると、波長はおおよそ 8 mm であることから、全ての振動子から放射された超音波を 1 点に集束させた場合、その集束領域は、波長を直径とする円状のおおよそ 50 mm²の領域になるものとし、その領域内において音圧は均一であるとした。

ここで、皮膚と空気の境界では全て音波が反射するものとする $\alpha=2$ である。また、一つの振動子が放射面から 300mm 離れた点において生成する音圧は実測値に基づく 20 Pa である。さらに、空気の密度 $\rho=1.2 \text{ [kg/m}^3]$ 、空気中での音速を $c = 340 \text{ m/s}$ として、100個の振動子を用いた場合に、式(1)に基づいて計算をすると、放射圧により提示領域に提示される力は 0.29 gf となる。この値は、定常的な圧覚を与えるには小さな値であるが、振動感覚を引き起こすことは可能である。また、300個程度の振動子を用いて、各振動子からの音波が理想的に集束した場合、数 g オーダーの力を発生させることができることもわかる。

3. 装置

超音波振動子アレイ基板の写真を Fig. 3 に示す。空中超音波送信用振動子（日本セラミック製、共振周波数 40kHz）を 91 個、最密配置可能な構造になっている。中心から等距離となる円周上にある振動子は並列接続し、アニュラアレイを形成している。アレイの同心円の数は 11 であり、中央のひとつの振動子の分と合わせて 12 チャンネルの駆動回路を必要とする。1 つの同心円上には、6 ないし 12 個の振動子が配置されている。各振動子は位相特性がばらついているため、個別に位相特性を測定し、特性の近いもの同士が同一の円周上に配置されている。

Fig. 4 にシステム構成を示す。各振動子の駆動信号は PC から個別に生成する。駆動波形は振幅 12.5V の 40kHz の矩形波である。駆動波形の位相は、各同心円ごとの振動子の特性の補正と、焦点までの距離によって生じる位相差とによって決定される。

4. まとめと今後の課題

本稿では、空中超音波の音響放射圧による触覚提示法を提案し、試算により空中超音波によっても触覚提示が可能な放射圧が生成可能であることを示した。今後は実装を進め、その提示能力の評価を行う。

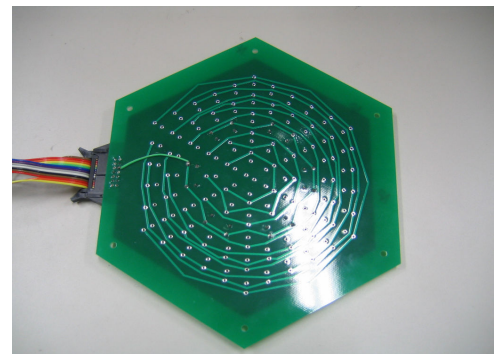


Fig. 3 Printed circuit board for ultrasound annular array

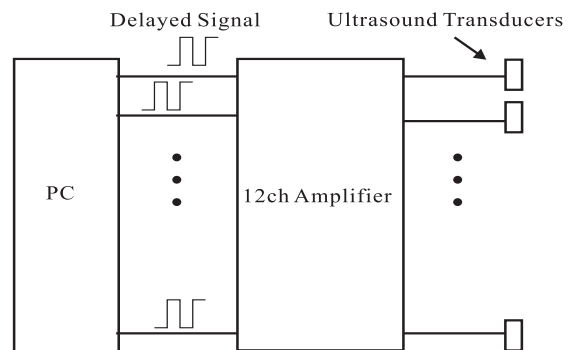


Fig. 4 Block diagram of the drive circuit

参考文献

- 1) T. Iwamoto and H. Shinoda: Two-dimensional Scanning Tactile Display using Ultrasound Radiation Pressure, *Proc. Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 57-61, 2006.
- 2). “超音波技術便覧 改訂新版”, 日刊工業新聞社, 1966.