



# 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

## 一第 10 報：手指伝播特性に基づく個人差補正法を利用した 2 者間の動作再現

新居田崇家<sup>1)</sup>, 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>

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, nida.takaya@rm.is.tohoku.ac.jp)

**概要:** 我々は、これまでに手首に伝わる振動を計測・提示する腕輪型触覚デバイスを提案している。前報では力加減を統制することで、手指伝播特性に基づく個人差補正法が有用である可能性を報告した。本報では、2 者間の動作再現において、個人差補正法を適用することで被験者が目標の動作タスクの力加減を上手く再現することができるかについて検証する。

**キーワード:** 触覚, 振動提示, ウェアラブルデバイス

### 1. 緒言

近年、リモートワークやオンライン会議の普及が進んでいる。しかし、オンライン環境では音声や映像だけで伝統的な技術やスポーツの体感をリモートで学習することは困難である。そのため、触覚情報を付加することで体感を伝達し、技術習得を促進することが期待されている。

本研究では、体感を伝える方法として身体に伝播する高周波振動の再現に着目している。筆者らは、100Hz 以上の高周波振動を人の知覚特性に基づいて任意の周波数の振動に変換する Intensity Segment Modulation (以下 ISM) の効果を確認した [1]。また、手先から手首に伝播する振動に着目し、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 [2]。把持したツールを用いて複数の異なる動作を計測し、手首位置 4 点の振動を再現することで、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 [3]。さらに、把持した棒の接触力の強弱に注目し、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向上する可能性を示した [4]。これにより、単一の振動子では再現できない動作方向や力加減の違いを提示できることが期待される。また、振動刺激の強度調整に知覚インテンシティを用いることの妥当性についても報告してきた [5]。

手首に伝播する振動の大きさには個人差があることが報告されている。従来研究として田中らは指先に伝播する振動の個人差に対する調査を行っており [6]、指先から指に装着した振動センサまでの伝達関数を同定することで、個人差をキャンセルする方法を提案している [7]。同様に、筆者らは、手首位置において、2 者間の体感を一致させるために、知覚インテンシティの周波数特性を参照した個人差補正法を提案している [8]。きざげ作業を対象に提案手法を利用した場合に、2 者間で動作体感が一致するかどうかを検証した。予想に反して、個人差を補正しない方が動作体感が一致する傾向にあった。そこで、力加減に応じて手指から手

首に伝播する振動の周波数特性が変化すると考え、5, 15[N] の 2 つの押しつけ力の条件で被験者の周波数特性を計測したところ、押しつけ力が大きいほどゲインが大きくなることを確認した [9]。被験者実験では、2 つの押しつけ力条件のそれぞれで手首上の振動を計測し、押しつけ力に応じた周波数特性を適用することで体感が共有できるかを検証し、提案手法の有効性を確認した。

しかし、実タスクにおいて提案手法を用いて体感を再現したときに、2 者間で正確な動作の再現を行えるかどうかの検証は行われていない。本稿では、力加減を統制した個人差補正法を適用することによって、2 者間で動作を再現できるか検証する。具体的には、事前収録した実タスクの体感に個人差補正法を適用することで、被験者がタスクの力加減を揃えることができるか確認する。

### 2. 手法

#### 2.1 Intensity Segment Modulation (ISM)

筆者らは振動の触感を維持したまま任意のキャリア周波数の振幅変調波に変換する技術として Intensity Segment Modulation (ISM) を提案している [1]。ISM はヒトの高周波振動の強度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。高周波振動を 5 ms のセグメントに分割し、知覚インテンシティを固有の周波数の振幅変調波に変換する。Empirical Mode Decomposition (以下 EMD) によって周波数毎の波形に分解され、算出された知覚インテンシティの合計を取る。知覚インテンシティの算出に用いた定義式を式 1 に示す。ここで、 $A$  は振動の振幅、 $f$  は周波数、 $I(f)$  および  $\alpha$  は周波数  $f$  に依存する振動弁別閾と振動インテンシティの大きさを表す指数である。本稿で利用する振幅変調波の周波数は 150 Hz とした。

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

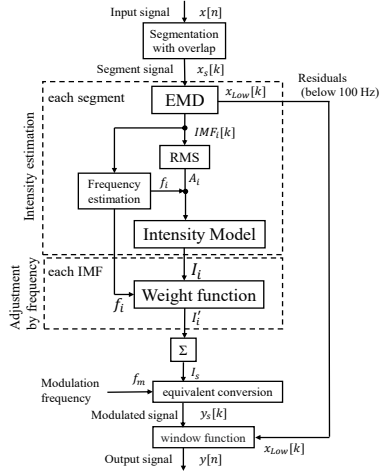


図 1: ブロック線図

## 2.2 計測した周波数応答に基づく振動強度調整

個人差を埋める手法として振動体感の送信者と受信者のそれぞれの手首の周波数応答曲線を事前に計測し、両者の応答性の違いに着目した知覚インテンシティに基づく強度調整を提案している [6]. 具体的な処理の流れを図 1 に示す. EMD によって分解された波形から、知覚インテンシティ  $I_i$  は周波数毎に算出される. 式 2 に示す任意のゲイン  $G(f)$  を設けることで周波数ごとの調整が可能であり、本手法では式 3 に示すように計測側の手首の周波数応答を  $I_M(f)$ 、受け取る側を  $I_E(f)$  とし、 $I_M(f)$  を分母とした商をゲイン  $G(f)$  となるように設定した.

$$I_i' = I_i \times G(f_i) \quad (2)$$

$$G(f) = \frac{I_E(f)}{I_M(f)} \quad (3)$$

## 2.3 振動収録・提示を行なう腕輪型デバイス

振動提示に使用するデバイスを図 2 に示す. この腕輪型デバイスには、4つのユニットが接続されており、1ユニットは1つの振動センサ (TOKIN, VS-BV201) と1つの振動子 (Nidec, Slider1) で構成されている. 振動センサを用いた振動の収録、バイブレータを用いた振動提示を1つのデバイスで行うことができる. 振動の収録位置、振動提示位置は付属のダイヤルを回すことでワイヤを巻き取り、手首周り4点にそれぞれのユニットを指定の位置に固定する. 振動収録には USB オーディオのみを介し、振動提示にはさらにオーディオアンプを介して入出力を行った.

## 3. 計測

提案手法を適用するために被験者の周波数応答特性と動作再現を行ってもらった動作の振動の計測を行った.

### 3.1 周波数応答特性の事前計測

力を入れ具合を変化させたときの手指の伝播特性の計測を行った. 振動の計測環境を図 4 に示す. 加振機 (B&K, Mini-shaker) には、 $\phi 25 \times 150$  mm の円筒の柄を取り付け、柄

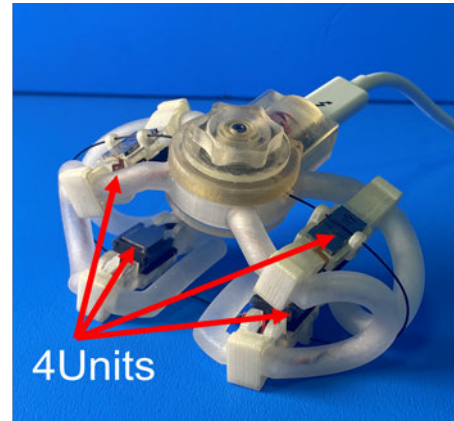


図 2: 振動の収録と提示を行なう腕輪型触覚デバイス

を握って垂直方向に力をかけながら加振させた. また、柄の先端には 3 軸の圧電型加速度検出器 (昭和測器, MODEL-2366) を付けており、z 軸の加速度を計測した. 用いた提示波形は 100, 125, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 600, 800, 1000 [Hz] の 12 種類の周波数の信号で、ステップ状に変化する正弦波で、波数はそれぞれ 220 に設定した. 加振機の出力は無負荷状態において加速度が peak-to-peak で  $500 \pm 10$  [m/s<sup>2</sup>] となるように調整した. 測定中は 5, 15 N 程度の一定の押しつけ力で円筒を押さえつけてもらった. 押しつけ力の許容誤差は  $\pm 1$  N とした, 計測位置は図 3 に示すような体の内側, 手の甲側, 体の外側, 手の平側に 90 度間隔で配置した.

### 3.2 タスクの振動計測

被験者に体験してもらった学習目標の動作タスクの振動計測を送信者に行わせた. 実験では、振動強度に応じて力加減の再現が可能かどうかを評価する. そのため、タスクは押しつけ力に応じて知覚強度が変化するものが望ましい. 本実験で再現してもらったタスクは、ツールによるテクスチャのなぞり動作とした. タスクの様子を図 5 に示す. なぞり用ツールの先端には 3D プリンタで造形した治具に外径  $\phi 8$  mm のステンレスボールを取り付けた. 持ち手部分は  $\phi 26$  mm であり、周波数特性を測定した治具の外径に近い. なぞられるテクスチャの材質はステンレスであり、穴径  $\phi 3$  mm の穴がピッチ 5 mm の間隔で配置されている. 図 5 のようにボードを段ボールに両面テープで貼り付け、段ボールもフォースプレートに両面テープで貼り付け、動かないように固定した. 押しつけ力のピークが 2, 5, 8, 11, 15, 18 [N] となるように、なぞり速度 12.5 mm/s で図 5 の矢印の方向に 1 なぞりの動作タスクを行い、手首周り 4 点で計測した信号の知覚強度が押しつけ力に応じてどれだけ変動するかを検証した. 結果を図 6 に示す. 縦軸が 1 なぞり時に生じた振動の知覚強度を示す知覚インテンシティ、横軸が押しつけ力であり、ほぼ線形に近似できることがわかった. このなぞり動作を学習用の動作タスクとして指定し、押しつけ力のピークが 5, 15 N となるようななぞり動作を 1 回行い、動作時の振動と動画を同時に収録した.

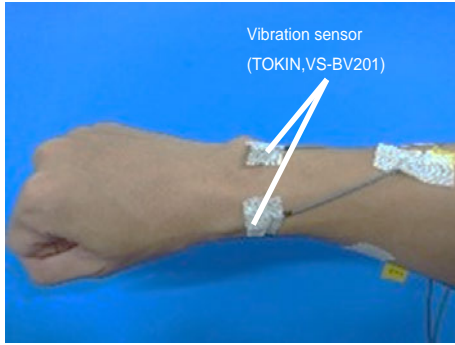


図 3: 周波数応答特性の計測位置

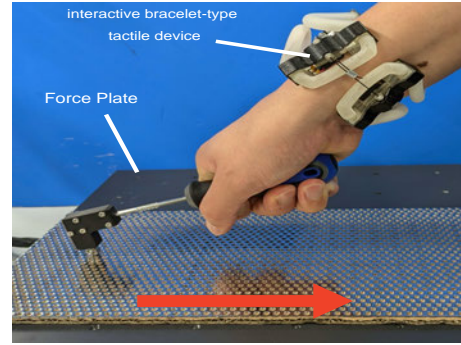


図 5: 動作タスク

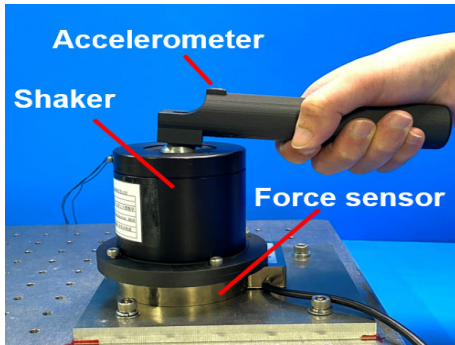


図 4: 周波数応答特性の計測環境

4. 実験

本実験では、提案手法を利用することによって、動作タスクの押しつけ力の再現を行えるかどうかを確認する。

4.1 実験方法

被験者は 20 代の男性 4 名である。まず、被験者には図 2 に示す腕輪型触覚デバイスによって、図 5 で示される学習目標の振動と動画が同時に提示される。次に、被験者には実際の動画の動作を行わせた。なぞり方を動画に合わせ、力加減を振動情報をもとに自身の体感に揃えるよう指示した。動作時の被験者の振動は図??のデバイスによって記録され、手元の様子は備え付けの Web カメラで記録された。動作を終えると、記録された被験者の動画と振動がその場でフィードバックされる。被験者の体感が提示されると、次に事前計測された学習目標の振動と動画が提示され、動作を再度行わせる。このプロセスを繰り返し、被験者が自身の体感が学習目標の体感と一致したと感じた場合、動作再現を終了する。動作再現の終了時の押しつけ力のピーク値を算出し、目標動作の力のピーク値との差の絶対値を求め、目標値にどれだけ近づいたかを評価する。再生される振動の条件は以下の 4 条件である。

- (5N-No) 個人差未調整 (押しつけ力 5 N)
- (5N-Adj) 個人差調整 (押しつけ力 5 N)
- (15N-No) 個人差未調整 (押しつけ力 15 N)
- (15N-Adj) 個人差調整 (押しつけ力 15 N)

これらの全条件を終えると実験は終了する。これらの条

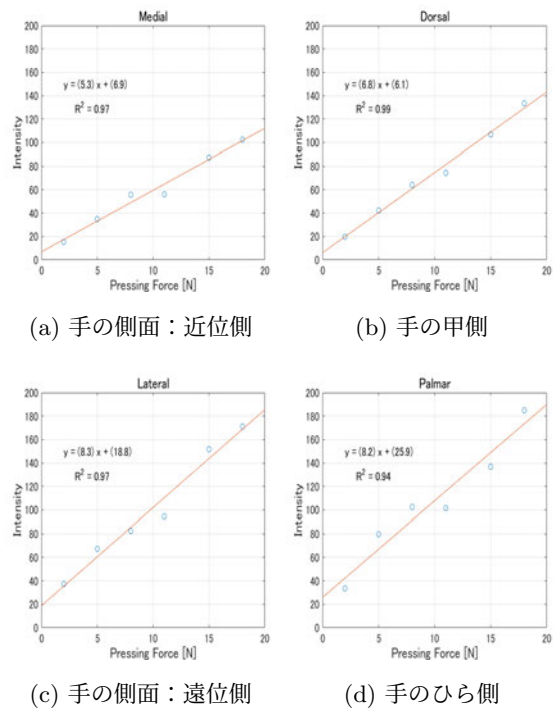
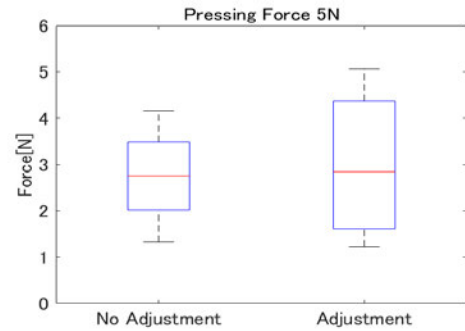


図 6: 知覚インテンシティと押しつけ力の関係性

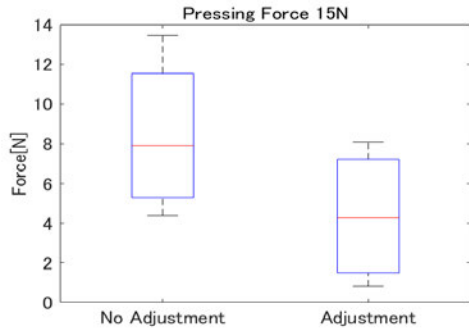
件はラテン方格法によって決められた組み合わせで実施され、カウンターバランスが取られた。被験者のなぞり速度はそれぞれの学習目標の動画と同じ速度の 12.5 mm/s で行い、1 つの学習目標に対するなぞり回数の上限は被験者に負荷がかからないように 10 回に設定した。

4.2 実験結果と考察

押しつけ力の違いによる力加減の差が大きいため、個人差補正条件と個人差未調整条件の 2 種類で評価を行った。図 7(a),(b) には、各押しつけ力における個人差調整法を適用した場合の結果を示す。押しつけ力の差が小さいほど、目標値に近いことを表している。(a) の押しつけ力 5N の条件では、分散、中央値ともにほとんど差が見られなかった。一方、(b) の 15 N の条件では、分散や中央値共に個人差補正条件の方が小さくなった。現状では被験者数が少なく有意差は見られなかった。本節では定性的な傾向について考察を行う。5N の条件では、分散に大きな変化は見られなかった。しかし、調整なしでは力が小さく、5N から大きく乖離



(a) 押しつけ力 5N



(B) 押しつけ力 15N

図 7: 学習目標動作の押しつけ力との差

しているのに対し、調整すると目標の力には至らなかったが、より大きな力を加えようとする傾向が見られる。押しつけ力 15 N の条件では、分散、中央値共に小さくなっており、被験者の個人差を補正できた可能性がある。動作を完了するのにかけた回数を表 1 に示す。15 N の個人差補正を行った場合、15 N の未調整条件よりも試行回数が多く、何度も学習して自分の体感を他者の体感に近づけようとする傾向が見られた。本実験の結果では、振動だけで力の絶対値を再現することは難しいが、個人差調整を行うことで目標値との力の誤差が小さくなる傾向が見られた。今後、さらに被験者を増やし個人差調整の有効性を確認する必要がある。

5. 結言

本稿では手指伝播特性に基づく個人差補正法を利用することによって、2 者間での動作の再現が成功するかを押しつけ力のピークを比較することで検証した。被験者は提案手法を利用した場合、押しつけ力のピークを合わせようという傾向が見られ、個人差の調整効果が確認された。今後は被験者を増やし、統計的な観点からも評価を行う予定である。

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] K. Yamaguchi, M. Konyo, and S. Tadokoro,

表 1: 動作タスクを行った回数

Conditions	5N-No	5N-Adj	15N-No	15N-Adj
Subject1	4	2	2	6
Subject2	3	3	3	4
Subject3	3	2	3	6
Subject4	1	2	3	2
Average	2.75	2.25	2.75	4.50

“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

[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 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.

[3] 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.

[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 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.

[5] 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一, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2023.

[6] Kawai, Akifumi and Tanaka, “Individual Differences in Skin Vibration Characteristics and Vibrotactile Sensitivity at Fingertip”, Yoshihiro, 2022 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pages 1-6, 2022

[7] K. Kitamichi, H. Yukawa, K. Minamizawa, and Y. Tanaka, “Intersubjective Tactile Sharing Method Based on Human Skin Vibration Characteristics,” 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 299-304, 2022

[8] 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 7 報: 計測対象の周波数応答特性に基づく知覚インテンシティを用いた体感強度の調整-”, 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, 2023

[9] 新居田 崇家, 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 9 報: 手指伝播特性に基づく個人差の補正一, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2024