



# 振動分布を再現する腕輪型触覚デバイスによる動作体感の伝達

## 第 5 報：振動センサ・ディスプレイ統合による双方向化

松原亨<sup>1)</sup>, 和賀正宗<sup>1)</sup>, 昆陽雅司<sup>1)</sup>, 田所諭<sup>1)</sup>

Toru Matsubara, Masamune Waga, 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)

**概要:** 本研究では体感伝達技術として手首に伝播する振動に着目し、複数点で計測・提示を行うことで振動の空間分布を再現する腕輪型触覚デバイスの提案をしてきた。これまでに、高周波の知覚量を維持し、別の波形に変換する手法の効果、動作の異なる弁別、接触力の強弱の弁別における空間分布の再現の効果を確認してきた。本稿では振動センサと振動子を統合し、複数点で双方向に振動収集・提示が同時に行えるデバイスの開発を行った。筆者らが提案する人の知覚の特性に基づく高周波振動変換手法によりハウリング・ループバック問題を解決できることを示した。

**キーワード:** 振動触覚ディスプレイ, ウェアラブルデバイス, インタラクティブ

### 1. 緒言

近年、リモートワークや会議のオンライン化が進んでいる。それに伴い、技能教育に必要な体感など、映像や音声だけでは伝えることのできない触覚情報のリモート伝達技術の必要性が注目されている。

本研究では、身体に伝播する振動情報の利用に着目している。特に、接触時に発生する高周波の振動成分の再現に着目し、第 1 報ではこれまでに筆者らが提案する人の知覚の特性に基づく高周波振動変換手法 Intensity Segment Modulation(以下 ISM) の効果を確認した [1]。さらに、手先から手首位置に伝播する振動の空間分布の再現に着目し、手首を複数点で刺激する腕輪型触覚デバイスを提案した。これにより、単一の振動子だけでは再現できない接触部位や方位感の違いが提示できると期待される。第 2 報では把持したツールを複数の異なる動作で計測し、手首位置 4 点の振動を再現することにより、手先に 1 点だけ提示した場合に比べて、動作種類の弁別性能が向上することを報告した [2]。第 3 報では把持した棒の接触力の強弱に着目し、手首位置 4 点の振動を再現することで接触力の強弱の弁別が良くなる可能性を報告した [3]。第 4 報では周波数別の振動強度調整手法を提案し、調整の指標に人の知覚特性が考慮された知覚インテンシティを用いることの妥当性を示した [4]。

腕輪型触覚デバイスの技能教育などへの応用を考えると、指導者・学習者間の触覚を介した意思疎通のためにデバイスの双方向化が必要な場面が存在する。音声と映像の伝達において、電話やオンライン会議システムなどのコミュニケーションツールはリアルタイムに双方向に通信可能なツールである。しかし、振動触覚デバイスにおいて計測した振動をそのまま双方向に送信することは一般に困難である。その主な理由にハウリング問題が挙げられる。ハウリング

は振動子と振動センサの同時利用によってデバイスの持つ共振周波数周辺で発生する現象である。また、双方向化においては振動センサが動作由来の振動だけでなく近傍のバイブレータの振動を感知してしまうためループバックが生じる。山口らは ISM とフィルタ処理を用いることがハウリングおよびループバックの対策として有効であることを報告している。[5]。本稿では振動子と振動センサを統合した腕輪型デバイスを開発を開発し、ISM により双方向の体感伝達が実現可能か検証する。

本稿の目的は腕輪型デバイスで ISM とフィルタ処理を用いてハウリング・ループバック問題を解決することで双方向化が可能であることを示すことである。

### 2. 双方化の原理

#### 2.1 ハウリング・ループバックの発生

ハウリング問題は入力信号がアンプを通して増幅しながら出力され、それをセンサが拾い、増幅とループを繰り返すことにより起こる現象であり、デバイスの持つ共振周波数周辺で生じる。振動触覚デバイスにおいては、これまでバイブレータの振動が十分減衰した位置に振動センサを設置する必要があり、デバイスに振動子と振動センサの物理的距離を離すという制約があった。

#### 2.2 Intensity Segment Modulation (ISM)

ISM は筆者らが提案する振動の触感を維持したまま任意の波形に変換する技術であり [6]、ヒトの振動のインテンシティ知覚と包絡線情報の知覚の 2 つの知覚特性に着目した変換手法である。知覚インテンシティは元波形を 5 ms のセグメントに分割して、セグメント毎に知覚インテンシティを算出することで、100 Hz 以下の知覚インテンシティの変動を残すことができる。セグメント毎の知覚インテンシティは、同じ知覚インテンシティを持つ固定周波数の振幅変調

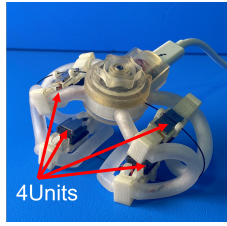


図 1: デバイスの全体像



図 2: 振動子部

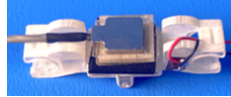


図 3: センサ部

波に変換される。入力波形の知覚インテンシティの算出は、Empirical Mode Decomposition と呼ばれる手法によって周波数毎の波形に分解され、それらの知覚インテンシティの合計を求める。本稿において 100 Hz 以上の高周波振動を全て知覚インテンシティを維持しながら 200Hz の AM 波に変調している。これによりデバイスの共振周波数を避けて振動提示を行えるため、ハウリングの抑制が可能である。

### 2.3 振動子の振動情報を除去するフィルタの設計

双方向化デバイスにおける振動センサの情報にはバイブレータの振動が含まれており、センサ情報から振動子の出力する周波数に対応した振動を除去するフィルタを設計する必要がある。ISM を用いた場合に提示波形は 200 Hz の AM 波と 100 Hz 以下の低周波であるため、センサ情報から 200 Hz 周辺の周波数の振動を除去するフィルタを設けることでループバックを軽減することができる。本稿では ISM 変換の過程で知覚インテンシティの合計を求める際に、180 Hz から 350 Hz の波形を合算から除外するフィルタを作成した。

## 3. 腕輪型デバイスとそのシステム

開発した腕輪型デバイスを図 1 に示す。本デバイスは振動センサ (TOKIN, VS-BV201) と振動子 (Nidec, Slider1) が 1 つのユニットに統合されており双方向に通信を行うことができる。また手首の周りに 4 つのユニットが配置されており、手首に伝播した振動の空間分布の再現が可能である。振動センサは皮膚と接するように腕輪の内側に配置し、センサには皮膚との絶縁のためにセロテープを張り付けた。またデバイスの固定には、0.6 mm の被覆ステンレスワイヤを用いており、ダイヤルを回すとワイヤを締め付けることができる。

双方向触覚伝達システムの概要を図 4 に示す。本システムは 4 ch の入出力のデバイスを 2 つ使用するため、8 ch の入出力に対応する USB オーディオ (Roland, OCTA-CAPTURE) を用いている。また入力信号を一度 PC に取り込みリアルタイムで ISM 変換を行ったのちに、アンプ (Syntacts, Syntacts Amplifiers V3.1) を介して振動子に出力される。

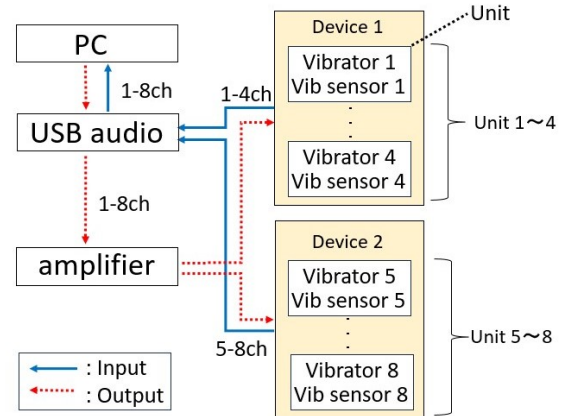
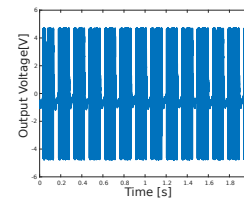
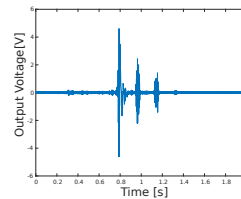


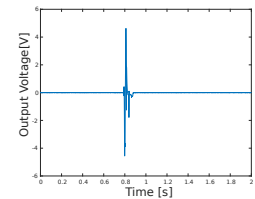
図 4: 双方向触覚伝達システムの概要



(a) 生波形



(b) ISM 波形



(c) フィルタ処理した ISM 波形

図 5: 測定結果

## 4. ハウリング・ループバック抑制効果の検証

### 4.1 実験方法

提案手法により腕輪型デバイスでハウリングが発生することなく、双方向に通信可能であることを示すための実験を行った。具体的には 2 人の被験者にデバイスを装着させ、1 人目の手のひらにパルス状の刺激を加える。その際の 2 人目のデバイスの振動子への出力電圧を 1 ch 分計測した。提示波形の条件は生波形、フィルタ適応前の ISM 波形、フィルタ適応後の ISM 波形の計 3 条件とした。センサのゲインを 10 dB とし、さらに出力波形を 25 dB 増幅させた。

### 4.2 実験結果と考察

図 5 にそれぞれ生波形、フィルタ適応前の ISM 波形、フィルタ適応後 ISM 波形の計測結果の典型的な 1 例を示した。横軸が時間で縦軸が手のひら側の振動子への出力電圧である。生波形の条件ではハウリングの発生が確認された。次にフィルタ適応前の ISM 波形の条件において、初期振動が減衰しながら繰り返し生じており、ループバックが確認された。最後にフィルタ適応後の ISM 波形の条件では、パルス状の初期振動以外は生じておらず、ループバックもハウリングも確認されなかった。

以上の結果から ISM とフィルタ処理により双方向腕輪型デバイスにおいてハウリング・ループバックを抑制可能であることが確認された。

また本手法で伝達したい体感の中に 200 Hz 周辺に重要な情報を含む場合、フィルタ処理により除去してしまう恐れがある。その場合は ISM の提示波形を例えば 300 Hz の AM 波形にし、フィルタ処理も 300 Hz 周辺を除去するなど重要な周波数帯域から離れた周波数を提示に用いることで対処できると考えられる。

## 5. 結言

本稿では振動子と振動センサを統合した腕輪型デバイスにおいて、ISM とフィルタ処理を用いてハウリング・ループバック問題を解決することで双方向化が可能であることを示した。

今後は本デバイスを用いた被験者実験を行うと共にフィルタ処理をより狭い帯域で実現し、体感の向上を図る予定である。

**謝辞** この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP21004）の結果得られたものである。

## 参考文献

- [1] 山口 公輔, 昆陽 雅司, 田所 諭, “振動分布を再現する腕輪型触覚デバイスによる動作体感の伝達-第 1 報: 知覚インテンシティ再現に基づく伝達の効果-”, 第 22 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2021
- [2] 山口 公輔, 昆陽 雅司, 田所 諭, “振動分布を再現する腕輪型触覚デバイスによる動作体感の伝達-第 2 報: ツール取り付け型デバイスとの比較-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2022
- [3] 松原 亨, 和賀 正宗, 昆陽 雅司, 田所 諭, “振動分布を再現する腕輪型触覚デバイスによる動作体感の伝達-第 3 報: 振動分布の再現が接触力の弁別に及ぼす影響-”, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会, 2022
- [4] 松原 亨, 和賀 正宗, 昆陽 雅司, 田所 諭, “振動分布を再現する腕輪型触覚デバイスによる動作体感の伝達-第 4 報: 知覚インテンシティを用いた刺激の強度調整に関する基礎検証-”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2023
- [5] 山口公輔, 昆陽雅司, 田所諭, 双方向触覚インタラクションのための振動インテンシティ変調を用いたハウリング抑制, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2021
- [6] K. Yamaguchi, M. Konyo, and S. Tadokoro, “Sensory Equivalence Conversion of High-Frequency Vibrotactile Signals using Intensity Segment Modulation Method for Enhancing Audiovisual Experience,” 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 674-679, 2021