



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 6 報：複数点計測された体感振動の統合法の検討—

新居田崇家¹⁾, 松原亨¹⁾, 赤井峻真¹⁾, 和賀正宗¹⁾, 昆陽雅司¹⁾, 田所諭¹⁾

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: 本研究では, 手指に伝播する振動を腕輪型デバイスに搭載された複数の振動センサで記録し, その分布を再現することで動作体感を伝達する方法を提案してきた. 本稿では, 複数点で計測された振動情報を統合し, 単一の振動子で提示する方法を検討する. 具体的には, 高周波振動の知覚インテンシティを統合することで, 生波形を単純に合成するよりも体感が向上することを検証する. また, 単一と多点の振動再現の比較により提案手法の有効性を確認する.

キーワード: 触覚, 知覚インテンシティ, 振動提示

1. 緒言

近年, リモートワークやオンライン会議が一般に普及しているが, オンラインにおける音や映像だけでは対面での雰囲気や状況を再現することは非常に困難である. 手軽に利用できる触覚情報のリモート伝達技術が実現されれば, 体感共有によるコミュニケーションや技能教育などが実現されると期待される.

これまでに筆者らは人の知覚特性に基づく高周波振動変換手法 Intensity Segment Modulation (ISM) による振動波形の生成手法を提案してきた [1]. これまで, 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による空間再現による動作種類の弁別の向上 [2], 接触力の強弱の弁別性向上 [3], 知覚インテンシティの強度調整に関する効果 [4] について報告してきた. 腕輪型デバイスによって計測される振動は, 計測する部位によって振動波形が異なることが確認されており, 複数点の計測により, 体感振動をより正確に計測できる. 一方, 提示側のデバイスは, 多数の視聴者に配信する場合は, サイズやコストの観点で, 単一の振動子で構成される場合も想定される. 例えば, 筆者らは, スマートフォンを用いた体感付き動画の配信技術を提案しており [7], 複数点で計測された体感振動を単一の振動子で再現することができれば, 複数点計測の効果を活かして, よりリアルな体感を配信することができると期待される.

計測した複数の振動波形を単純に合成した場合, 位相差などにより波形が崩れ, 元の体感を維持することはできないと考えられる. 類似する研究として, 3 軸加速度センサで計測した振動を単一振動子で提示するために, スペクトルあるいは時間成分の一致により 1 つの信号に合成する方法が提案されている [5].

本稿では, 手首周りの複数点で計測された複数の体感刺激を単一刺激として再現する方法として, 筆者らが提案する ISM によって算出される知覚インテンシティの利用を検討

する. 具体的には手首周りの 4 点で計測したデータの高周波振動の知覚インテンシティを統合することによって生波形を単純に合成するよりも体感が向上することを検証する. 検証する振動データは体感振動をイメージしやすいバドミントンのデータを扱う. 本研究では提案手法を含む条件の異なる 4 条件の単一振動を用意する. 4 点で計測した体感刺激を基準刺激として提示し, 基準刺激にどれだけ類似しているかを比較することによって提案手法の有効性を確認する.

2. 計測と提示装置

2.1 計測デバイス

振動の測定の概要を示す. 振動の計測は図 1 に示すような腕輪型計測デバイスを用いて行う. このデバイスには圧電式振動センサ (トーキン, VS-BV203) が 4 個取り付けられている. 腕周りに 90° の等間隔でセンサを配置し, 運動時の 4 点における振動を計測する. 振動はデータロガーを用いて 50 kHz のサンプリングレートで計測する. これを音声データとして扱うために 48 kHz にリサンプリングを行う.

2.2 振動提示デバイス

振動提示デバイスを図 2 に示す. バイブレーションにはオーディオ エキサイタ (Tectonic Elements, TEAX13C02-8) を用いる. 3D プリンタで造形したケースにバイブレーションを取り付け, ベルトを通して固定する. バイブレーションは 4 つで, 振動の計測位置に合わせて配置する. 振動刺激は USB オーディオインタフェース, オーディオアンプを介して出力する.

3. 計測方法と信号処理

3.1 計測データ

計測対象はバドミントンとし, 動作の実施はバドミントン歴 6 年のバドミントン経験者に協力してもらった. 測定動作は, ラケットでシャトルを打つ 2 種類の打撃動作とした. 打撃動作は以下の 2 種類である.

(A) ドライブショット

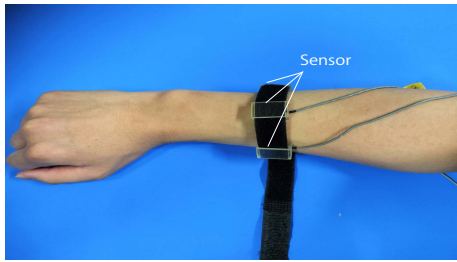


図 1: 腕輪型計測デバイス

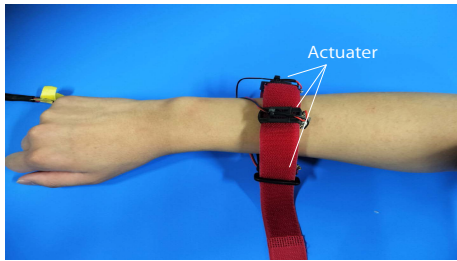
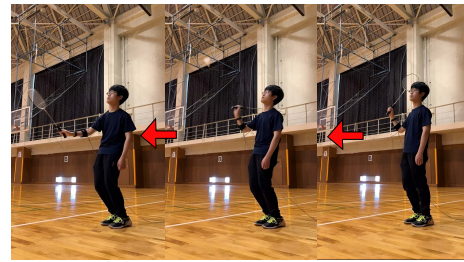


図 2: 腕輪型触覚デバイス



(A) ドライブショット



(B) バックハンドショット

図 3: 2 種類の打撃動作の動き

(B) バックハンドショット

ドライブショットはラケットの持ち手側から打つ打撃動作 (図 3 (A)), バックハンドショットは持ち手とは逆側から打つ打撃動作 (図 3 (B)) である。シャトルを投げる出し手を用意して同じ打撃を継続して行えるように調整し, 安定して 3 回連続で打撃した区間を提示用データとして選定した。

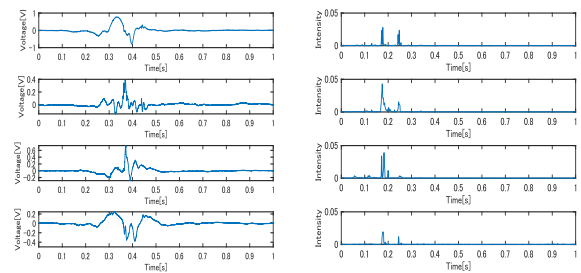
3.2 Intensity Segment Modulation (ISM) による統合

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 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, セグメント毎に知覚インテンシティを維持して任意のキャリア周波数の振動に変換することで変換を行う。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, $AT(f)$ および $a(f)$ 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。

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

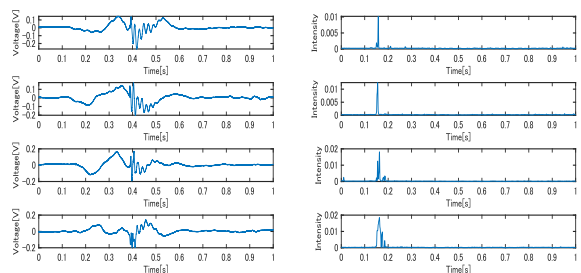
従来の振動提示では高周波振動は, 触覚用振動子の応答レンジが限られる場合, 刺激が小さくなり再現することが困難であった。また, 数 100Hz を超える振動は可聴域にあるため, デバイスから音漏れするという問題もある。ISM を用いて, 高周波成分の体感を維持しながら, 200 Hz の振幅変調波に変換することでこれらの問題を回避することができる。なお, ISM は 100Hz 以下の低周波成分については, そのままの波形を提示するため, 低周波帯の体感は振動子の性能に依存する。

本研究では, 複数点で計測された振動体感の統合に, ISM により算出される知覚インテンシティを利用する。



(a) 生波形 (b) 知覚インテンシティ

図 4: (A) ドライブショットの 4 点計測例



(a) 生波形 (b) 知覚インテンシティ

図 5: (B) バックハンドショットの 4 点計測例

2 種の打撃動作について, 計測された 4 点の生波形の振動データとそれを知覚インテンシティに変換した例を図 4, 図 5 にそれぞれ示す。これらの知覚インテンシティを足し合わせ, 平均を取ったものが本研究で提案する手法である。図 6 に統合されたインテンシティの結果を実線で示す。また, 比較として, 生波形をそのまま統合して, それを知覚インテンシティに変換した結果を点線で示す。生波形による統合では, 打ち消されたピークもあることが分かる。

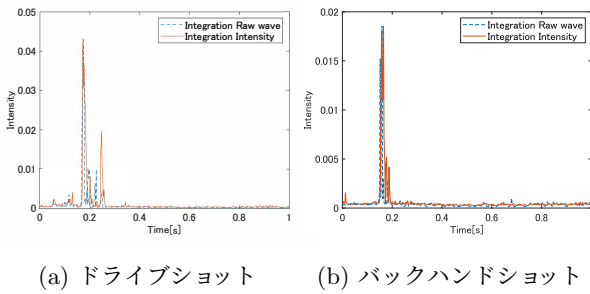


図 6: 統合インテンシティの比較

4. 統合手法の効果検証

4.1 刺激条件

知覚インテンシティを用いた統合方法の効果について、4つの振動子で再現した体感と統合された単一の振動子の体感の類似性を比較することで検証する。対象動作として、ドライブショット、バックハンドそれぞれについて調査する。また、ISMによる高周波振動の体感の統合効果に加え、100Hz以下の低周波の振動波形も統合に影響すると考えられる。そこで、下記の2つの条件について、それぞれ、4点刺激と単一刺激の比較を行う。

(a) 高周波のみ (H 条件)

(b) 高周波+低周波 (H+L 条件)

実験で用いる基準刺激は、4つの振動子で体感を再現したものである。図4、図5の例に示すように、4点の計測波形をISMにより知覚インテンシティに変換した後、等価インテンシティをもつ振幅変調波に変換したものを、4つの振動子で提示する。

比較刺激は単一の振動子で提示する場合である。単一刺激は図2のように机に腕を置いたときの上方（手首の背屈側）の振動子に対して提示する。比較刺激は、以下の条件で刺激する。

I-Int: 4点インテンシティ統合刺激

I-Raw: 4点生波形統合刺激

S-Bad: 1点計測刺激 (悪条件)

S-Best: 1点計測刺激 (好条件)

I-Int は提案する4点の知覚インテンシティを統合した刺激である (図5、図6の実線に相当)。I-Raw は4点の生波形のまま統合した後、知覚インテンシティを算出し、振幅変調波に変換した刺激である (図5、図6の点線に相当)。また、4点の計測データから特定の1点だけ取り出して、提示した条件として、S-Bad、S-Bestを用意した。S-Badは、選択した波形が悪条件だった場合で、4点の中からインテンシティのピークが最も小さいものを選択した。S-Bestは選択した波形が好条件だった場合で、インテンシティのピークが最も大きいものを選択した。なお、比較刺激は同じ強度で比較するために、波形の最大ピークの知覚インテンシティの大きさを揃えるように正規化した。

低周波を加えたH+L条件の刺激に関しては、基準刺激はそれぞれ4点で計測した低周波を足し合わせたものを用意し、比較刺激には4点の低周波のうち1点を取り出して足し合わせたものを用意した。

4.2 実験方法

類似度はリッカート尺度による評価と、順位法による尺度化を行う。はじめに運動の映像を見せ、基準刺激を記憶するまで提示させる。次に、4条件の比較刺激を提示する。実験中は振動子の接触状態が変わらないように、手首を動かさないように指示した。

まず、基準刺激と同様に感じるかについてリッカート尺度 (1: 全くそう思わない, 2: そう思わない, 3: ややそう思わない, 4: どちらでもない, 5: ややそう思う, 6: そう思う, 7: とてもそう思う) の7段階で評価させた。

次に、基準刺激と4条件の単一振動の刺激を提示し、順位付けを行わせた。順位は正規化順位法 [8] により正規スコアに変換し、1人当たりの平均スコアを計算した。

H条件に続き、H+L条件についても同じ手順で実験を行った。これらを対象動作 (A)、(B) の順番で行った。本実験の被験者は20代前半の男性4名である。

4.3 実験結果と考察

リッカート尺度による類似度の評価結果を図7、図8に示す。また、順位法による類似度の正規化尺度とその順位を表1、表2に示す。

(A) ドライブショットに関して、リッカート尺度による類似度は、H条件、H+L条件共に、I-Int、I-Rawの統合条件で、S-Bad、S-Bestの刺激よりも全体的に点数が高い傾向がみられた。I-IntとI-Rawの差は明確ではないが、H+L条件では、I-Intのばらつきが小さく安定して高い評価が得られた。S-BadとS-Bestの比較では、S-Bestの方が評価が高い傾向がみられる。順位法による評価では、I-Intが安定して高い評価を得ており、I-RawはH条件では1位だが、H+L条件では4位に順位づけられおり、安定した性能を発揮していない。

(B) バックハンドショットに関しては、リッカート尺度による類似度は、I-IntがH条件、H+L条件共に最も評価が高くなった。一方で、I-Rawは、H条件では、評価が大きく下がる結果となった。この動作に関しては、S-Bad、S-Bestの差は明確には見られなかった。順位法による評価では、I-Intが安定して高い順位になっているが、I-RawのH+L条件は4位となっており、リッカート尺度の評価と一致して、悪い評価となった。

本実験では被験者が少ないため、統計的検定は行っていないが、得られた定性的な傾向に基づいて考察を行う。2つのd

また、表1の正規化順位法の評価ではI-Intは(a)、(b)ともに高評価であり、I-Rawは(a)は高評価で、(b)は低評価となっていた。次に(B)の(a)と(b)の結果を。おそらくこれは、波形を合成したときの位相がずれていたためだと考えられる。このことから高周波において生波形を合成して単一刺

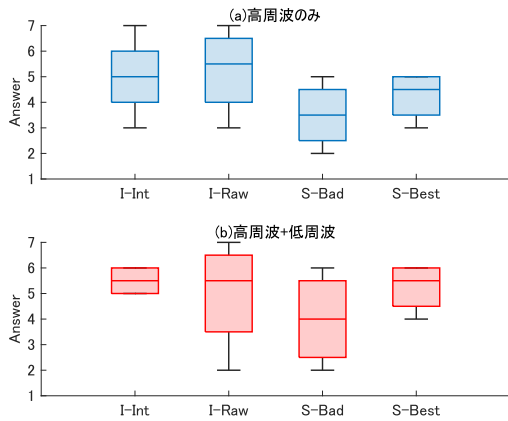


図 7: (A) ドライブショットの類似度評価

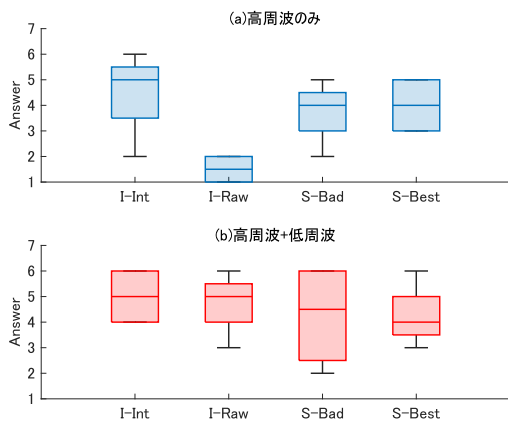


図 8: (B) バックハンドショットの類似度評価

激を提示することの有用性が低い可能性がある。一方で、(b)の評価はそこまで悪くないので低周波の刺激が強く、高周波の刺激を感じ取れなかった可能性が考えられる。また、表 2 の正規化順位法の評価では I-Int は (a),(b) ともに高評価であった。一方で、I-Raw は (a) の順位は被験者全員が最下位を選ぶという驚きの結果となった。(b) に関しては平均スコアがほぼ横這いであることから低周波が強く働き、高周波を上手く感じれなかったのだと推察できる。(A),(B) において I-Int の評価は高かったため提案手法は他の手法と比較したとき複数点刺激を単一刺激で表す方法としては有用性が高い傾向がみられた。

5. 結言

複数点で計測された体感刺激を単一振動子で表す方法として複数点のインテンシティを合成して平均を取り、統合するものを提案した。複数点刺激を基準として他のものと比較すると体感が優れており、有用性が高いことが分かった。単一振動子での触感をさらに向上させるには低周波の統合方法について検討を行う必要がある。今後は低周波の統合方法について実験を行っていきたい。

謝辞この成果は、JSPS 科研費 JP18H01401 および国立研究

表 1: (A) ドライブショットの順位法による評価

Conditions	I-Int	I-Raw	S-Bad	S-Best
Score: (a) H	0.183	0.515	-0.665	-0.033
Ranking	2nd	1st	4th	3rd
Score: (b) H+L	0.365	-0.183	-0.033	0.183
Ranking	1st	4th	3rd	2nd

表 2: (B) バックハンドショットの順位法による評価

Conditions	I-Int	I-Raw	S-Bad	S-Best
Score: (a) H	0.515	-1.03	0.183	0.333
Ranking	1st	4th	3rd	2nd
Score: (b) H+L	0	0.15	-0.15	0
Ranking	2nd	1st	4th	2nd

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] N. Landin, J. M. Romano, W. McMahan, and K. J. Kuchenbecker, Dimensional reduction of high-frequency accelerations for haptic rendering, Proc. EuroHaptics, Part II, volume 6192 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 79–86, 2010.
- [6] S. Dinulescu et al., ” A Smart Bracelet Supporting-Tactile Communication and Interaction, ” 2022 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), 2022, pp. 1-7,
- [7] 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,2022
- [8] 佐藤信, ” 官能検査入門 ”, pp74–76, 日科技連出版社, 東京, 1978