

## 鎖骨を介した振動伝播による体内触覚提示

櫻木怜<sup>†1</sup> 池野早紀子<sup>†1</sup> 岡崎龍太<sup>†1,2</sup> 梶本裕之<sup>†1,3</sup>

近年視聴覚コンテンツの臨場感向上を目的とした全身触覚提示デバイスが数多く提案されている。こうしたデバイスは共通して体格差による着脱の制限や煩雑さの問題を持つ。そこで本研究は身体に装着する振動子の数を可能な限り減らし、かつ広範囲に振動を提示するため、ユーザの骨を介して身体広範囲に振動を提示することを試みる。本稿では、身体広範囲に振動を伝達可能な骨部位の選定を行い、結果として選定された鎖骨に適した振動提示デバイスを製作した。

## The Internal Body Tactile Presentation by using Vibration Propagation through the Clavicle

REI SAKURAGI<sup>†1</sup> SAKIKO IKENO<sup>†1</sup>  
RYUTA OKAZAKI<sup>†1,2</sup> HIROYUKI KAJIMOTO<sup>†1,3</sup>

Recently, many whole body tactile display devices for improving reality or presence of the contents have been proposed. These devices commonly have the same limitations or complexity when putting on and taking off the device, because such devices normally contain many actuators and they all should be tightly fitted to user's body. In this study, we aim to present the vibration to a wide area in the body through the user's bone to solve this problem. In this paper, we chose the bone that has the greatest vibration distribution efficiency in the body by psychophysical experiment.

### 1. はじめに

音を含んだコンテンツの臨場感を高めることを考える。家庭内でヘッドホンを使用した場合とライブ会場や映画館では視聴覚コンテンツから受ける印象が大きく異なり、一般に後者がより「臨場感が有る」と表現される。このことは、音響コンテンツにおける臨場感には高忠実な音提示以外の要素が存在していることを示唆している。

臨場感とは、文字通り「その場に臨んでいる感覚」であり、「自己が環境に囲まれている」という没入感が必要になる。先の例では身体全体が音圧に晒されることによって触覚的に音コンテンツの臨場感が提示されたと考えることが出来る。

一般に空気伝播を用いて通常の音から触覚を生成するには巨大なスピーカが必要となるが、実際にはそのような環境が許容されることは少ない。一方で聴覚コンテンツに合わせて身体全体に振動提示を行う全身触覚提示装置[1][2]の開発が近年数多く行われている。

しかしながら、これらのデバイスには共通して以下の問題が生じる。まず、全身に振動提示を行うための振動子が装置全体に数多く広く配置されるため、デバイスが非常に大掛かりかつ高重量となる。またそれらが常にユーザの身体に密着している必要が有るため拘束性が非常に高く、ユーザの動きが制限される。さらに多数の振動子を個々のユ

ーザの身体に合わせて密着させる必要があるため着脱に煩雑さが生じる。振動子の数や装置重量の削減を目的として、振動伝達媒介を介した全身触覚提示手法[3]なども開発されているが、着脱の煩雑さや拘束性といった問題はいまだ解消されていない。

そこで本研究では全身に音響コンテンツに合わせた触覚を提示するためのデバイスの非拘束性、軽量・小型化、着脱の容易さを実現するため、ユーザの骨を介して身体内部の広範囲に振動を提示することを試みる。身体内部への振動提示は厳密には全身触覚提示手法とは異なるが、ライブ会場などにおいて大音量の音を全身に浴びた結果に生じる「腹に響く」感覚を身体内部への触覚提示によって再現することを目指す。

身体内部への触覚提示を目的として、腹部に振動提示子を圧着させる手法が提案されているが[4][5]、本研究では骨に振動を提示し、骨格を通じて体内広範囲に振動を伝播させることを目指す。骨は剛体として人体に広範囲につながっているため、骨に提示された振動は別の骨を伝わって体内、体表へと伝達されることが期待される。また骨の一部は突起として体表に非常に近い部分に存在するため、振動子を骨に密着させることが容易だと考えられる。これにより、身体に装着する振動子の数を減らしつつ、全身に触覚提示する際の着脱の制限や煩雑さが解消できると考えられる。この現象は骨伝導[6]として知られており、従来主に外耳、

<sup>†1</sup> 電気通信大学  
The University of Electro-Communications  
<sup>†2</sup> 日本学術振興会特別研究員  
JSPS Research Fellow

<sup>†3</sup> 科学技術振興機構さきがけ  
Japan Science and Technology Agency JST Presto

中耳に起因する難聴者向け補聴器[7]や外部騒音に左右されずに音声を識別するための技術として利用されてきた[8]。本研究は骨伝導技術を「体内、体表に振動を伝える振動提示手法」として用いる。本稿では、身体内部の広範囲に振動を伝達可能な骨部位の選定を行った。

## 2. 振動提示部位選定実験

予備実験の結果、骨への振動提示で体内に振動があると知覚することが判明した。体内、体表への振動提示を効率的に行うためには、知覚される振動の強度が大きく、かつ容易にその部位に振動子が装着可能であることが必要となる。そこで本実験では全身の骨のうち体表に突起し同定、装着が容易な部位を選定し、その部位に振動を提示した際に知覚される身体内部の主観的な振動の大きさを測定する実験を行った。

### 2.1 実験装置

PC、デジタルオーディオアンプ（株式会社ラステーム・システムズ, RSDA202）、スピーカ（AURASOUND, NSW2-326-8A）を用いて骨に振動を提示する装置を作成した。

振動信号は PC 音源出力の左側と右側から出力され、左右それぞれの信号はアンプを介して各スピーカから振動として出力される。この構成により、左右の振動の振幅を独立して調整することが可能となる。

本実験では身体の様々な部位に存在する骨にスピーカを押し付ける形で振動を提示するため、スピーカの押し付け力を統制する必要がある。そのため以下の機構を用いて押し付け力を統制した。まずスピーカコーンに円柱状の接触子（ABS 樹脂製、直径 20mm）を取り付けた。この時、スピーカコーンと接触子の間に隙間ができないよう、下端を半球状にした。その後中心に直径 21mm の穴の開いたアクリル板をスピーカにかぶせ、接触子が上面に約 2mm 飛び出す位置で固定した。（図 1）

この機構により、接触子を骨に押し付けた際のスピーカコーンの沈み込み量は常に 2mm に統制され、押し付け力は約 200g 重に統制された。

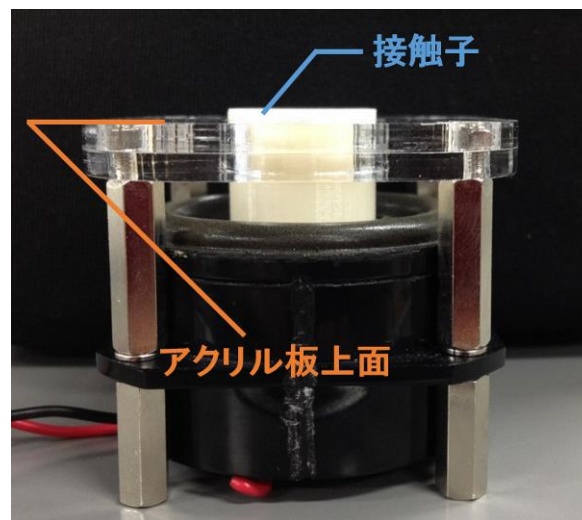


図 1 振動提示装置の概要

### 2.2 振動提示部位

振動を提示する部位として、骨が体表に突起している部分から、予備実験により鎖骨、肩、胸骨柄、剣状突起、肩甲骨、肋骨の 6 箇所を選出した。（図 2）

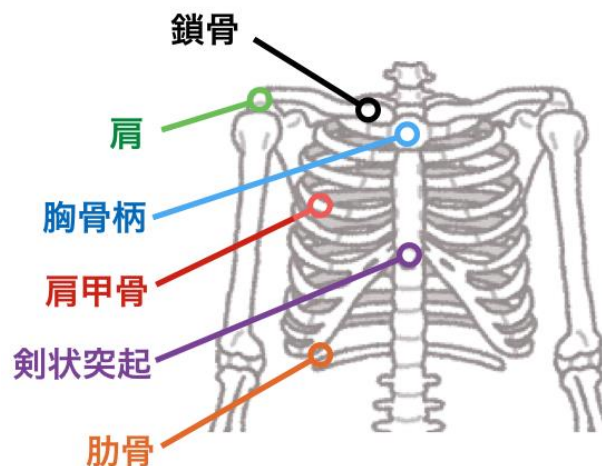


図 2 振動を提示する部位

なお下半身及び腕に存在する骨に関しては、効率的に振動を伝達できたとしても装置の拘束性が高くなることが予想されるため除外し、上半身の骨のみを選定の対象とした。

### 2.3 提示刺激

振動周波数の違いによる振動知覚への影響を観察するため、3 種類の周波数（30Hz, 90Hz, 270Hz）の正弦波を提示刺激として用意した。

周波数ごとに、右側のスピーカに 1 秒、左側のスピーカに 1 秒交互に刺激が提示され、その後 1 秒の空白を挟んで同様の刺激が繰り返し提示される信号トラックを作成し実験に用いた。

各刺激の基準強度は、予備実験で求めた知覚可能な最小の振幅を発生させる電圧を 10 倍した際の振幅とした。

## 2.4 実験方法

実験は選出した6か所の部位のうち、1つを基準点とし、基準点と測定部位に振動を提示した時に身体内部で知覚する振動の強度が主観的に等しくなるように測定部位の振動強度を調節させる形で行った。この時、基準点には振幅が固定された基準刺激が、測定部位には振幅が調整可能な刺激が提示された。今回は基準点として鎖骨を用いた。

実験開始時に実験者が2つのスピーカを被検者の鎖骨(基準点)と測定部位に押し当て、刺激を繰り返し交互に提示した。

被検者は鎖骨(基準点)を刺激された際に知覚する身体内部の主観的な振動強度が、測定部位を刺激された際に身体内部で知覚される振動強度と等しくなるように測定部位の振動強度を調節した。調節は目盛りが見えないようにテープでマスキングしたアンプのボリュームノブで行わせ、鎖骨(基準点)刺激時と測定部位刺激時に身体内部で知覚される振動強度が等しくなったと感じた時の測定部位のスピーカの駆動電圧値を計測した。これを1試行とし、測定部位ごとに6試行、被検者1人に対して36試行を行った。尚、各試行開始時、測定部位に提示される振動振幅の初期値は0であった。

実験は被検者3人(22~23歳、男性3人)で行った。服の厚みによる提示振動強度への影響を考慮し実験は上半身裸の状態で行った。また、刺激提示装置駆動時のノイズによる影響を避けるため実験を通じて被検者にはホワイトノイズが提示された(図3)。



図3 実験の様子

## 2.5 実験結果

図4は鎖骨(基準点)に基準刺激を提示したスピーカに流れる電圧を100とした時に、各測定部位で身体内部に生じる刺激強度が等しいと知覚された際のスピーカの電圧の割合を測定部位ごとにまとめたものである。縦軸はスピーカに印加した電圧の割合を示し、横軸は各測定部位を示す。エラーバーは標準偏差を示す。

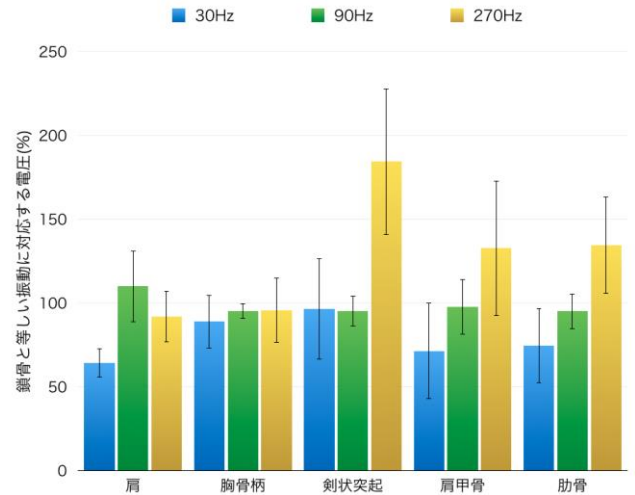


図4 各骨部位における電圧の割合

実験結果より270Hzにおいて、鎖骨に振動を提示したときに比べ、剣状突起、肩甲骨、肋骨に振動を提示した場合、身体内部に生じる振動の主観的強度は著しく弱まることが明らかとなった。一方、肩の骨と胸骨柄に振動提示した際は、身体内部に生じる振動強度は鎖骨に振動提示した時とほぼ同等であった。このことより、骨伝導を用いて効率的な振動提示を行うことが可能な部位として鎖骨、肩の骨、胸骨柄が考えられる。

しかしながら実験を通じて肩の骨、胸骨柄への振動提示には実用上の制約が生じることが明らかとなった。肩の骨は腕をおろした状態では突起するが、腕をあげた時など肩関節の動きに応じて突起の位置が変化するため、腕を動かすと振動子と骨との間にずれが生じた。また胸骨柄においても、服を着た状態では布の厚みやよじれによって骨と振動子の間にずれが生じ、的確な振動提示が困難であった。そのため実験は上半身裸の状態で行い、結果としての的確な位置に振動を提示することが可能であったが、実際には服を着た状態で使用するため、今回の実験と同様の結果を得ることは難しいと考えられる。

以上のことから、身体内部に振動を効率的に提示可能かつ服を着た状態でも襟元から露出できる鎖骨に対して振動提示を行うことが望ましいと考えられる。

## 3. おわりに

本研究は、身体触覚提示デバイスの非拘束性、軽量・小型化、着脱の容易さを実現するため、ユーザの骨を介して身体内部の広範囲に振動を提示することを目的としている。予備実験により骨を介して身体内部に振動を提示可能であることが判明したため、本稿では身体内部の広範囲に振動を伝達可能な骨部位の選定を行った。選定の結果、鎖骨が身体内部への振動伝達の効率性と振動子設置の容易さを兼ね備えた部位であることが明らかになった。

現在鎖骨に対して振動提示を行う首掛け式のデバイス

を試作中である。今後は本デバイスを用いて体内への振動提示が臨場感に寄与するかを検討する予定である。

### 参考文献

- [1] P. Lemmens, F. Cromptvoets, D. Brokken, J. van den Eerenbeemd, and G.-J. de Vries. A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing. Proceedings of the IEEE World Haptics Conference, pp. 7-12, 2009.
- [2] M. Karam, C. Branje, G. Nespoli, N. Thompson, F. A. Russo, and D.I. Fels. The emoti-chair: an interactive tactile music exhibit. Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI) Extended Abstracts, pp. 3069-3074, 2010.
- [3] Y. Kurihara, M. Koge, R. Okazaki, H. Kajimoto : Large-Area Tactile Display Using Vibration Transmission of Jammed Particles. IEEE Haptics Symposium, 2014.
- [4] T. Kosaka, H. Misumi, T. Iwamoto, R. Songer, J. Akita : “Mommy Tummy” A pregnancy experience system simulating fetal movement. SIGGRAPH, 2011.
- [5] M. Katoh, S. Nakamura, S. Ikeno, T. Kikuchi, S. Kudo, H. Kajimoto: ViVi-EAT: Augmentation of Food-flowing Sensation using Tactile Feedback, Laval Virtual ReVolution 2013.
- [6] 渡辺, 浜田. 骨伝導による音響信号生成に関する基礎検討. 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 105(136), pp. 19-24, 2005.
- [7] 坂本, 鈴木, 川瀬, 小林. 一側難聴者への適用を考慮した骨伝導補聴器に関する研究. Audiology Japan 49(5), pp. 499-500, 2006
- [8] 石光, 北風, 土伏, 柳川, 福島. 体内伝導音認識システム構築のための基礎的検討. 電子情報通信学会技術研究報告. EA, 応用音響 102(171), pp. 25-28. 2002.