



# スマートフォンで利用可能な 高臨場感振動変換法を用いた体感付き動画の提案

Proposal of Haptic Enhanced Videos Using High-Reality Vibration Conversion Methods  
Available on Smartphones

星裕也<sup>1)</sup>, 昆陽雅司<sup>1)</sup>, 田所諭<sup>1)</sup>

Yuya HOSHI, Masashi KONYO, and Satoshi TADOKORO

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, konyo@rm.is.tohoku.ac.jp)

**概要:** 近年スマートフォンに搭載されている LRA 型振動子では、周波数応答が限られるため任意の音信号をそのまま振動刺激として提示することは難しい。これまで我々が提案してきた高周波振動の感覚等価変換手法と低周波振動感の代替提示法を活用することで、スマートフォン上で任意の音信号を元にした高臨場感の振動提示が可能となった。本稿では、スマートフォン上での振動提示法の提案と評価を行う。また、本機能を活用した体感振動付きの動画視聴アプリを開発し、その有用性を検証する。

**キーワード:** 振動提示, スマートフォン, ISM

## 1. はじめに

スマートフォンなどのモバイル端末上でリアリティの高い振動提示を行うことは、視聴体験の向上や、ユーザーインターフェースの向上などの観点から求められている。音信号を触覚刺激として用いることでリアリティの高い多様な振動刺激を提示することができると知られているが、搭載されている LRA 型振動子の周波数応答が限られているため、スマートフォン上で音信号をそのまま振動刺激として用いることは困難である。例を挙げると iPhone が提供する振動制御 API で提示することのできる振動周波数は約 80–230 Hz であり、従来の音信号が持つ高周波域・低周波域の振動を提示することはできない。

筆者らの研究グループは前述した高周波域・低周波域の振動を振動子が提示可能な周波数帯に置き換えて提示する方法を提案してきた。高周波振動について、山口らはヒトの高周波振動に対する知覚特性に着目した感覚等価変換手法 Intensity Segment Modulation (ISM) を提案した [1]。10–20 Hz とした低周波振動について、筆者らはパルス波を入力した時に生じるボイスコイルの残響振動を用いることで低周波振動感を代理提示する手法を提案した [2]。これらの振動提示法を併せて用いることで、LRA 型振動子が搭載されているモバイル端末上で本来提示できない高域の周波数帯の振動体感提示が可能となり、任意の音信号を元にした高臨場感の振動提示が実現できると考えられる。

前報 [3] では、iPhone 上での ISM 変換振動提示手法を提案した。本稿では iPhone 上で正確な ISM 振動提示をするために iPhone の振動特性のさらなる調査をするとともに、任意の低周波振動に対する振動提示法を提案する。また、本手法を適用したアプリケーションとして体感振動付きの動

画視聴アプリを提案し、大規模なアンケート調査によって有用性の検証を行う。

## 2. スマートフォンにおける高周波振動の提示方法

### 2.1 高周波振動の感覚等価変換手法 ISM

ISM [1] は、式 (1) に定義されるパチニ小体の高周波振動に対するインテンシティ知覚特性 [4] と、包絡線知覚特性 [5] に基づいた変換手法である。元の音源のインテンシティをセグメントごとに算出し、100 Hz 以下程度のインテンシティの変動を保持することで、高周波成分の触感を保ったまま 150–300 Hz とした比較的low周波の単一の振幅変調波に変換することができる。

$$I(f) = \left[ \left( \frac{A(f)}{A_T(f)} \right)^2 \right]^{\alpha(f)} \quad (1)$$

ここで、 $A(f)$  は周波数  $f$  における振動の振幅、 $A_T(f)$  は  $f$  における振動検出閾の振幅、 $\alpha(f)$  は周波数依存性を表す指数パラメータである。ISM では、周波数と振幅を制御することで元の音信号と同じインテンシティを振幅変調波によって感覚として等価な振動を提示できる。

### 2.2 スマートフォンにおける ISM 振動提示

ISM を用いることで高周波成分の振動を単一の周波数の振幅変調波によって提示することができる。iPhone は Apple が提供する振動制御 API, Core Haptics を利用することで振動の振幅や周波数をパラメータを介して時系列的に指定することができ、これにより iPhone 上で振幅変調波の提示が可能である。Core Haptics は iPhone8 以降の端末で利用可能である。そのため、本稿では iPhone8 を用いることとした。

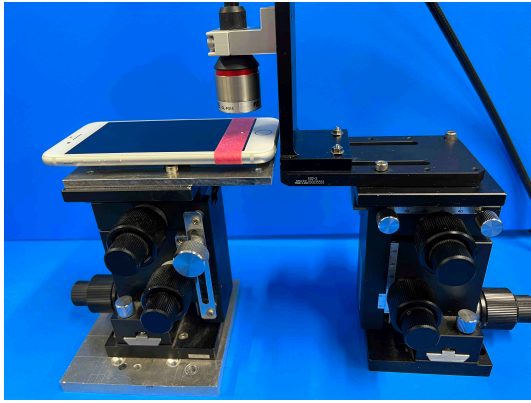


図 1: iPhone の振動計測の様子

Core Haptics は振幅に対応するパラメータとして Haptic Intensity, 振動周波数に対応するパラメータとして Haptic Sharpness を提供されており, それぞれ 0-1 の範囲で指定することができる。ただし, パラメータと実際の周波数や振幅に関する仕様は公開されていないため, 実験により同定する必要がある。なお, Core Haptics において振動提示のためのイベントは Continuous モードと Transient モードに分類される。本稿では, Transient モードを利用した。

計測は図 1 に示すように, iPhone 8 表面の振動をレーザ変位計 (KEYENCE CL-P015G) を用いて計測した。スマートフォン底面は防振用シリコンゲルによって固定した。計測手順として, Haptic Sharpness を周波数が 200 Hz となるように指定し, 振動を 5ms ごとに指定することで振幅変調波を提示する。Haptic Intensity を 0-1 の区間で 0.1 ずつ, それぞれ一定時間の振動計測を行った。

振幅の計測結果と, 測定結果を元に最小二乗法によって式 (2) にフィッティングした関数を図 2 に示す。20 回の測定の平均値を測定値として用いており, 図 2 では測定した変位を振幅に変換している。

$$A = Kb^{e^{-cI}} \quad (2)$$

ここで,  $I$  は Haptic Intensity パラメータ, 係数はそれぞれ  $K=3.480$ ,  $b=7.011 \times 10^{-3}$ ,  $c=4.411$  である。

$$I = -\frac{\log\left(\frac{\log A - \log k}{\log b}\right)}{c} \quad (3)$$

式 (3) は式 (2) の逆関数である。この式を用いることで, 提示したい振幅から, 指定すべき Haptic Intensity を求めることができる。これらと式 (1) を組み合わせることで, 元の音信号のインテンシティを iPhone 上で提示することが可能となる。

### 2.3 スマートフォンにおける ISM 振動の評価

実際にどの程度の精度でインテンシティを提示できているか評価を行うため, 計測実験を行った。

先の振幅の測定から, 測定時の固定条件において生成可能なインテンシティの範囲は式 (1) より 0-23 であることが

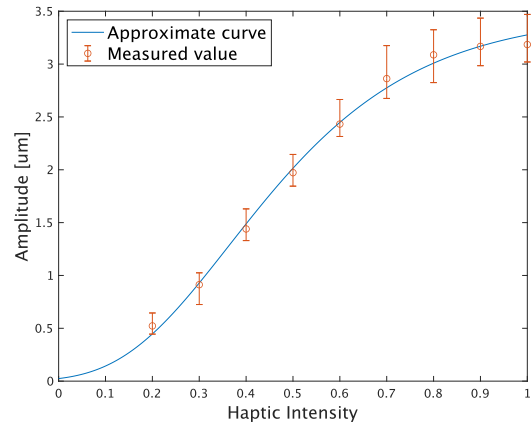


図 2: Haptic Intensity と振動振幅の計測

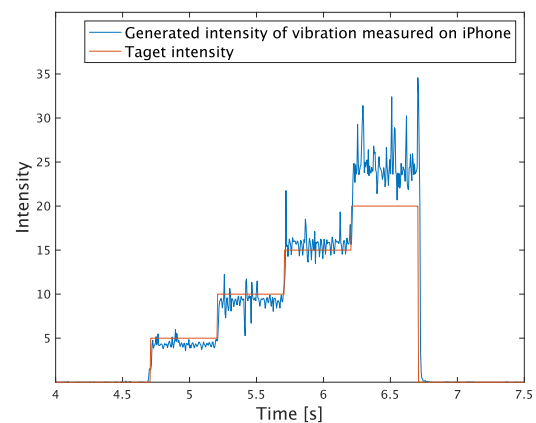


図 3: インテンシティ提示の評価

求まる。そこで, インテンシティが 0-20 の範囲で階段状に変化する振動ファイルを作成し, iPhone の振幅系列測定した。測定した振幅系列からインテンシティを逆算することで, 目的のインテンシティが提示できているか評価を行う。

結果を図 3 に示す。なお, 測定時の固定条件により振幅が変動するため, パラメータを同定した際の計測値と一致するように変位を定数倍した後, インテンシティを算出した。

結果の図より, インテンシティが大きくなるにつれ, 目的のインテンシティとのズレが大きくなるような傾向が見られた。これより, 同定した式 (3) では 15 程度以下のインテンシティを正確に提示できていることが分かる。

## 3. スマートフォンにおける低周波振動の提示方法

### 3.1 低周波振動感の代理提示法

低周波振動は臨場感の向上などの観点から提示することが求められているが, LRA の特性上低周波振動の提示は難しい。筆者らはこれまでボイスコイル型振動子にパルス波を入力することで生じる残響振動によって, 入力した周波数よりも低周波の体感が提示できる現象を報告している [2]。

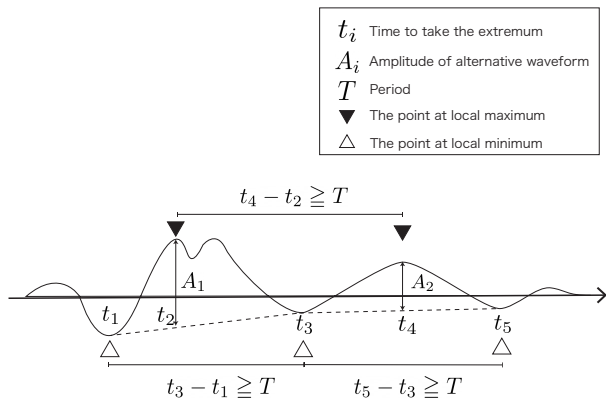


図 4: 任意波形への変換法適用の例

前報ではこの現象を 10 Hz や 20 Hz といった単純な正弦波に対して 60–100 Hz の代替波形を入力することで低周波の体感が提示できていることを報告している。本稿では本手法を任意の音信号に適用する手法を提案し、スマートフォン上において音信号の低周波成分の体感提示を試みる。

本稿では iPhone 上で提示可能な下限の周波数である 80 Hz のパルス波を用いる。

3.2 任意波形に対する適用手法

本稿で適用した提示法の概要を図 4 に示す。本手法の任意波形への適用手法として考慮すべき要素として、振幅の取り方、パルス波の周期の取り方がある。

初めに振幅の取り方について、本稿では低周波振動の相対的な変位の変化を代替波形の振幅として用いた。具体的には極小値間を結ぶ直線に、極大値から垂線を下ろした交点までの距離を代替波形の振幅とすることとした。なお、隣接する極大値あるいは極小値は、16.6 ms (= 60 Hz) 以上の間隔を取るようにした。

4. 体感付き動画視聴アプリケーション

本研究では、上述した高周波・低周波の振動提示法を適用することで、スマートフォン上で体験可能な体感付き動画を開発した。体感付き動画では、動画の音信号を元に振動を生成し、動画と同期して提示する。コンテンツの例として、図 5 に示すように音楽や料理、DIY などを想定しており、動画内の体感をスマートフォン上に提示することで、自然で臨場感の高い動画視聴体験を提供することができると思われる。

体感振動は動画から音信号を抽出することで生成される。100 Hz を高周波・低周波の境界として、それぞれに対し、提案する振動提示手法を適用した。本稿では、より適切な体感を付与するためにコンテンツの音源ごとにインテンシティの調整や、高周波成分と低周波成分の合成にゲインによる調整などを行った。



図 5: 体感付き動画のイメージ図。左から順に音楽、料理、DIY の例（実際に使用した動画とは異なる）

表 1: 質問の項目

Q1	迫力・臨場感があるか
Q2	音に合った自然な体感か
Q3	映像と体感で連動性があるか
Q4	振動によってコンテンツをより楽しめたか

5. 体感付き動画の評価

5.1 実験概要

提案する体感付き動画視聴アプリケーションを評価するため、大規模なモニター調査実験を行った。被験者をアプリのモニター調査としてクライドソーシングサービスを用いて募集した。被験者は男性 54 名、女性 46 名、無回答 1 名の 101 名であり、年代は 20 代 23 名、30 代 42 名、40 代 22 名、50 代 11 名、60 代以上 3 名である。被験者には謝金を支払った。

実験手順として、被験者にアプリをダウンロードさせ、事前に用意した 12 種の体感付き動画を全て視聴させた。その後アンケートに回答させた。

コンテンツは音楽やダンスなど、音楽と振動が同期して提示されるコンテンツ 6 種（以降音楽コンテンツ）と、料理や DIY といった、環境音を収録した元に振動を生成・付与することで動画内の体感を再現したコンテンツ 6 種（以降収録音コンテンツ）の 2 つジャンルの動画をそれぞれ用意した。コンテンツは一般の動画共有サービスからダウンロード可能なものを、視聴技術検証を目的とする著作権法 30 条の 4 の適用範囲内で使用した。

アンケートにおいて、まず初めに体感付き振動の満足度について 5 段階のリッカート尺度（5: 大変満足, 4: やや満足, 3: どちらともいえない, 2: やや不満, 1: 不満）で回答させた。その後音楽コンテンツと収録音コンテンツについて、それぞれ表 1 に示す質問の項目を 7 段階のリッカート尺度（7: 非常にそう思う, 6: そう思う, 5: ややそう思う, 4: どちらともいえない, 3: ややそう思わない, 2: そう思わない, 1: 全くそう思わない）で回答させた。

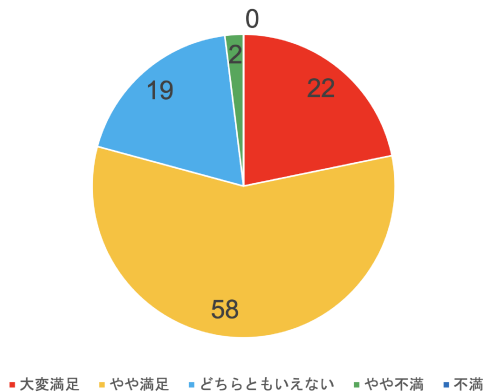


図 6: 実験結果 体感付き動画の満足度

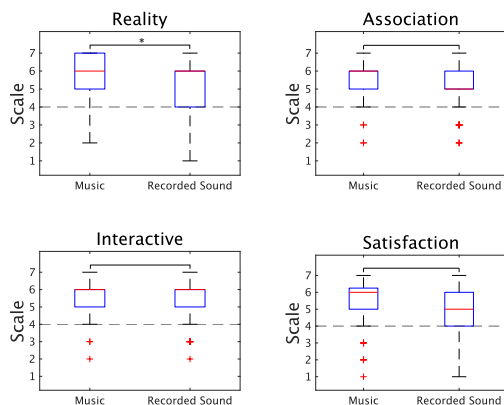


図 7: 実験結果 詳細項目

## 5.2 実験結果

実験結果を図 6 と図 7 に示す。体感付き動画の満足度について、79.2%の被験者が大変満足もしくはやや満足と答えた。表 1 のすべての項目について、中央値が 5-6 点の間となった。音楽コンテンツと収録音コンテンツを比較すると、迫力・臨場感の項目のみ有意差があり、音楽コンテンツが収録音コンテンツよりも高い結果となった。

## 5.3 考察

結果から、提案手法は動画から抽出した音信号から多くの被験者に満足感の高い体感提示ができていていることが分かる。

収録音コンテンツは接触音などに基づいて振動を生成しているため、音楽コンテンツに比べてより自然な体感を提示できると考えていたが、2 群間に自然さの項目で有意差はなかった。この要因として、収録音から生成・付与した体感振動が自身の触記憶と多少異なることと、体感振動をスマートフォンを把持している手にしか提示できていないことが関係しているのではないかと考えられる。

## 6. むすび

本稿ではスマートフォン上での高臨場感振動提示を実現し、これを活用した体感付き動画視聴アプリを提案、体感付き動画の有用性を確認した。提案手法は既に投稿されている動画に体感振動を付与することで視聴の満足度を高めることができ、特別な装置を必要としないため、普及性は高いと考えられる。今後は現在手動で行っているインテンシティの調整の自動化など、体感付与技術のさらなる向上を目指す。

**謝辞** 本研究開発は、JST, SCORE 大学推進型 (拠点都市環境整備型), JPMJST2075 の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] Yamaguchi, K., Konyo, M. and Tadokoro, S.: Sensory Equivalence Conversion of High-Frequency Vibrotactile Signals using Intensity Segment Modulation Method for Enhancing Audiovisual Experience, *IEEE Transactions on Haptics* (2021).
- [2] 星裕也, 昆陽雅司, 田所諭: 2P2-B12 ボイスコイル型振動子を用いた低周波振動感の代替提示法 (触覚と力覚), ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 (2022).
- [3] 星裕也, 昆陽雅司, 田所諭: PA2-3 スマートフォンのための知覚インテンシティを用いた高臨場感振動の生成, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2021 (2021).
- [4] Bensmaïa, S., Hollins, M. and Yau, J.: Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system: A psychophysical model, *Perception Psychophysics*, Vol. 67, No. 5, pp. 828-841 (2005).
- [5] Cao, N., Konyo, M., Nagano, H. and Tadokoro, S.: Dependence of the Perceptual Discrimination of High-Frequency Vibrations on the Envelope and Intensity of Waveforms, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 20840-20849 (2019).