



超低周波音圧変化を用いた非接触型触覚提示

Non-Contact Tactile Presentation by Very Low Frequency Sound

柄沢未希子¹⁾, 梶本裕之¹⁾

Mikiko KARASAWA, and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学研究所 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {karasawa, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: 触覚提示技術の多くは、機能が実装されたシステムを自ら触りにいく/身につける, といった能動的な行動が必要である. 本稿では, ユーザの能動的な行動なしに, かつ, 簡便な構成により, さりげない触覚提示を実現するシステムを提案する. オーディオスピーカを用いて非可聴域の超低周波の音圧変化を生じさせることにより, ユーザがその空間にいるだけで全身に触覚を得ることができる.

キーワード: 超低周波, 音圧変化, 非接触, 触覚

1. はじめに

近年の VR (Virtual Reality) システムへの注目により, 触覚提示技術はエンターテインメントや教育など幅広い分野に活用されている. それらの多くは, コントローラなど手に持って使用するハンドヘルド型[1], 卓上において使用する据え置き型[2], もしくは, ユーザが手脚に装着して使用するウェアラブル型[3][4]のシステム上に実装されている. そのため, ユーザが触覚を得るためには, システムを自ら手に取る, 触りに行く, または, 身につけるといった能動的な行動が必要である.

一方で, 能動的な行動なしに触覚を得られる手法として, 非接触型の触覚提示技術[5]が提案されており, 研究開発や製品化[6]も進んでいる. ただしユーザがそれらのシステムから触覚を得るためには, 多数の超音波振動子を備えるシステムの設定が必要となる.

本研究では, 受動的に, かつ, 無意識的にユーザが触覚を得られる, 「さりげない」触覚提示システムを提案する. これにより, 様々な事情で能動的な行動を取れないユーザや, 意識的なアクセス無しに意図した情報を伝えたい企業などの助けになることが期待される.

そこで, まず本稿では「さりげない」触覚提示を実現するシステムのコンセプトを提案する. 次に, コンセプトを具現化するプロトタイプの1つとして, オーディオスピーカを用いて非可聴域の超低周波の音圧変化を生じさせることにより, ユーザがその空間にいるだけで全身に触覚を得られるシステムを開発したので, その概要とハードウェア構成について報告する. 加えて, 予備実験としてプロトタイプシステムを体験した人々の感想から, プロトタイプシステムがユーザに与える感覚について考察する.

2. 提案システム

2.1 コンセプト

我々が目指す「さりげない」触覚提示システムとは, ユーザが気付かれないうちに感覚を得られ, それがユーザの心身に作用するシステムである.

そのようなシステムに求められる条件を以下に示す:

- ユーザが能動的に行動しなくても感覚を得られる
- ユーザが感覚を与えられているという意識を持たない

1つ目の条件については, ユーザがその空間にいるだけで感覚を得られることを意味する.

2つ目の条件については, 触覚提示システムがユーザのいる空間に溶け込む, つまり, 日常的に見かける姿もしくは簡便な構成であることを意味する.

2.2 提案手法

先のコンセプトから, ユーザが無意識的な状態でも感覚を得られるよう, ある空間内にいるユーザに対する非接触型触覚提示技術を提案する.

本稿ではその一例として, 空間内にいるユーザに非接触型触覚提示を行うために, 非可聴域の超低周波の音圧変化をオーディオスピーカより生じさせることで触覚を提示する手法を提案する. 音圧の変化は皮膚表面に加わる圧力変化を生じさせる. これを超音波領域で用い, 音響放射圧という形で触覚提示に利用したものが先行研究で提案された空中超音波による触覚提示である[5][6]. 一方で超低周波であっても皮膚表面に圧力変化は生じるはずであるから, 触覚を生じる可能性は十分に存在する. 実際, 非可聴域の「騒音」が一種の公害として扱われていることはこ

れを裏付けるものと考えられる。

超低周波の音圧変化を用いて触覚を提示する場合、「空間」と「スピーカコーン」のサイズを考慮する必要がある。密閉された空間と外界との境界にスピーカが配置された場合、スピーカコーンの動きによって空間の圧力が変化し、これが身体表面に与えられる音圧変化になると考えられる（本稿では波の伝搬は考えない）。図 1 にこの概念図を示す。この考察から、空間の体積が大きいほど、スピーカは大型である必要が生じる。今回は提案手法の原理の検証のため、極小の空間を用いることとした。図 2 に今回我々が開発したプロトタイプシステムの概観と使用イメージを示す。

2.3 ハードウェア構成

図 3 に提案システムのハードウェア構成を示す。超低周波の音圧変化生成機能は、オーディオスピーカ（Dayton Audio, DC250-8, 直径 25cm, 8Ω）、マイクロコントローラ（Espressif, ESP32-DevKitC）、モータドライバ IC（TOSHIBA, TB6568KQ）の構成により実現する。モータドライバは、安定化電源より電力が供給され（出力電圧 15V）、PWM 制御によって超低周波の正弦波を出力する。

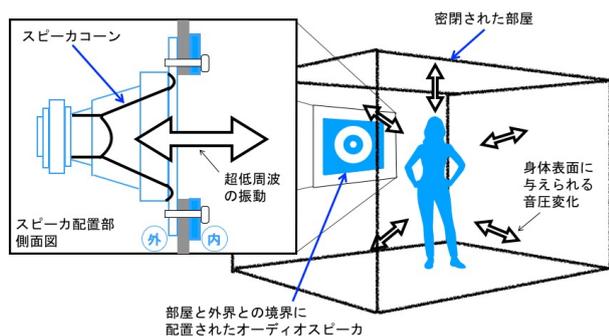


図 1 提案手法の概念図



図 2 プロトタイプシステムの概観と使用イメージ

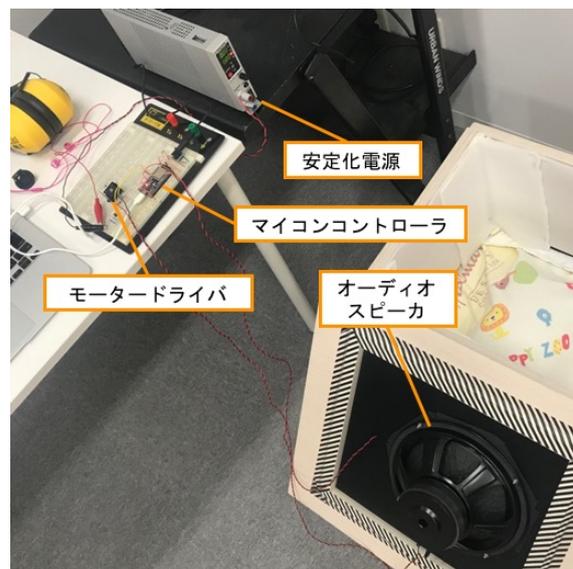


図 3 ハードウェア構成

これによって密閉空間の内側に向けて設置されているオーディオスピーカのボイスコイルが前後に動作し、空間内に音圧変化を生じさせる。

超低周波の音圧変化を生じさせる空間について、今回我々は前述のように大きな音圧変化による効果の検証を行うため、ユーザがいる空間として棺桶（木製、サイズ 6 尺、内寸 L1760×W475×H340 mm）を用いた。

以上の構成から、以下の式（ボイルの法則）の左辺をオーディオスピーカのボイスコイルを静止させた状態、右辺を動作させた状態として表すことで、空間に加えられる音圧を概算する。

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (1)$$

左辺については、今回の提案システムの構成から、 p_1 を 1 気圧として 101325Pa、 V_1 を棺桶に体重 60kg のユーザが入っている空間の体積として約 224L とする。右辺については、オーディオスピーカのスペックシート[7]によるとボイスコイルが前後に動作するときにスピーカコーンが空気を押しつける体積は 154.4 cm³ (0.1544L) であるので、 V_2 は V_1 からこれを引いた体積の約 223.85L となり、 p_2 は 101393Pa と算出される。したがって、 p_2 と p_1 の差から今回の提案システムは約 70Pa の音圧変化を与える環境であると概算できる。

3. 予備実験

3.1 実験手続き

超低周波の音圧変化によって、その空間にいただけでユーザがどのような感覚を得ることができるかを検証するため、プロトタイプシステムを 20 代男女 4 名（男性 2 名、女性 2 名）に体験してもらった。

被験者には、Bluetooth で PC と接続が可能なプレゼンマウスを指に装着してもらい、1, 2, 4, 8, 16Hz の 5 種類の超低周波数で各 4.5 秒間オーディオスピーカを動作させ、被験者には何らかの感覚が得られた瞬間にプレゼンマウス

のボタンを押してもらうことで、どの周波数に対して何らかの感覚が得られたかを測定した。体験後にはアンケートをとり、「何らかの感覚は得られたか」「得られた場合どのような感覚であったか」を被験者に尋ねた。

次に、検証の弊害となり得る2点に対して行った対策を説明する。

1つ目の弊害は、棺桶に伝わるオーディオスピーカの振動である。提案手法が目指すのは、オーディオスピーカが生じさせる音圧変化を空間内の空気を介してユーザに伝えることである。よって、棺桶に触れた皮膚経路で伝わる振動は効果の検証の弊害となる。これに対して我々は、図4に示す対策を行った。棺桶の内側にウレタンフォームシートを貼り、棺桶を設置する床と棺桶、棺桶の箱と蓋、蓋とオーディオスピーカとの間にそれぞれ防振ゴムもしくはスポンジを挟んだ。さらに、棺桶の背板を外してコンクリート床の上に設置することで、横になっているユーザの背中と棺桶が接しないようにした。

2つ目の弊害は、オーディオスピーカの動作音である。異音ではないものの、オーディオスピーカのボイスコイルが前後に動くことでドドドという振動音が聞こえ、これも効果の検証の弊害となる。これに対し、被験者にはイヤホンから流れるピンクノイズを聞いてもらい、さらにその上からイヤーマフを装着した状態で棺桶に入ってもらった。

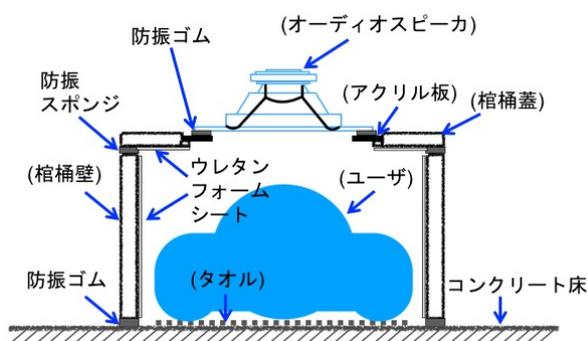


図4 振動対策：プロトタイプシステム断面図（上）、実際の写真（下）

3.2 実験結果

何らかの感覚が得られた被験者の人数について、周波数別の結果を図5に示す。

この結果から、今回プロトタイプシステムを体験した全員が、空間にいただけで何らかの感覚が得られたことが分かる。特に、4, 8, 16Hzは4名全員が何らかの感覚が得られたと回答した。16Hzの音圧変化については、皮膚感覚の機械受容器のマイスナー小体が30Hz程度の周波数をピークとして振動に応答するとされている[8]ことから、オーディオスピーカによる16Hzの音圧変化もマイスナー小体の応答により、ユーザが何らかの感覚を得た可能性が考えられる。一方で、それ以下の周波数に対してユーザが感じた感覚については、触覚としてはおそらく圧覚受容器であるメルケル細胞の応答も関与しているものと考えられる。

また今回は、各周波数を1度ずつ体験してもらったのみであるため、今後は周波数や振幅の大きさを変化させながらの計測により、超低周波の音圧変化によって得られる触覚の閾値を得る。

次にアンケートの結果から、各被験者が得られた感覚の表現を以下に示す：

- 手や顔に違和感を感じるときと全身が振動している感覚、服が振動している感覚（25歳男性）
- 体が振動する感覚、近くに回転するものがあるかのような感覚（23歳男性）
- 頭を押される感覚、足を全体的に柔らかく押されている感覚（21歳女性）
- 腕辺りにぞくぞくする感覚（23歳女性）

この結果から、被験者の性別で回答の差が見られた。

男性被験者らは、得られた感覚に「振動」という表現を使っている回答であった。一方、女性被験者らは「振動」という表現は使っていない。これは、今回の被験者の男性と女性での体格差が、棺桶壁面と身体との距離の差となり、得られる感覚の違いをもたらしたと考えられる（図6）。

男性被験者らは肩幅と身長が棺桶のサイズに対してギリギリ、もしくは、体験中少なくとも僅かに衣服や頭髪が棺桶壁面に接していたと考え、オーディオスピーカお

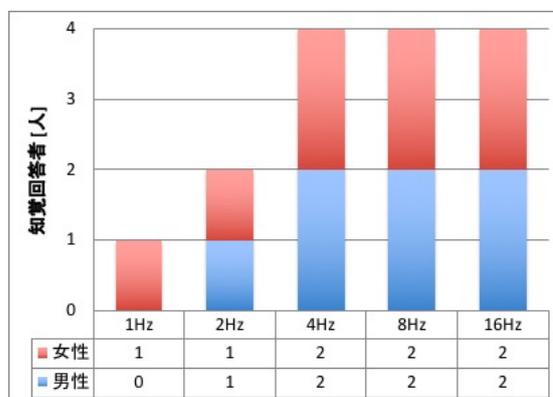


図5 何らかの感覚の得られた被験者の人数



図 6 体格差による壁面との距離の違い

よび棺桶から伝わる振動が、空間内の音圧変化によって得られる感覚と比較して支配的であったため、得られた感覚として「振動」と回答したと考えられる。

一方で、女性の被験者らは体験中、地面以外どこにも身体を接しておらず、よって得られた感覚についての回答結果は、今回の提案手法でユーザに与えることができた感覚に相当すると考えられる。

予備実験結果をまとめると、「さりげない」触覚提示を実現するシステムのプロトタイプとして開発した超低周波の音圧変化による触覚提示システムで、ユーザは「押される、ぞくぞくする」といった何らかの感覚を得られることが分かった。

今後は空間のサイズを広げるなどの対策により、どのような被験者でも筐体の振動の影響を受けない環境を構築し、その上で、得られる感覚の調査と、それらがユーザの心身にどのように作用するかも調べていきたい。

4. まとめ

本稿では、「さりげない」触覚提示を実現するシステムのコンセプトを提案した。これを具現化するプロトタイプの1つとして、オーディオスピーカを用いて非可聴域の超低周波の音圧変化を生じさせることにより、ユーザがその空間にただで全身に触覚を得られるシステムを提案した。予備実験から、音圧変化の周期が4, 8, 16 Hzの場合において、ユーザは何らかの感覚が得られることを確認した。今後は、超低周波の音圧変化によって得られる触

覚の閾値や、得られる感覚による心身への作用を調べていく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP15H05923 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Benko, C. Holz, M. Sinclair and E. Ofek, "NormalTouch and TextureTouch: High-fidelity 3D Haptic Shape Rendering on Handheld Virtual Reality Controllers," Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, 2016.
- [2] T. H. Massie and 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.
- [3] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward and D. Prattichizzo, "Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives," IEEE Transactions on Haptics, 2017.
- [4] P. Lemmens, F. Crompvoets, D. Brokken, J. van den Eerenbeemd and G. de Vries, "A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing," World Haptics 2009 - Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2009.
- [5] T. Carter, S. Ann Seah, B. Long, B. Drinkwater and 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.
- [6] Ultrahaptics, STRATOS Inspire Haptic Module, <https://www.ultrahaptics.com/products-programs/stratos-inspire/>.
- [7] Dayton Audio, DC250-8 10" Classic Woofer 8 Ohm, <http://www.daytonaudio.com/specs/specsheet.php?prod=295-315>.
- [8] E. R. Kandel, J. H. Schwartz and T. M. Jessell, "Principles of Neural Science," 4th ed., McGraw-Hill, Health Professions Division, 2000, 1414 p.