

## 身体で“聴く”静音型ウェアラブル音響で「音のない重低音」体験を実現！

筋肉への電気刺激と低周波振動を組み合わせた携帯型の静音サブウーファーを開発し、VR（仮想現実）や日常の音楽体験で深い低音の身体感覚を実現しました。騒音を抑えつつ、没入感やリズム認知で従来のスピーカーと同等の効果が得られ、音響没入体験の新たな可能性を示しました。

VR（ヴァーチャルリアリティ＝仮想現実）やオンラインライブの普及により、自宅でも臨場感ある重低音体験が求められるようになりました。それに伴い近年は、音だけでなく、振動や体への感覚を組み合わせ、よりリアルな体験をつくる技術が進んでいます。

本研究チームはこれらの技術の中でも、筋肉に微弱な電気を流すことで収縮を引き起こす筋電気刺激（EMS）と低周波振動を組み合わせることで、低音を強調して再生する、携帯型で静音性に優れたサブウーファーシステムを開発しました。

このシステムでは、VR 空間において、スピーカーを使わずに身体で低音を感じる音響体験が可能になります。その効果を確認するため、24 人の参加者を対象とした実験を行いました。実験では、EMS の刺激強度を参加者にとって快適かつ明瞭に感じられるよう事前調整したうえで、ヘッドマウントディスプレイとヘッドフォンを装着して VR ライブ映像を体験してもらいました。

その結果、この新システムは、従来のスピーカーやサブウーファーと同等のリズム・音の厚みを伝えながらも、周囲への騒音を大幅に抑制できることが確認できました。また、EMS に慣れてくることで、より自然に、より高い没入感が得られることも明らかになりました。

これにより、本技術は VR ライブなどのエンターテインメント領域にとどまらず、日常的な音楽鑑賞においても新しい体験をもたらす可能性を持つことが示されました。

### 研究代表者

筑波大学システム情報系

善甫 啓一 准教授

## 研究の背景

近年、VR<sup>注1)</sup>やオンラインライブの普及により、自宅でも臨場感ある音楽体験が求められるようになりました。中でも、ライブ会場で感じるような重低音による「身体で感じる音」は、没入感の鍵となる要素です。しかし、従来のサブウーファー<sup>注2)</sup>は大掛かりな設備が必要で、大音量による騒音も生じることから、家庭環境では導入が困難でした。そこで本研究では、筋電気刺激 (EMS)<sup>注3)</sup>を用いて身体に直接低音の感覚を伝える、静音かつ可搬性に優れた新たな刺激提示手法を提案することとしました。

## 研究内容と成果

本研究では、筋電気刺激 (EMS) を活用して深い低音による身体振動を模倣し、音を外部に出さずに臨場感ある音響体験を提供する「EMS 静音サブウーファー」システムを開発しました。

このシステムでは、音楽信号から低周波成分を抽出するローパスフィルタ (72Hz 以下) と、バスドラムなどの打撃音を検出するキックディテクター (180Hz 以下) を組み合わせ、タイミングと振幅情報を持つ信号を生成します。これを EMS 信号として変換し、腹部 (腹直筋・腹斜筋) に貼付したパッドへ送信することで、低音の「響き」や「打撃感」を筋肉への刺激として提示します。信号処理をリアルタイムで行うことで、継続的な低音に埋もれず、打点ごとの明瞭な刺激提示が可能となっています。

ただし、EMS 刺激の知覚は音の刺激に比べてわずかに遅延します。9 人の被験者に対し、音や EMS のリズムに合わせて机を叩く実験を行い、EMS による時間遅れを定量化したところ、約 40 ミリ秒 (100 分の 4 秒) であることが分かりました。このため、次に行った VR ライブの評価実験では、音声と映像の再生を 40 ミリ秒遅延させ、視聴覚・触覚の感覚同期を実現しました。

評価実験では、ヘッドマウントディスプレイ (HMD)<sup>注4)</sup>とヘッドフォンを装着した 24 人の参加者に、①提案システム、②従来のスピーカー+サブウーファー、③振動デバイス (Hapbeat) という 3 条件下で VR ライブ映像を体験してもらいました。参加者は条件ごとに楽曲 3 種 (ロック・ポップ・クラシック) を聴取し、「没入感」「リズム精度」「一体感」「快適性」などを 7 段階で評価しました。その結果、提案システムは従来の振動デバイスと同等かそれ以上の評価を獲得し、特に使用回数を重ねることで評価が有意に上昇する「慣れ効果」も観察されました。また、本技術は 2022 年に開催された国際会議「UIST2022」において、ブース形式のデモンストレーションとして一般公開されました。来場者が自身のスマートフォンや音楽プレイヤーを用いて好みの音楽を再生し、その低音に連動した EMS 刺激をリアルタイムで体験できる構成とすることで、VR に限らず、日常的な音楽鑑賞への応用可能性や装着時の快適性についても多面的なフィードバックを得ることができました。

## 今後の展開

本研究チームは、EMS 信号と音響信号の知覚タイミング差を補正するキャリブレーション<sup>注5)</sup>機能の強化や、複数の周波数帯域を個別に制御できるマルチバンド EMS を今後導入することを検討しています。また、ユーザーの体格や皮膚感度、音楽ジャンルに応じて EMS 刺激の強さやタイミングを最適化する調整機構の開発により、より高精度で快適な刺激提示が実現できると期待されます。将来的には、映画やゲーム、舞台芸術などの分野への応用はもちろん、自宅での音楽鑑賞やウェアラブル音響デバイスとしての製品展開も視野に、さらなる改良と最適化を進めていきます。

## 参考図

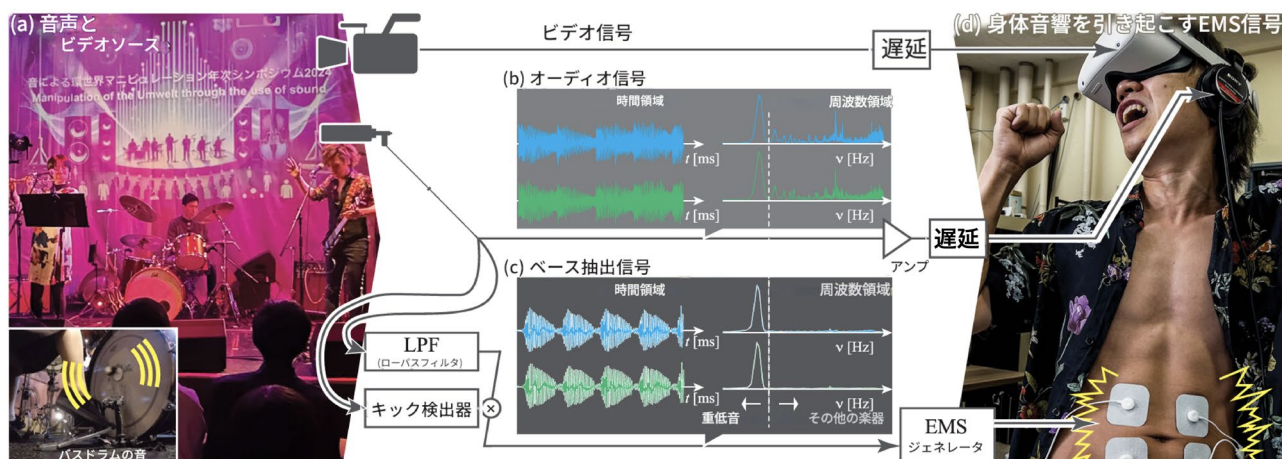


図1：EMS サイレントサブウーファーシステムの概要

EMS を用いて着用者の筋肉を制御することで、コンサートホールで体験できるベースドラム、ベースギター、その他の低音の音響感覚をユーザーに伝える。(a) 演奏者のパフォーマンスの音源 (b) から低音成分を抽出し (c)、それをEMS信号として変換して、パフォーマンスメディアを視聴している着用者にサブウーファーとして音を提供する (d)。ヘッドマウントディスプレイ (HMD) やヘッドフォンと組み合わせることで、仮想ライブ空間にいるかのような臨場感を味わうことができる。

## 用語解説

### 注1) VR (バーチャルリアリティ)

ヘッドマウントディスプレイなどを用いて、仮想の映像・音響空間に没入できる技術。本研究では仮想ライブ空間を体験する手段として使用される。

### 注2) サブウーファー

音楽の中でも特に低音（重低音）を強調して再生するスピーカー。通常は大音量で振動を生むが、本研究では「音を鳴らさないサブウーファー」として、EMSで再現する。

### 注3) 筋電気刺激 (EMS)

筋肉に微弱な電気を流すことで収縮を引き起こす技術。医療やリハビリにも用いられている。本研究では音の振動を身体に伝える手段として利用している。

### 注4) ヘッドマウントディスプレイ (HMD)

頭部に装着するディスプレイ。ユーザーの視界を完全に覆い、仮想空間への没入感を高める。VR体験に不可欠な機器である。

### 注5) キャリブレーション

機器やシステムの出力が使用環境や個人差に応じて正確かつ快適となるよう調整する作業。

#### 掲載論文

【題 名】 Myoelectric Stimulation Silent Subwoofer Which Presents the Deep Bass-Induced Body-Sensory Acoustic Sensation

(筋電気刺激による静音サブウーファー：重低音の身体感覚的音響体験の提示)

【著者名】 Keiichi Zempo<sup>1</sup>, Ryo Kashiwabara<sup>2</sup>, Naoto Wakatsuki<sup>3</sup>, Koichi Mizutani<sup>4</sup>

<sup>1</sup>筑波大学システム情報系 知能機能工学域

<sup>2</sup>筑波大学理工学群工学システム学類

<sup>3</sup>筑波大学システム情報系 知能機能工学域

<sup>4</sup>筑波大学システム情報系 知能機能工学域 (名誉教授)

【掲載誌】 IEEE Access

【掲載日】 2025 年 4 月 29 日

【DOI】 10.1109/ACCESS.2025.3565283

#### 問合わせ先

【研究に関すること】

善甫 啓一 (ぜんぼ けいいち)

筑波大学システム情報系 知能機能工学域 准教授

URL: <http://www.xpercept.aclab.esys.tsukuba.ac.jp>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: [kohositu@un.tsukuba.ac.jp](mailto:kohositu@un.tsukuba.ac.jp)