

# 複数のオーディオスピーカより再生される超低周波音を用いた非接触型全身触覚提示

柄沢未希子<sup>†1</sup> 梶本裕之<sup>†1</sup>

**概要**：触覚提示システムには、事前準備を含めユーザに“能動的な行動”を要求するものが多く、それらは、“能動的な行動”を取ることができないユーザ、取ろうとしないユーザには不向きである。本稿では、事前準備を含めた“能動的な行動”を取ることができないユーザをターゲットとし、ユーザにその空間にいてもらうだけで触覚を提示できるシステムとして、複数のオーディオスピーカより再生される超低周波音を用いた非接触型全身触覚提示システムを提案する。実験では、ユーザに使用していることを感じさせないシステムを目指して、全身に触覚を提示できる最小限のオーディオスピーカの振幅と、効果的に触覚を提示できる空間の設け方について調査した。

## 1. はじめに

Virtual Reality 市場の成長に伴い、触覚提示システムの研究・開発が盛んに行われており、エンターテインメント、産業、医療などの幅広い分野への応用が期待されている。触覚提示システムの多くは、事前準備を含めユーザに“能動的な行動”を要求する。例えば、据え置きタイプの触覚提示システム[1]を使用するためには、ユーザがシステムの設定されている場所へ赴く必要がある。ハンドヘルドタイプの触覚提示システム[2]を使用するためには、ユーザがシステムを手を持つ必要がある。ウェアラブルタイプの触覚提示システム[3]を使用するためには、ユーザがシステムを身体に装着する必要がある。そのようなシステムでは、以下に示すタイプのユーザは想定されていない。

- 心身の状態を理由として、“能動的な行動”を取ることが難しいユーザ
- 興味・関心の無さを理由として、触覚提示システムを積極的に、あるいは、あえて使いたいとは考えていないユーザ

そこで本稿では、これらのユーザ(以降、ターゲットユーザ)にも触覚を提示できるシステムを提案する。

提案システムは、全身への触覚提示が可能なシステムとする。全身への触覚提示に着目した理由は、提示範囲が広くなれば、日常生活で見聞きするコンテンツ(映像、音楽)と併用したときに、臨場感・没入感をより向上させることができ、ターゲットユーザにも触覚提示システムのメリットを示しやすくなると考えたためである。

全身への触覚提示システムの先行研究には、身体に取り付けて使用するもの[4]、着用して使用するもの[5]、システムに横たわって使用するもの[6]などが提案されている。しかし、これらも前述に例で示した既存の触覚提示システムと同様、事前準備を含めた“能動的な行動”が取れない、あ

るいは、取らないターゲットユーザには不向きである。

本稿で提案するシステムは、ターゲットユーザに対しても、全身への触覚提示を可能にするために、以下の特徴を有する。

- ユーザがその空間にいてだけで触覚を得られることを目指した、身体周りの空気を振動させるための空間を設けた非接触型触覚提示機能
- 空気を振動させる手段に市販のオーディオスピーカ、再生する音に超低周波音(非可聴域音)の使用

本稿では、この特徴による効果を検証するため、提案システムを用いて2つの実験を行った結果を報告する。具体的には、1) 提案システムの構成によって全身に触覚を提示できるか否かと、オーディオスピーカの振幅の閾値、2) 効果的に全身に触覚を提示できる空間の設け方を検証した。

## 2. 提案システム

### 2.1 システム構想

提案システムには、ユーザがその空間にいてだけで触覚を得られるよう、ユーザの身体周りの空気を振動させる仕組みを実装する。そこで、ユーザを取り囲む空間を設け、空間内部に向けてオーディオスピーカを取り付ける。これにより、オーディオスピーカ駆動時の振動板の動きが空間内部の空気の密度を変化させ、空気が振動し、空気の振動がユーザの皮膚や衣服に伝わって、ユーザは振動を感じる。また、システムを使用していることを感じさせなくするために、再生する音に非可聴域音である超低周波音を使用する。提案システムと同様に非可聴域音を用いる方法として、超音波を用いた空中触覚提示[7][8]がある。これらは、超音波を発生させる振動子を用いて触覚提示を実現している。今回の提示方法はこれとは異なり、身体の広い範囲に同時に提示することを目的としている。また現時点ではユーザが特定の空間に入る必要があるが、例えば部屋全

<sup>†1</sup> 電気通信大学 大学院情報学専攻

体をこのシステムと見立てることでユーザの能動的な行動を必要としなくなると考えている。

## 2.2 システム構成

図 1 に、以上の構想を実現する提案システムのハードウェア構成を概略として示す。

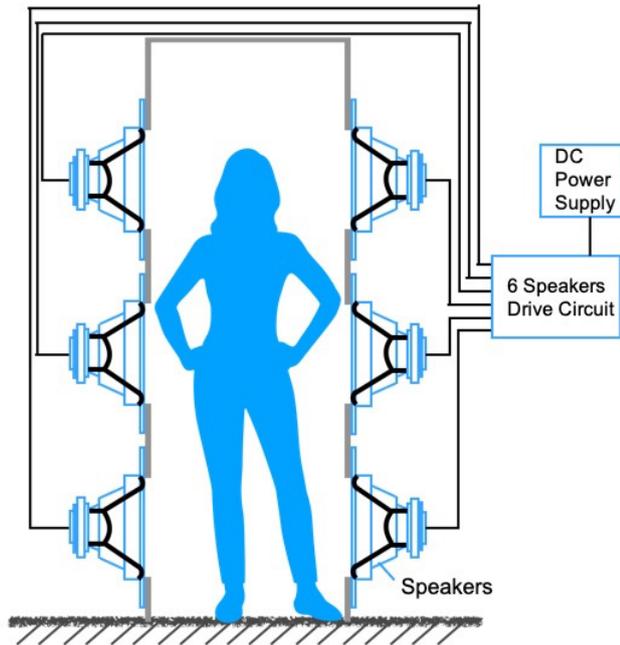


図 1 ハードウェア構成 概略図

本稿の実装においては、ユーザの身体周りに設ける空間をできるだけ小さくする(L490×W610×H2000 mm)ことで、提案システムの効果を検証した。空間は木材(ラワン合板、厚さ 18mm)で製作し、空気を介した振動提示を検証するため、身体と接触し得る底板は外した(床の振動防止のため)。空間の前面には、ユーザが入り出りできる扉を設けた。

オーディオスピーカは、空間内部の空気を効率よく振動させるため、壁面に取り付け可能な範囲でできる限り大きい振動板を持ち、最大振幅の大きいもの(EMINENCE, BETA-15A, 直径 381 mm, 8 Ω, Xmax 4.00 mm)を6台用いた。6台のオーディオスピーカは、1台につき1つのモータドライバ(TOSHIBA, TB6643KQ)によって、PWM 制御で超低周波の正弦波を出力した。各モータドライバは、マイクロコントローラ(Espressif, ESP32-DevKitC)により制御した。

## 3. 実験 1

### 3.1 実験概要

本実験では、提案システムによって全身への触覚提示が可能であることを示す目的と、システムを使用していることを感じさせなくするためにオーディオスピーカの動きをなるべく小さくしたい目的から、オーディオスピーカの振幅の閾値を測定した。

測定では、被験者に提案システムの空間に入ってもらい、

超低周波音を再生したときに全身に振動を感じたか否かを回答してもらった。これをオーディオスピーカの振幅を変えた複数の設定で行った。

### 3.2 実験条件

扉を閉める前の提案システムと被験者の様子を図 2 に示す。



図 2 提案システムと被験者の様子

被験者には、提案システムの扉を閉めた状態の閉空間に入ってもらい、身体の軸がオーディオスピーカの縦中心になる立ち位置で留まるようにしてもらった。視覚と聴覚からの情報を遮断するためにアイマスクとイヤマフを装着してもらい、イヤマフの下にイヤホン装着させた。オーディオスピーカから超低周波音の再生が行われている間は、被験者のイヤホンにピンクノイズを流した。指には Bluetooth で PC と通信が可能なプレゼンマウスを装着させた。超低周波音の停止後、被験者のイヤホンに音声による合図を流し、被験者が直前の提示に対して全身に振動を感じた場合にプレゼンマウスのボタンを押して回答してもらった。なお、本実験における「全身」の定義は、被験者間の身長差を考慮して、首から腿までの範囲とした。

著者による事前確認の結果から、服装の違いによって感じる振動の強弱が変わることが分かっていた。具体的には、生地が身体に密着している衣服の場合は、感じる振動は小さく、生地と身体の間にとりある衣服の場合は、感じる振動はもう一方と比較して大きい。このことから、被験

者には同じ製品のパジャマ(綿 100%, ゆとりのあるデザイン)を着用してもらい、衣服の差異による実験結果への影響をなくした。

オーディオスピーカは、同周波数で同位相の正弦波を出力することで同じ超低周波音を 6 台同時に再生させた。再生時間は各試行 8 秒間とした。

オーディオスピーカの振幅の閾値は、階段法で測定した。振幅なしを 0.0, 振幅最大を 1.0 として、振幅 0.0 から開始し、被験者が振動を感じないと回答したら振幅を上昇、振動を感じたと回答したら振幅を下降させ、次に再生する音の振幅を決定した。なお、上昇させる幅の初期値は 0.5 とし、下降時に直前の上昇時の幅の半分に幅を更新した。振幅を 1.0 で再生して振動を感じないと回答した時点と、合計 6 回振動を感じたと回答した時点で測定を終了した。例として、図 3 に実際の実験で測定したときの振幅の推移を示す。

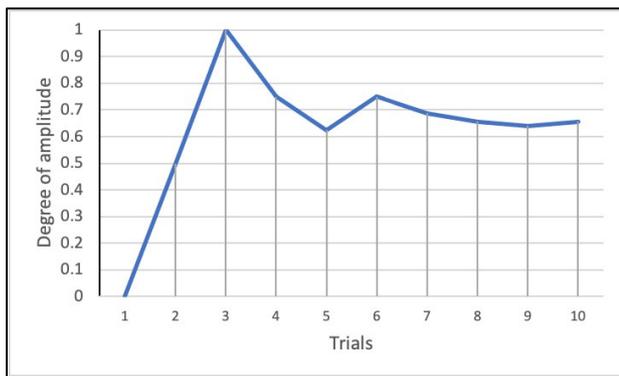


図 3 振幅の推移 (実験時の例)

最後に振動を感じたと回答した時の振幅の値と、最後に振動を感じないと回答した時の振幅の値の平均値を閾値として算出した。この測定を、2, 4, 8, 16, 24Hz の 5 種類の超低周波音に対して実施した。実験回数は各周波数で 1 回ずつ、2, 4, 8, 16, 24Hz の順で行った。実験は、21~35 歳の 14 名の被験者(うち女性 5 名)に対して行った。

### 3.3 実験結果

図 4 に、2, 4, 8, 16, 24Hz の各周波数に対する振幅の閾値の分布を示す。

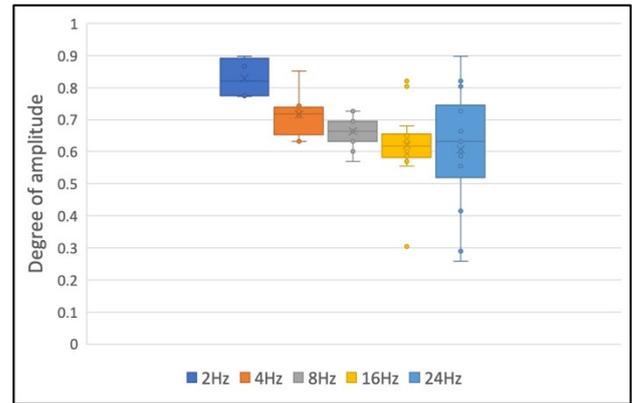


図 4 各周波数に対する振幅の閾値の分布

図 4 の結果から、今回の測定範囲では周波数の上昇に対して振幅閾値は下降傾向にあった。8Hz のばらつきが最も小さく、振幅が 0.7 程度であれば全身に振動を与えられることが分かった。また、16Hz と 24Hz では、ばらつきが大きいことが分かった。

図 5 に、各周波数に対する、振幅が最大のときでも全身に振動を感じなかった被験者数と、複数回受けた同じ振幅に対して評価が分かれた被験者数に対して評価が分かれた被験者数を示す。

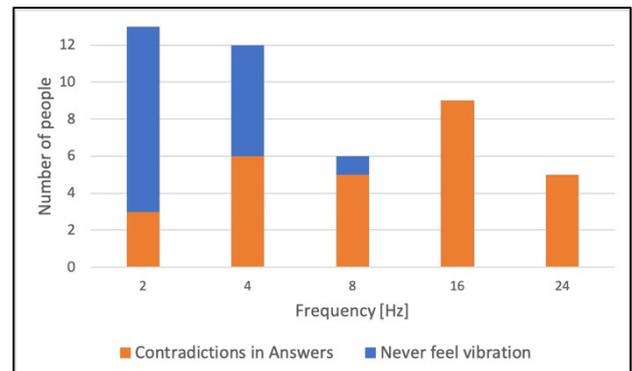


図 5 振幅最大でも全身に振動を感じなかった被験者数(青)、複数回受けた同じ振幅に対して評価が分かれた被験者数(オレンジ)

図 5 の結果から、2Hz と 4Hz において振幅が最大でも全身に振動を感じなかった被験者が多いことが分かった。また、8Hz と 24Hz では、複数回受けた同じ振幅に対して評価が分かれた被験者数が少ないことが分かった。

### 3.4 考察

実験結果から、8Hz 以上の周波数であれば、全身への振動が提示可能であることが分かった。したがって、提案システムにより、ユーザはその空間にただで触覚を得られることが確認できた。

振動が提示できた周波数については、身体の大部分の領域は有毛部であり、今回の実験で刺激されているのも有毛部であると考えられる(手掌部等の無毛部は多くの場合皮

膚が分厚く、今回の空気圧変化により感覚を生じることは考えにくい。有毛部では Meissner 小体が存在せず、代わりに毛包受容器がその役割を果たしていることが知られている[9]。多くの先行研究では 20Hz 以上の振動に対する応答が確認されており、また周波数の上昇とともに閾値が低下することも確認されている。今回最も安定的に提示できた 8Hz については関与する受容器は特定できていないが、おそらく毛包受容器と圧覚受容器双方が活動する領域と考えられる。

16Hz と 24Hz の閾値のばらつきが大きかった結果については、実験後の被験者にヒアリングを行ったところ、16Hz と 24Hz では、胸部体内を主とする上半身に強い振動を感じたため、全身に振動を感じにくかった、という意見を複数得た。さらに、16Hz と 24Hz の場合は胸部体内に、2Hz、4Hz、8Hz の場合は皮膚に振動を感じるといった、周波数によって振動を強く感じる部位が異なると回答した被験者もいた。したがって、再生する周波数を変えることで提案システムの応用先のバリエーションを持つことができると考えられる。

## 4. 実験 2

### 4.1 実験概要

本実験では、効果的に全身への触覚提示が行える提案システムの空間の設け方を調査する目的から、提案システムの扉を開けた状態と閉じた状態とで感じる振動の強さの違いとオーディオスピーカの振幅の閾値の違いを測定した。

被験者は提案システムの空間に入り、扉を開けた状態と閉めた状態とで超低周波音を再生し、どちらが振動を強く感じたか回答した。閾値の測定方法は、実験 1 と同様の手順で行った。

### 4.2 実験条件

被験者は、実験 1 の実験条件と同様の衣服を着用し、アイマスクとイヤマフを装着して、提案システムの空間内に入った。

強さの比較については、扉を開けた状態と閉じた状態それぞれで、振幅最大に設定した 2, 4, 8, 16, 24Hz の 5 種類の超低周波音を再生した。再生時間は各試行 8 秒間とした。被験者は、扉を開けた状態と閉じた状態でどちらが強く振動を感じたか、口頭で回答した。本実験は 21~35 歳の 10 名の被験者(うち女性 1 名)に対して行った。

オーディオスピーカの振幅の閾値の比較については、実験 1 と同じ実験条件にて行った。この振幅閾値の比較については、21~32 歳の 4 名の被験者(すべて女性)に対して行った。

### 4.3 実験結果

図 6 に、扉の状態に対する強さの比較結果を示す。

図 6 の結果から、4Hz と 8Hz は開けた状態、16Hz と 24Hz は閉じた状態の方が強く振動を感じた被験者が多かった。

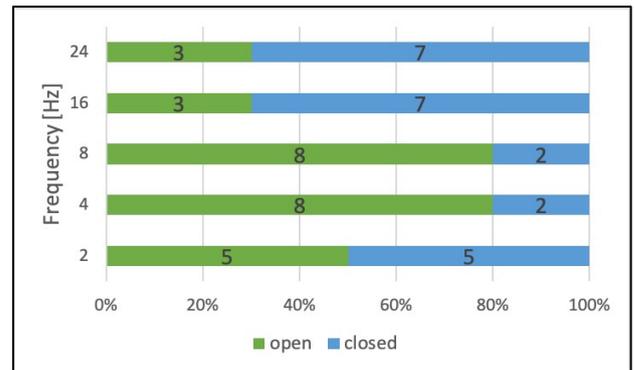


図 6 振動を強く感じたと回答した被験者数

図 7 に、閾値の比較結果を示す。

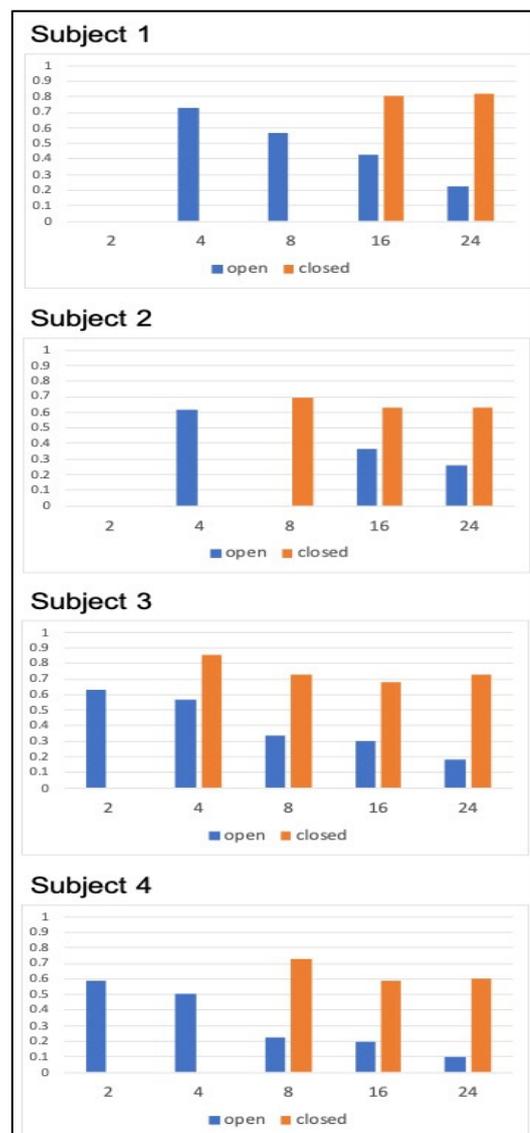


図 7 被験者別 全身に振動を感じる振幅の閾値の比較

(青: 開けた状態, オレンジ: 閉じた状態,

Subject 3 の open- 8Hz は測定不備のためデータなし)

図 7 の結果から、どの被験者も、扉を開けた状態では 4Hz においても全身に振動を感じ、扉を開けた状態の方が

扉を閉じた状態よりも小さい振幅で全身に振動を感じるということが分かった。

#### 4.4 考察

16Hz と 24Hz における振動の強さの比較結果では、扉を閉めた状態の方が振動を強く感じた被験者が多かった。これはこのあとの実験における、扉を開けた状態よりも閉めた状態のほうが閾値が高いという結果と矛盾しているように思われる。胸部体内に感じる振動が閉じた状態で顕著に感じられたためと回答した被験者が複数いたことから、胸部体内に感じる振動の大きさが、開けた状態で感じる他の部位の振動よりも大きかったこと、それが主観的な感覚の強さを生んだことが推測できる。なお、著者による事前確認では、扉を開けた状態では、胸部体内に振動を感じないことが分かっている。

一方、4Hz と 8Hz における振動の強さの比較結果と閾値の比較結果では、扉を開けた状態の方が振動を強く感じ、振幅の閾値も小さかった。扉を開けた状態では、空気が空間の外に流れることによって空気の移動、つまり、風が発生したものと考えられる。したがって、全身に感じる振動は、扉を閉めた状態で生じる空気の振動より、扉を開けた状態で生じる風によるもののほうが、知覚しやすい可能性が確認できた。スピーカの駆動によって生成する空気の流れを利用した触覚提示の研究には、空気砲で狙った対象にぶつかった感覚を与えるシステムがある[10][11]。それに対して、提案システムは、空間内の対象に対して身体の広範囲に振動を与える手法である。

## 5. おわりに

本稿では、事前準備を含めた“能動的な行動”を取ることが難しいユーザや触覚提示システムを積極的に、あるいは、あえて使いたいとは考えていないユーザにも触覚を提示できるシステムとして、複数のオーディオスピーカより再生される超低周波音を用いた非接触型全身触覚提示システムを提案した。実験を通じて、提案システムにより、ユーザがその空間にいるだけで触覚を得られることと、周波数によって胸部体内への提示と皮膚への提示との切り替えが可能なが明らかになった。また、効果的に全身に触覚を提示できる空間の設け方を調べるために、提案システムの扉を開けた状態と閉じた状態の比較を行った。比較結果から、扉を開けた状態の方が効果的に全身に触覚を提示できる可能性があることが分かった。

今後の展望として、本稿で提案したシステムよりも大きくて実用的な空間、例えば、トイレ、エレベータ、カプセルホテルの個室などへ実装した場合の効果の検証、視覚・聴覚に提示するコンテンツと併用した場合の効果の検証、複数スピーカでそれぞれ異なる駆動をさせた場合の効果の検証などに取り組んでいく。

## 参考文献

- [1] T. H. Massie, J. K. Salisbury, “The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects,” Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 1994.
- [2] H. Benko, C. Holz, M. Sinclair, E. OfekD, “NormalTouch and TextureTouch: High-fidelity 3D Haptic Shape Rendering on Handheld Virtual Reality Controllers,” Proceeding UIST '16 Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, 2016.
- [3] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, D. Prattichizzo, “Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives,” IEEE Transactions on Haptics, 2017.
- [4] H. Uematsu, D. Ogawa, R. Okazaki, T. Hachisu, H. Kajimoto, “Projection-based Vibrotactile: Vibration Unit for Recognition of Shape Image Projection onto Whole Body,” IEEE World Haptics Conference, 2015.
- [5] “TESLASUIT”. <https://teslasuit.io/>, (参照 2020-12-08).
- [6] W. van der Maden, D. Shor, D. Lomas, “Feel The Vibe: Aesthetics of Whole-body Vibrations,” EuroHaptics, 2020.
- [7] T. Carter, S. Ann Seah, B. Long, B. Drinkwater, S. Subramanian, “UltraHaptics: Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces,” Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology, 2013.
- [8] “Ultrahaptics”. <https://www.ultrahaptics.com/products-programs/stratos-inspire/>, (参照 2020-12-08).
- [9] M. Furukawa, N. Nagaya, Y. Hashimoto, H. Kajimoto, M. Inami, “Measurement of the detection thresholds of hair on human hairy skin using direct vibrotactile stimulation.”, World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2009.
- [10] S. Gupta, D. Morris, S. N. Patel, D. Tan, “AirWave: non-contact haptic feedback using air vortex rings,” In Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing, 2013.
- [11] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, A. Israr. AIREAL: interactive tactile experiences in free air. ACM Trans. Graph. 32, 4, Article 134, 2013.