



# VR デバイスでの知覚インテンシティを用いた 高臨場感振動生成法の提案

## 第 1 報 感覚等価変換技術による標準振動 SDK を用いた 高周波振動体感の再現

五十嵐大登<sup>1)</sup>, 昆陽雅司<sup>1)</sup>, 田所諭<sup>1)</sup>

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, VR においてリアルな触覚体験が求められている. 本研究では, VR デバイス上で高周波振動を低周波の振幅変調波に変換する Intensity Segment Modulation (ISM) 技術を用いて, 音声連動の高臨場感振動刺激を生成することを検証した. また, 他のデバイスと VR デバイスにおける ISM 変換振動の体感を比較し, VR デバイスにおいても ISM が有効であるかを評価した.

**キーワード:** 振動提示, VR デバイス, ISM

### 1. 緒言

近年, VR デバイスにおける振動刺激のリアリティを向上させる必要性が高まっている. 特に, 高周波振動を含む音響信号を触覚提示に利用することで, よりリアルな体験を再現し没入感を高めることが期待される. しかし, 振動子の応答限界や騒音の問題から, 高周波成分は除去されており, 数百 Hz を超える振動は標準 SDK では提示することができない.

本研究では, 高周波を含む振動を低周波の振幅変調波に変換する Intensity Segment Modulation (ISM)[1] を用いることで, 元の高周波の体感を保ちながら, 標準振動 SDK で再生可能な信号に変換する. 星らは同様の試みを iPhone の SDK に適用して効果を確認している [2]. 本研究では, VR デバイスのコントローラを対象に ISM の適用を試みる.

具体的には, ISM で利用する一定周波数の振幅変調波を特定の VR デバイスで提示できるかを, 振動子の振る舞いを計測することで検証した. また, ISM により高周波振動の振動を標準 SDK で再生可能な低周波帯の振動に変換した際の振動体感の主観評価を行い, VR デバイスにおいても元の高周波の体感を維持して高臨場な触覚が再現できるかを検証した.

### 2. Intensity Segment Modulation の概要

ISM[1] は, 高周波振動に対するヒト振動知覚の周波数依存性と変動検出特性を考慮した知覚インテンシティを算出し, その知覚インテンシティを保ちながら振動波形を別の一定周波数 (150–300 Hz 程度) の振幅変調波に変換する手法である. 周波数は振動子の周波数応答に合わせて選択でき, 高周波成分の触感を維持したまま振動子が再生可能な振動波形に変換することが可能である. VR デバイスのコントローラでは, 帯域の限られた LRA 型振動子が利用されて

おり, ISM を利用することで高周波の体感を再現できると期待される.

#### 2.1 ISM による変換の手順

入力信号に対し時分割したセグメントの信号をフィルタ処理をする. 100 Hz 以上の高周波信号について周波数ごとに分解し, 分解した基底信号の知覚インテンシティの総和を求める. 再生する際は, 使用する振幅変調波のキャリア周波数に合わせて知覚インテンシティを再現するように振幅を決定する. ただし, 多くの振動デバイスの標準 SDK では振動波形を直接指定することはできないため, SDK で利用可能なパラメータに基づき, 振幅変調波を生成することが必要となる.

### 3. コントローラの振動子の特性の計測

#### 3.1 利用する VR デバイス

本稿では, VR 環境として Meta 社の Meta Quest3 と Meta Quest Touch Plus コントローラを用いる. 選定理由として, 搭載している振動子の質が高く, 音声から振動データを生成, 調整が可能である Meta Haptics Studio と, その振動データを提示できる共通 SDK である Meta XR Haptics SDK が提供されているためである. SDK で扱う振動データで指定できるパラメータとして, 振幅に対応する Amplitude と 振動周波数に対応する Frequency がある.

#### 3.2 計測方法

Meta Quest Touch Plus コントローラにおける各種パラメータの振動子の振る舞いを測定し, 計測結果をもとに ISM によって変換した振動を提示可能であるか, 生成される振動を計測することで検証する.

3 軸の圧電形加速度検出器 (昭和測器 MODEL-2366) を振動子が内蔵されているコントローラの握り手位置に取り付けて計測を行った. 拘束条件として, コントローラの

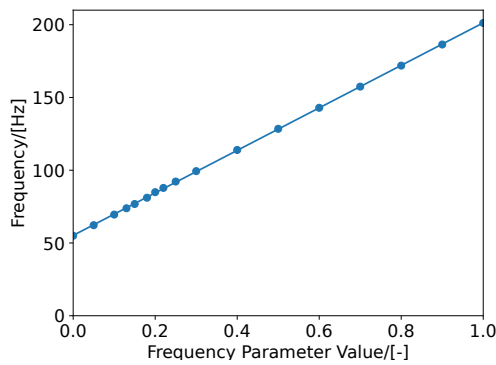


図 1: Frequency と生成周波数の計測

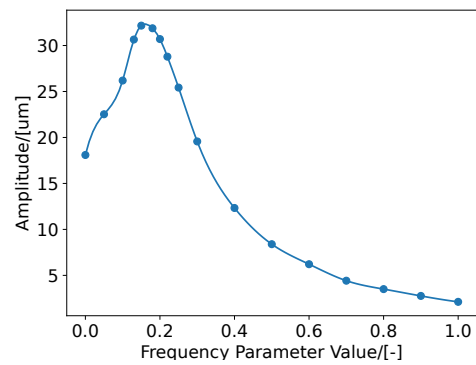


図 2: Frequency と振幅の計測

スティック部分にひもを通し免振台に固定された支えにぶら下げた状態で計測を実施した。本稿の振動の分析は 3 軸の中で最も振幅が大きく計測された掌底方向の加速度を使用した。

### 3.3 Frequency と生成波形の関係

まず、Frequency パラメータと生成される周波数の関係について測定を行った。測定方法として、Amplitude のパラメータを固定し、Frequency を 0 から 1 までの複数の値に設定し、一定時間振動させ、その加速度データに FFT 処理を施して最大となる周波数を求めた。測定結果と最小二乗法により求めた一次の近似曲線を図 1 に示す。Frequency のパラメータに対し実際の振動の周波数は約 55Hz から約 200Hz まで線形に増加する関係があることが分かった。

また、Frequency のパラメータと生成振幅の関係について測定した。測定方法として、Amplitude のパラメータを固定し、Frequency のパラメータを 0 から 1 までの複数の値に設定し、一定時間振動させ、加速度波形の振幅の平均値を測定した。波形が正弦波であると仮定して、加速度振幅を前節で求められた各 Frequency に対する角周波数で 2 回割ったものを振幅としてプロットした。図 2 に測定結果と散布図間を 3 次スプライン補完した結果を示す。振幅は Frequency が約 0.15、生成周波数で約 80 Hz 付近で極大となり、その地点から周波数が離れるほど振幅は小さくなった。なるべくインテンシティを大きくしながら高周波を提示するため、本稿では ISM 変換を行ううえで下限となる 150 Hz をキャリア周波数として選定する。

### 3.4 Amplitude と生成振幅の関係

Amplitude のパラメータと生成振幅の関係を測定した。測定方法として、Frequency のパラメータを 150 Hz に対応する 0.65 に固定し、Amplitude のパラメータを 0 から 1 までの複数の値に設定し、一定時間振動させ、波形の振幅を前節と同様に測定した。図 3 に測定結果と最小二乗法により求めた 1 次の近似曲線を示す。結果より振幅は Amplitude のパラメータと比例的な関係があることがわかる。この計測をもとに目的の振幅を出すためのパラメータを決定する。

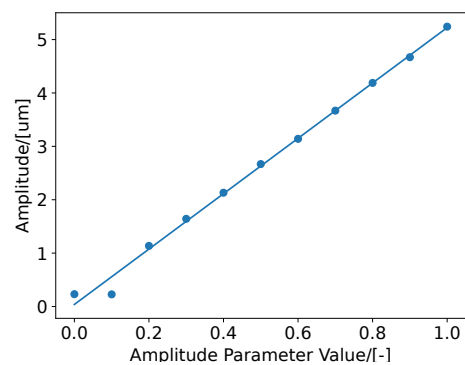


図 3: Amplitude と振幅の計測

## 4. 高周波変換の適用性の確認

前節の変換を音声ファイルに適用し、その振動を加速度センサで測定した。変換を行う元の波形は式 (1) で表されるハーモニック波形である。 $a$  は振幅、 $f_t$  はハーモニック波形のひとつ山が現れる周波数、 $f_e$  は包絡線周波数、 $f_c$  はキャリア周波数である、各パラメータは  $a = 0.5$ 、 $f_t = 2\text{Hz}$ 、 $f_c = 600\text{Hz}$  とし、 $f_e$  を 10, 50, 90, 100, 400 [Hz] に設定した 5 種類の波形を変換した。変換した波形を入力した結果を図 4 に示す。100 Hz 未満の包絡線情報が残っており、ISM で意図した変換が機能していることが確認できた。

$$f_{\text{harmonic}}(x) = a(1 - \cos(2\pi f_c t)) \cdot a(1 - \cos(2\pi f_e t)) \cdot a \sin(2\pi f_t t) \quad (1)$$

## 5. VR デバイスにおける触感の変化の評価

### 5.1 実験方法

高周波の音源から ISM によって生成した変換振動について、十分な応答性をもつ既存の振動子 (フォスター電機 ACTUATOR 639897) から出力した場合と、VR デバイスで出力した場合にどの程度触感が異なるか調査する。

実験では、音声情報と ISM 変換した情報を含むステレオ音源を準備し、それぞれの情報をイヤホンと振動子に入力した。またコントローラと振動の感じ方を近づけるために、

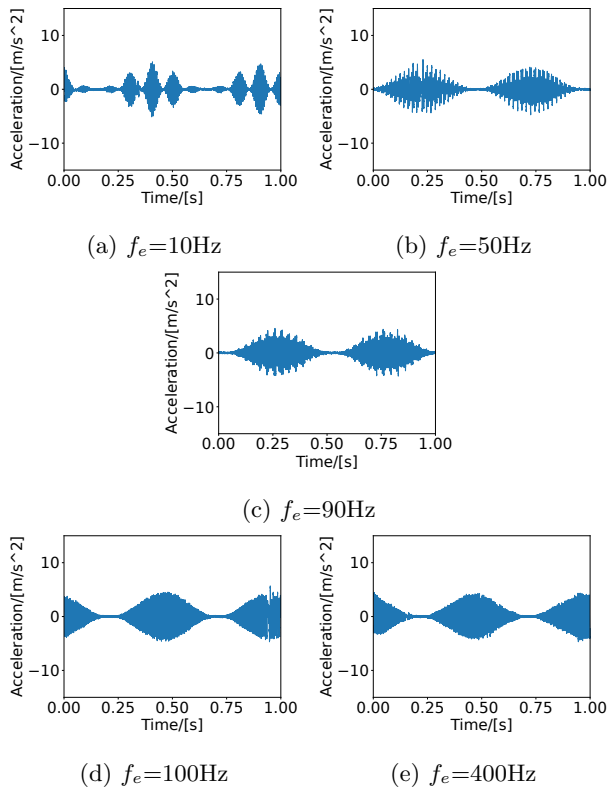


図 4: 高周波変換の適用性の確認

振動子を 3D プリンタで造形した樹脂製ケースに格納し、被験者に握る形で振動子を持つように指示した。VR デバイスにおける振動提示では Unity を用いて、コントローラの中指のボタンを押している間、音と振動が提示されるように設定し、振動を提示した。また、振動を提示する前に振動子と VR デバイスにおいて、150 Hz の正弦波を出力し、両者の振動と音声の体感の強さがほぼ同じになるように調整した。

振動刺激は高周波を含む音源としてのこぎりで木材を切る音 (saw)、手持ち花火の音 (fireWorks)、ガラスが割れる音 (glassCrash)、テープをはがす音 (tapeRip) を用意し、ISM によって振動を変換し、各条件で、振動と対応した音をイヤホンにより提示した。被験者には、ISM による VR デバイスの振動の触感の優劣を外付け振動子の場合と比較して、7 段階のリッカート尺度 (1: とても悪い, 2: 悪い, 3: 少し悪い, 4: 同等, 5: 少し良い, 6: 良い, 7: とても良い) で小数点第一位も指定可能として回答させた。被験者は 20 代男性 6 名である。

## 5.2 実験結果

実験結果を図 5 に示す。被験者の評価の中央値はどの振動でも 4: 同等付近となっており、VR コントローラでも十分な応答性をもつ振動子と同等の振動体感を提示できることが確認された。ただし、音源の種類によって回答に傾向の違いがみられた。

のこぎりとテープは、回答のばらつきが小さく、被験者の評価は一致した。のこぎりの評価が 3: 少し悪いの方に下

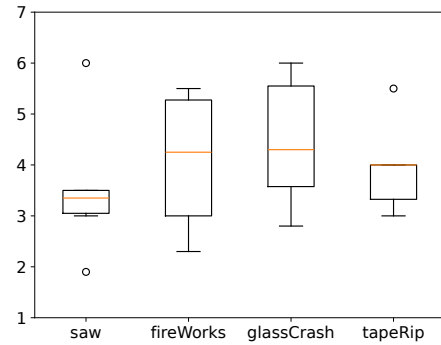


図 5: 各振動提示の評価

がった理由として、VR デバイスで Unity を介して振動を生成した際に音源とのずれが生じた可能性がある。のこぎりの音声は周期的にのこぎりを動かすタイミングで音が大きくなる音源であったため、他の音源では認知されなかった同期ずれが評価に影響を及ぼした可能性がある。

手持ち花火とガラスが割れる音に関しては、中央値では評価が 4: 同等以上を上回ったが、評価にばらつきが見られた。高評価に繋がった要因として、コントローラが手にフィットして小さな振動も感じとりやすかったことが挙げられる。一方、評価を下げた要因として、コントローラの方がダンパ性能が低く残響振動が残りやすいため、急激な変化を含む花火やガラス割れに対して振動を鈍く感じた可能性がある。

## 6. 結言

本研究では、汎用 VR デバイスで高周波帯域の振動体感を再生する方法として、ISM による感覚等価変換の利用を提案した。MetaQuest3 の標準振動 SDK を利用した際のコントローラの振動特性を調査し、ISM を適用することにより、十分な応答性をもつ振動子とほぼ同程度の体感で標準コントローラでも振動を再現することに成功した。一方、VR デバイスの方が急激な変化に対して鈍く感じる傾向や、音声と振動の同期ずれることが体感に影響を及ぼす可能性が示された。

## 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, 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, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2B1-2, 札幌市, 2022.