

空中超音波の包絡変調による触覚を介した音階提示の試み

熊本大学 ○小川雄大 星貴之 鳥越一平

Attempt of Producing Tones with Airborne Ultrasound Tactile Display

Yudai Ogawa, Takayuki Hoshi, and Ippei Torigoe
Kumamoto University

Abstract: Experiments were conducted to investigate whether and how single tones produced by the Airborne Ultrasound Tactile Display can be discriminated tactually. Two conditions of hand were tested; bare and rubber-coated. The results indicate that the rubber-coated condition is better. That is considered to be because the airflow arising from the display is intercepted by the rubber sheet.

1. 諸言

我々は「空中超音波触覚ディスプレイ」の開発を進めている。これは空中を伝搬する超音波を利用して非接触で触覚を提示するデバイスである。試作デバイス[1]と、非接触であることを活かしたインタラクションシステム[2]がこれまでに報告されている。

一方、本デバイスは超音波の包絡変調により音楽や多様な触感を生成することもできる。本稿ではこちらの特長に着目し、その最初の段階として音階（単一周波数の振動刺激）が弁別可能かどうかを調べる。

2. 空中超音波触覚ディスプレイ

2.1 原理

媒質中を伝搬する超音波が物体によって遮られると、その表面には伝搬方向の応力が発生する。平面波を仮定すると、その大きさ P [Pa]は次式によってあらわされる。

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

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（全反射の場合 $\alpha = 2$ ）。 p [Pa]は音圧の実効値、 ρ [kg/m³]は媒質の密度、 c [m/s]は媒質中での音速である。

(1)によると音響放射圧は音圧の2乗に比例する。実際、数百個の振動子から放射された超音波を集束することにより、人間が知覚可能な力を提示することが確認されている[1][2]。

2.2 デバイス

本稿では、共振周波数40kHzの空中超音波振動子を91個並べたアレイを2枚使用する。アレイから200mmの位置に超音波焦点を生成するよう

位相を制御し、それぞれのアレイの焦点が重なるように配置する (Fig.1)。そこに手をかざすと1gf程度の力が感じられる。

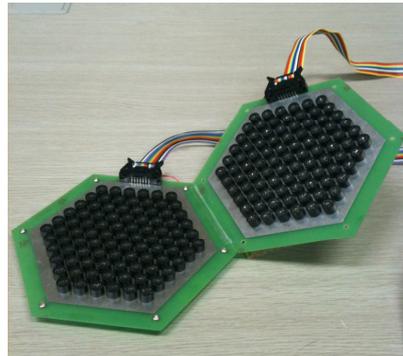


Fig.1 Arrays of ultrasound transducers.

3. 実験

振動刺激が弁別可能かどうかを調べる実験を行なった。提示する変調周波数は65Hz, 130Hz, 260Hzと1オクターブずつ離れたドの音とした。被験者は10名（男性, 21歳~23歳）。各試行では被験者の右手のひらに刺激（変調周波数はランダム）を2回提示し(a)同じ周波数であったか（以下「同異」「Discrimination」と表記）、(b)周波数が異なっていた場合どちらの周波数が高かったか（以下「高低」「Comparison」と表記）、を回答させた。これを被験者一人に対して30試行ずつおこなった。実験中、被験者にはヘッドフォンでホワイトノイズを聞かせ、可聴音の影響を受けないようにした。なお振動子の特性のため周波数によって出力にばらつきがあるため、予備実験により感覚強度が等しくなるよう調整した。

3.1 実験条件(素手, 手袋)

事前に試したところ、皮膚に密着する極薄のゴム手袋を装着したほうが振動を感じやすい

という傾向が見られた。空中超音波触覚ディスプレイからは音響放射圧の他に気流が発生しており[3]，周波数弁別を妨げている可能性がある。そこで実験条件として素手の場合とゴム手袋を装着した場合を比較する。

3.2 結果

同異弁別について素手とゴム手袋の場合を比較する。Fig.2 は結果を変調周波数についてマージしたものである。各被験者に関して棒グラフの左側が素手，右側が手袋である。30 試行中，平均正解数は素手：18.7，手袋：22.8であった。手袋を装着したことにより正解数が増加している。個人ごとに見ると一人の被験者を除いて正解数の増加がみられた。

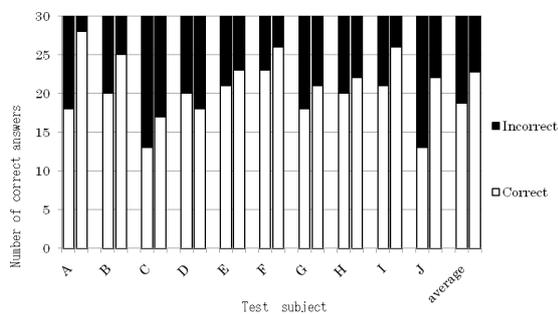


Fig. 2 Discrimination results.

高低弁別の結果を Fig.3 に示す。Disc.Err. は同異弁別の不正解，Comp.Err. は高低弁別の不正解を表す。異なる周波数が提示された 21 試行中，平均正解数は素手：9.2，手袋：12であった。こちらも手袋を装着したことで正解数が増加した。個人ごとに見ると 10 人中 3 人の被験者に正解数の減少がみられた。彼らに感想を聞いたところ，手で感じる気流の強弱を手掛かりにして判断していたというコメントが得られた。予備実験でそろえたのは感覚強度であり，超音波そのものの強度は異なっている。そのため発生する気流の強さも異なる。ゴム手袋によってその手掛かりが感じられなくなったことが影響したと考えられる。

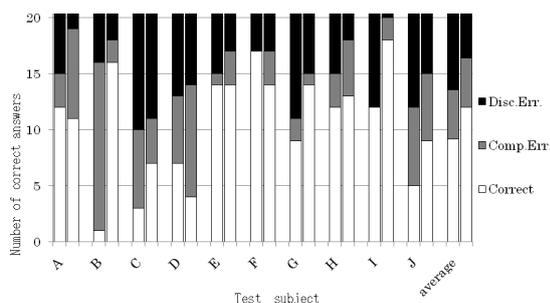


Fig. 3 Comparison results.

次に，被験者に関してマージした正解数と試行回数の比を Table.1 に示す。ゴム手袋によって，同異の正解数に 3~14，高低の正解数に 9~10 の増加が見られた。

Table.1 Results for frequency sets

	Correct answer / Population			
	Discrimination		Comparison	
Frequency (1st:2nd)	Bare hand	Glove	Bare hand	Glove
65:65	15/30	20/30		
130:130	16/30	22/30		
260:260	19/30	22/30		
65:130	37/70	51/70	23/70	32/70
130:260	44/70	56/70	30/70	39/70
260:65	56/70	60/70	39/70	49/70

4. 結言

本研究では，空中超音波触覚ディスプレイによって提示された 1 または 2 オクターブの周波数の違いを感じ分けられるかについて調べた。まず素手の状態で実験を行い，素手では弁別が難しいことが分かった（同異弁別が 50% を切る被験者もいた）。それは気流の影響ではないかという仮説のもと，気流を遮断する処置（ゴム手袋）を行った。その結果，傾向に個人差はあったものの被験者全体の正解数は増加した。これにより気流が周波数弁別に影響することが示された。

振動ピンによる機械刺激については周波数弁別域が調べられている[4]。変位ではなく圧力を提示する空中超音波触覚ディスプレイにおいても同様の結果が得られるのか，今後詳細に調べていく予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会・科学研究費補助金・研究活動スタート支援（研究課題番号：21800039）の助成を受けたものである。

参考文献

- [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. ROBOMEC2009, 1A1-A14, 2010.
- [2] 高橋将文，星貴之，篠田裕之：空中映像との触覚インタラクション，Proc. SI2009, pp. 155-156, 2009.
- [3] 西山雄太，星貴之，鳥越一平：空中超音波触覚ディスプレイに伴う気流の研究，Proc. ROBOMEC2010, 1P1-E28, 2010.
- [4] D. A. Mahns, N. M. Perkins, V. Sahai, L. Robinson, and M. J. Rowe: Vibrotactile frequency discrimination in human hairy skin, Journal of Neurophysiology, vol. 95, pp. 1442-1450, 2006.