



触覚提示性能の指標化のための 知覚インテンシティに基づく定量評価法の検討

高橋慶¹⁾, 高橋哲史¹⁾, 昆陽雅司¹⁾

Kei TAKAHASHI, Akifumi TAKAHASHI, Masashi KONYO

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@tohoku.ac.jp)

概要: 近年, 触覚提示技術は VR・AR, 遠隔操作, 教育など多様な応用で注目されているが, 触感のクオリティなど, 触覚提示性能の客観的に評価する指標は未確立である. 本研究では, 振動刺激の知覚量である知覚インテンシティに基づく再現性を指標を提案し, 異なるデバイスの提示性能の比較を試みる. 具体的には, iPhone の各機種を対象に, 振動変位から算出された指標と主観評価を比較し, 提案手法の妥当性を検証した.

キーワード: 振動提示, スマートフォン, ISM

1. 緒言

近年, ヒューマンインタフェース技術の進展とともに, 視覚や聴覚に加えて触覚情報を介したインタラクションの重要性が注目されている. とりわけ, VR・AR 環境においては, 没入感や臨場感を高めるために触覚提示は, 視覚・聴覚に加えて不可欠な情報として期待されている. さらに, 遠隔操作や遠隔医療においては, 操作対象への触覚フィードバックが作業の精度や安全性の向上に必要である. 一方で, ゲーム, 教育, エンターテインメント, ウェアラブルデバイスなどの領域では, ユーザーの感性に訴える「快適さ」や「リアリティの再現」といった主観的体験の質が製品価値を大きく左右するようになってきている.

このような背景のもと, 触覚提示技術の品質や性能を客観的に比較できることはデバイスや提示手法を向上させていく上で重要である. しかし, 視覚や音響のように成熟した評価基準が触覚技術には未だ確立されておらず, それが現状の課題となっている. 従来手法として用いられてきた周波数応答特性や物理的パラメータに基づく評価法は, 主観的知覚との対応関係が不明瞭であり, ユーザー体験との整合性にも欠けている.

本研究では, 高周波振動に対するヒトの知覚特性を考慮した知覚インテンシティ [1] に基づく定量評価法を提案し, 異なる触覚デバイス間における提示性能をユーザーの知覚に沿って客観的に比較可能な手法として構築することを目的とする.

本稿では, 提案手法の妥当性を評価する対象として, Apple 社 iPhone の各機種の触覚提示性能を比較する.

2. 手法

2.1 提案手法の概要

本研究では, 触覚提示デバイスの性能を定量的に評価する新たな指標として, 知覚インテンシティに基づく再現性評価手法を提案する. 触覚刺激に対して人が感じるインテンシティは, 物理的な振動波形の単純な大きさや周波数成分だけでなく, 受容器の周波数特性や非線形な感覚処理を通じて形成されるものである. そこで本研究では, 山口らによって提案された Intensity Segment Modulation (ISM) [2] を用いて, 任意の振動波形から知覚インテンシティを推定するモデルを導入する.

2.2 知覚インテンシティの定量評価法

触覚提示性能は, 「意図した知覚インテンシティが実際に提示されたかどうか」に基づいて定義する. すなわち, 入力として与えた理想的な知覚インテンシティ波形と, 実際にデバイスで提示された振動を ISM を用いて再推定した知覚インテンシティとの間の誤差を評価する.

平均絶対誤差 (MAE) を用いて以下のように定義した.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_{\text{input}}(i) - I_{\text{measured}}(i)| \times 100 \quad (1)$$

2.3 振動計測実験

提案手法の実装にあたり, iPhone における振動提示の再現性を物理的に検証するための計測実験を実施した. 実験の様子を図 1 に示す. 振動の計測には, 光学ユニット CL-P015G (KEYENCE 社製) を使用した. 振動測定は, サンプリング周波数 10kHz で行った. 測定対象機種は, iPhone 8, SE, X, 13 Pro, 13 Pro Max, 15 Pro Max とした. iPhone の各機種における重量を表 1 に示す.

各 iPhone には振動提示アプリをインストールし, アプリ上のアイコンをタップすることで振動が提示されるように設計した. 振動の生成には音声データを用い, その音声データ

表 1: Weight of each iPhone model.

No.	Weight[g]
8	148
X	174
SE	148
13 Pro	203
13 Pro Max	238
15 Pro Max	221

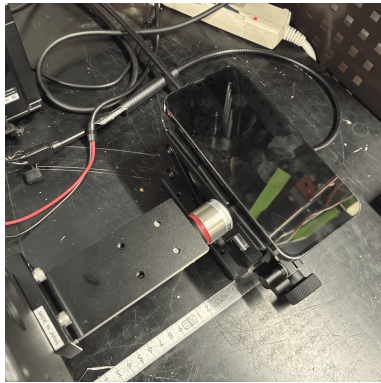


図 1: Setup of the vibration measurement experiment using a laser displacement sensor.

から生成した振動波形（ISM 準拠）を，Core Haptics API を用いて再生した．使用した音声データはサンプリングレート 44.1kHz であり，振動とともに 10 秒間再生された．

アクチュエータが内蔵されている位置と，ヒトが実際に把持する位置を考慮し，振動の測定部位は各機種種のディスプレイ下端から下三分の一の位置とした．以上の条件で計測された提示振動は，ISM を用いて知覚インテンシティに変換され，解析に使用された．

なお，iPhone 内部に搭載されているバイブレータの構造は機種によって不明であるが，本研究では最終的な知覚的出力の再現性を性能指標とし，デバイス全体の提示能力を評価することとする．

2.4 主観的評価実験

提案手法による定量評価の妥当性を確認するため，主観評価実験を実施した．被験者は健康な 20 代成人男性 5 名である．被験者に対し，6 機種種の iPhone において，振動計測実験の場合と同様に同一音源・同一提示条件下で振動提示を実施した．被験者は各機種種の振動を体験し，音源に最も近いと感じた順に順位付けを行った．6 機種種に対して順位付けを行うため，1 位から 6 位までの順位付けとなった．

3. 結果

3.1 振動計測実験

計測した振動から ISM を用いて知覚インテンシティの平均絶対誤差を算出し，提案した手法を用いて知覚インテン

表 2: Reproducibility of perceived intensity obtained using the proposed method.

No.	MAE
8	0.015342
X	0.018535
SE	0.015702
13 Pro	0.026961
13 Pro Max	0.032151
15 Pro Max	0.028480

表 3: Results of the subjective evaluation experiment.

device	Subject				
	A	B	C	D	E
8	1	5	5	6	6
X	3	1	2	2	4
SE	2	4	4	1	5
13 Pro	4	2	1	4	1
13 Pro Max	5	6	6	5	3
15 Pro Max	6	3	3	3	2

シティの再現性を評価した（図 2）．なお，誤差は，音源から求めた知覚インテンシティと，計測した振動から算出された知覚インテンシティの最大値が等しくなるように調整してから求めた．

3.2 主観的評価実験

主観的評価による各機種種の触覚提示性能に基づく順位付けを表 3 に示す．品質の良さの順位は近似的に正規分布に従う [3] ことを考慮し，機種ごとの順位を正規化順位法 [3] により正規スコアに変換し平均をとった距離尺度のプロットを図 2 に示す．図 2 から，最も良い触覚提示性能を有している機種は 13 Pro であった．一方，最も再現性が低いと評価された機種は 13 Pro Max であった．

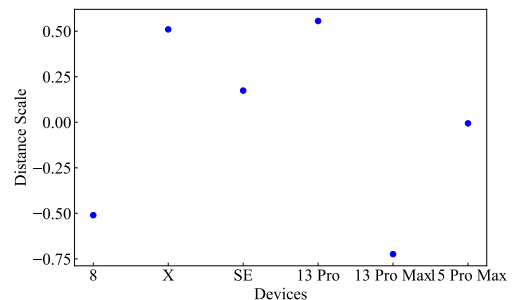


図 2: The result of the ranking experiment.

表 4: Comparison between the proposed method and the normalized ranking method.

rank	Proposed method	Normalized score
1	8	13 Pro
2	SE	X
3	X	SE
4	13 Pro	15 Pro Max
5	15 Pro Max	8
6	13 Pro Max	13 Pro Max

3.3 提案手法と主観的評価から得られた結果の比較

得られた距離尺度と、提案手法によって得られた再現性指標に基づく値を比較した（表 4）。2つの手法によって求められた値から相関を求めるため、相関係数を用いてそれぞれの関係性について調べた。その結果、相関係数は-0.216となった。

4. 考察

知覚インテンシティの MAE と主観的評価を比較した結果、提案手法は各機種における触覚提示性能の優劣に関する傾向を概ね適切に示しているとは言い難い結果となった。提案手法から得られた誤差と、主観的評価に基づく距離尺度との間には有意な相関が見られず、両者の関係性は弱いと考えられる。

一方で、MAE に着目すると、機種サイズの小さいほど誤差が小さい傾向が見られた。一般に、振動系は質量が大きくなるほど慣性力により振幅が小さくなる。すなわち、機種に内蔵されたアクチュエータの出力が同じ場合、サイズの大きい機種では表現可能な触覚に制限が生じると考えられる。得られた MAE は、機種サイズによる触覚提示性能の違いを反映しているとも解釈できる。このような意味において、提案手法は触覚提示性能を表現できている可能性がある。

しかし、本稿では主観的評価と大きく差がみられた。こ

の要因として、主観評価の実験が適切でなかった可能性が挙げられる。表 3 に示すように各被験者の評価順は個人差が大きく、個人間で触感の優劣に関する評価基準が統制できていなかった可能性がある。今後は、標準刺激を提示する振動デバイスを用意し、それと比較して採点するなど、主観的評価に関する実験手法を再検討する必要がある。

5. 結言

本研究では、触覚提示デバイスの性能評価における新たな指標として、知覚インテンシティに基づく再現性の定量評価法を提案した。振動計測実験および主観的評価実験の結果を比較したところ、両者の間に有意な関係性は確認されなかった。ただし、提案手法が機種サイズの差による触覚提示性能の違いを反映していた可能性が示唆された。

一方で、主観的評価が適切に実施されなかったことにより、提案手法の妥当性を十分に検証するには至らなかった。今後、主観評価の方法を改善し、改めて評価を行う必要がある。

本研究で提案する客観的な評価手法を、今後、より多様な触感カテゴリへの拡張や、異種デバイス（例：ウェアラブルデバイス、VR コントローラ）を含めた横断的な比較によって汎用性の検証を進める予定である。

参考文献

[1] Bensmaïa, S., Hollins, M., and Yau, J.: Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system: A psychophysical model. *Perception Psychophysics*, 67(5), 828-841 (2005).

[2] 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), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 674-679, doi: 10.1109/WHC49131.2021.9517147.

[3] 佐藤信, "官能検査入門", 日科技連出版社, 1978