



二次元テクスチャデータからの振動生成による触感再生

Vibrotactile reproduction of 2D surface textures using finger contact metrics on touch displays

宮崎裕貴¹⁾, 栗田雄一¹⁾

Yuki MIYAZAKI, Yuichi KURITA

1) 広島大学 先進理工系科学研究科 (〒 739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1, yukimiyazaki@hiroshima-u.ac.jp)

概要: 人間は五感を通じて外界を認識し、自身との関係性を明らかにしている。近年では、五感の活用がエンターテインメントや製品開発の分野で注目されており、特にリアルな体験や感性品質の向上を目指す技術開発が求められている。中でも触覚の再現に関する研究は盛んに行われているが、スマートフォンのような小型機器を用いた触覚提示技術はまだ十分に開発されておらず、実現すれば高い有用性が期待される。本研究では、スマートフォンによる振動を用いた触覚ディスプレイを開発し、再現精度に影響を与える画像特徴量との関係を分析することで、その傾向を明らかにすることを目的とする。

キーワード: 触感再生, 振動生成, 表面テクスチャ, 小型触覚ディスプレイ

1. はじめに

人間は五感により外界を感知する。視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚により外界の情報を知覚し、自分との関係性を明らかにしている。五感は日常生活を過ごす上で必要不可欠なものであるが、さらに近年ではエンターテインメントなどで体験の質の向上が求められており、仮想現実注目集まっている。また、物体表面をなぞったときのテクスチャ感を再現する触覚ディスプレイについては様々な研究が行われており、電気刺激を用いた触覚ディスプレイ [1], 指先に振動を提示する触覚ディスプレイ [2], 静電場を用いた摩擦制御による触覚ディスプレイ [3] などが存在する。これらにより、物体の表面荒粗さ感や凹凸感のようなテクスチャ感を提示できる可能性を示した。一方で、スマートフォンのような小型機器を用いた触覚ディスプレイの開発例は少なく、小型機器による触覚ディスプレイを実現できれば有用であるといえる。

そこで、本研究ではスマートフォンを用いた振動による触覚ディスプレイの開発および性能評価検証を目的とする。性能評価検証の概要を図.1 に示す。

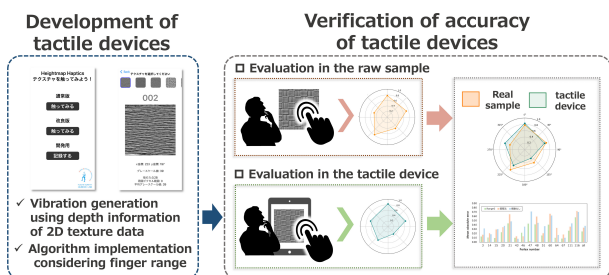


図 1: Research concept

2. 触感生成アルゴリズム

Kim[4] らは、タッチパネル上を触った際の指の動作ベクトルと画像勾配の変化を用いて、電気信号の大きさに変換を行い、摩擦力を算出した。まず以下の (1) 式に基づき、タッチパネル上の指の動作 $\bar{\mathbf{v}}_i$ の算出を行う。ここで、 $\mathbf{x}_i$ は時刻 i におけるタッチパネルと指の接触した座標である。また、 $\hat{i}$ は x 軸方向の単位ベクトル、 $\hat{j}$ は y 軸方向の単位ベクトルである。

$$\bar{\mathbf{v}}_i = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}|} \quad (1)$$

次に、以下の (2) 式に基づき、二次元座標 (x, y) における深さの勾配 $\nabla F(x, y)$ の算出を行う。ここで、 F は二次元座標 (x, y) におけるハイトマップ画像のグレースケール値である。

$$\nabla F(x, y) = \left(\frac{\partial F}{\partial x}, \frac{\partial F}{\partial y} \right) = \frac{\partial F}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial F}{\partial y} \hat{j} \quad (2)$$

最後に、タッチパネル上の指の動作 $\bar{\mathbf{v}}_i$ と二次元座標 (x, y) における深さの勾配 $\nabla F(x, y)$ を用いて、以下の (3) 式により時刻 i に発生させる振動の強度 f_i を求める。ここで、 f_0 とは 0 を含まないスケール因子である。

$$f_i = f_0 \nabla F \cdot \bar{\mathbf{v}}_i \quad (3)$$

また本実験では、指の接触範囲の大きさとスマートフォンにおけるタッチ位置取得の違いを考慮した振動生成アルゴリズムの開発を行う。実際にサンプルを触る際には、指とサンプルの接触部分で知覚した触感を総合的に判断するのに対して、開発した機器を触る際には、指の接触部分を 1 ピクセルの範囲に圧縮して、その座標におけるグレースケール値を取得するので、実際の触感評価とは大きく異なる。そこで、今回は図.2 のように、タッチ位置で取得した座標の周囲ピクセルのグレースケール値の平均を算出する。その結果を (2) 式に代入し、グレースケール値の平均の変化量を振動の

強度に変換する。さらに実際の触感評価においては、指とサンプルの接触面積は一定ではない。また、河合 [5] らにより、指先の力発揮に伴う指の接触面積は指数関数的に増加することが知られている。これらの事実を踏まえ、本システムでは、振動提示としてタッチパネルに接触した指の力から周囲ピクセル数を対応させ、振動再生を行う。図.3 のように、開発したデバイスの画面に表示されているテクスチャをなぞることにより、振動が発生する仕組みとなっている。

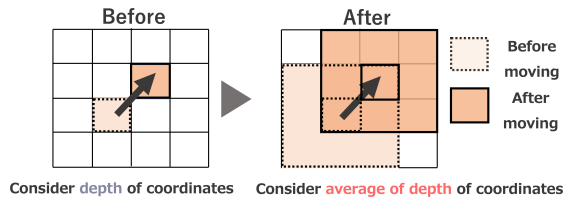


図 2: Consideration of surrounding pixels

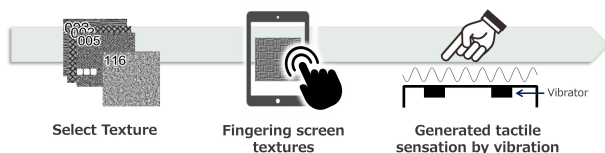


図 3: Main flow of the system

振動生成アルゴリズムの「周囲考慮なし」の状態では、Pertex 2 のサンプルを縦と横になぞった場合の生成信号を図.4 に示す。図.4 より、生成信号からテクスチャの異方性の違いを読み取ることができた。次に振動生成アルゴリズムの「周囲考慮あり」の状態では、Pertex 2 を縦と横になぞった場合の生成信号を図.5 に示す。図.4、図.5 より、「周囲考慮あり」の信号では、波形が滑らかとなることが読み取れた。したがって、「周囲考慮あり」は、サンプルを触ったときの振動情報の大局的な変化を捉えていることがわかった。

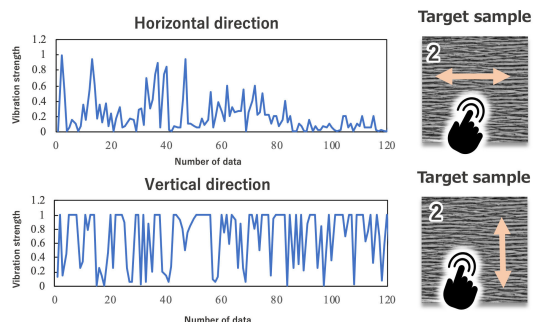


図 4: Vibration data under condition without surrounding information (Sample 2)

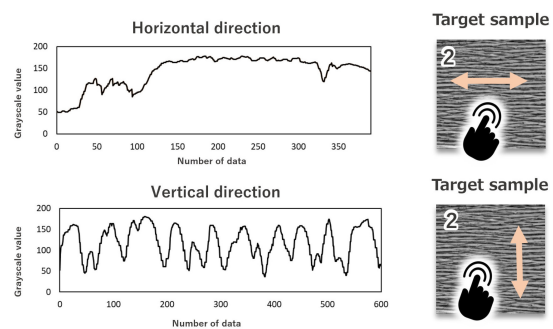


図 5: Vibration data under condition with surrounding information (Sample 2)

3. 評価実験

3.1 官能評価実験方法

触感評価を得るために、健康成人男性 8 名 (22.3 ± 0.8 歳) に協力してもらい触感評価実験を行った。このとき、評価タスクは視覚情報を遮断せず、滑り止めシートで固定された触感サンプル、触感デバイスに利き手示指で自由に触れ、もう片方の手でパソコンを操作してアンケートに回答することとした。アンケートには 7 段階の SD 法を用い、評価項目は「すべすべな-ざらざらな」、「たいらな-おうとつな」、「さらさらする-しっとりする」、「すべりのよい-ひっかかりのある」、「ふかい-こちよい」の 5 対の形容詞とした。被験者には、(1) 実サンプル (2) 振動提示 (3) 振動なしの 3 つの手法、15 種のサンプルに対して計 45 タスクの評価を行った。その際には、順序効果を打ち消すため、タスクの順番はランダムとした。

3.2 官能評価実験結果

まず、(1) 実サンプルと振動提示 (周辺考慮なし)、(2) 実サンプルと振動提示 (周辺考慮あり)、(3) 実サンプルと振動なしの 3 種類の組み合わせで、サンプル毎の触感評価結果に対する絶対平均誤差を調べた。その結果を図.6 として示す。絶対平均誤差は以下の式 (4) で算出した。このとき、 $\hat{y}_{i,j}$ は実サンプルにおける i 番目のサンプル、 j 番目の感性項目の触感評価値、 $y_{i,j}$ は触感デバイスにおける i 番目のサンプル、 j 番目の感性項目の触感評価値である。

$$\text{絶対平均誤差}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\hat{y}_{i,j} - y_{i,j}| \quad (4)$$

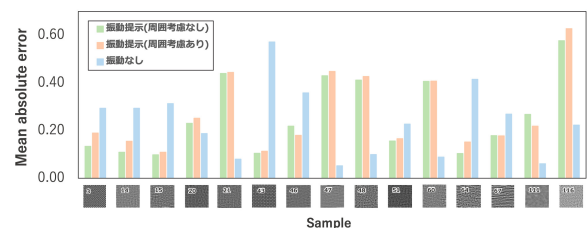


図 6: Mean absolute error

実サンプルと各再生手法との間で触感評価結果に有意差が存在するかを検討するため、ウィルコクソンの符号順位検定を用いて統計的検定を行った。対象とした条件は、(1)

表 1: p-value of Wilcoxon signed-rank sum test
(** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

Pertex number	振動提示 (周囲考慮なし)	振動提示 (周囲考慮あり)	振動なし
3	0.16	0.025*	0.011*
14	0.58	0.090	**
15	0.86	0.45	**
20	$2.1 \times 10^{-3**}$	$1.5 \times 10^{-3**}$	0.23
21	$3.6 \times 10^{-5**}$	$4.8 \times 10^{-5**}$	0.034*
43	0.50	0.39	$5.3 \times 10^{-5**}$
46	$7.5 \times 10^{-3**}$	$8.8 \times 10^{-3**}$	$4.0 \times 10^{-4**}$
47	$7.9 \times 10^{-5**}$	$1.3 \times 10^{-4**}$	0.40
48	$1.1 \times 10^{-4**}$	$7.6 \times 10^{-5**}$	0.20
51	0.14	0.060	$3.3 \times 10^{-3**}$
60	$8.5 \times 10^{-4**}$	$1.3 \times 10^{-4**}$	0.78
64	0.64	0.044*	$2.6 \times 10^{-4**}$
67	0.034*	0.052	0.048*
111	$2.3 \times 10^{-4**}$	$1.8 \times 10^{-3**}$	0.63
116	$2.3 \times 10^{-7**}$	$2.3 \times 10^{-7**}$	$1.0 \times 10^{-2**}$

振動提示（周囲考慮なし）、(2) 振動提示（周囲考慮あり）、(3) 振動なしの 3 種類である。検定結果を表 1 に示す。各再生手法に対し、実サンプルとの評価結果に有意差が認められた場合は、提示手法による触感が実サンプルと異なると判断し、再現精度が低いと評価した。一方、有意差が認められなかった場合は、実サンプルとの評価に差が見られないことから、再現精度が高いとみなした。このようにして、各サンプルに対して最適な触感提示手法を評価した。

3.3 画像特徴量と再現精度の傾向解析

官能評価実験の結果を踏まえ、触感再生デバイスがどのような特徴を持つサンプルに対して高い再現精度を示すかを明らかにすることを目的として、ハイトマップ画像から抽出した特徴量に基づいて主成分分析（PCA）を実施した。特徴量としては、Steerable Pyramid によって画像を分解し、得られた各成分に対して PSS（Perceptual Similarity Score）を算出した後、正規化を行った。得られた特徴量に対して PCA を適用し、累積寄与率が 90 % を超える 3 つの主成分（PC1、PC2、PC3）を抽出した。各主成分の負荷量は表 2 に示す。さらに、抽出した主成分を用いて、各サンプルの分布を可視化した。3 次元での分布を図 7、2 次元での分布を図 8 に示す。なお、図 6 および表 1 の結果を踏まえ、各サンプルにおいて最も再現精度の高い再生手法を色分けしてプロットしている。これにより、画像特徴量に基づく再現精度の傾向を視覚的に分析した。

4. 考察

4.1 触感再生デバイスによる再現精度とテクスチャの関係

図 8 は、PC1 と PC2 の空間におけるサンプルの分布を示しており、触感再現精度の高い提示手法（色分け）に基づいた一定の傾向が観察された。特に、PC2 の値が小さい

表 2: Principal component loading amount

特徴量	PC1	PC2	PC3
平均	-0.076	0.057	-0.50
分散	-0.25	-0.33	0.14
歪度	0.084	-0.16	0.51
尖度	0.30	0.11	0.24
エントロピー	-0.31	-0.27	-0.079
差分分散	-0.26	0.28	0.28
差分エントロピー	-0.29	0.28	0.14
コントラスト	-0.26	0.28	0.28
相関	0.12	-0.46	-0.11
逆差分モーメント	0.28	-0.28	0.14
角次 2 次モーメント	0.32	-0.0093	0.30
二乗和分散	-0.20	-0.25	0.27
分散和	-0.25	-0.33	0.15
合計エントロピー	-0.31	-0.27	-0.079
結合エントロピー	-0.37	0.10	0.020

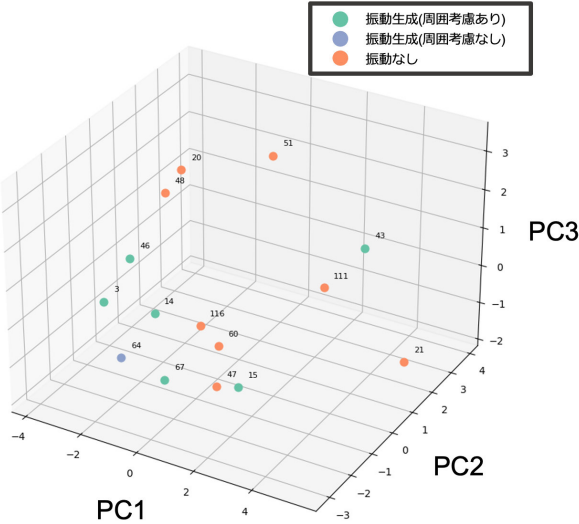


図 7: PCA Analyze(3DPlot)

（負の方向）領域には、触感再生デバイスによる再現精度が高いサンプルが多く分布していた。一方、PC2 の値が大きい（正の方向）領域には、「振動なし」の条件で再現精度が高かったサンプルが多く位置していた。表 2 に示した主成分負荷量を見ると、PC2 は差分分散や差分エントロピー、コントラストなどの高周波的特徴量に正の寄与を示し、逆に、分散や相関、合計エントロピーなどの低～中周波的特徴量に負の寄与を持っていた。Tymms ら [6] は、高周波成分を多く含む表面では、指の滑走によって細かい振動が誘発され、サラサラとした触感が生じることを報告している。この知見を踏まえると、高周波成分の強い（すなわち PC2 の値が大きい）サンプルにおいては、触感再生デバイスによる再

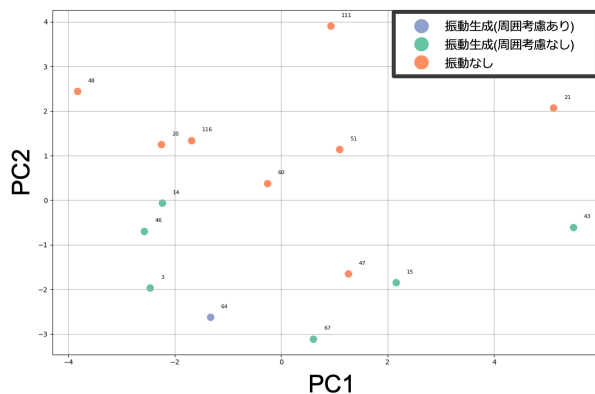


図 8: PCA Analyze(PC1・PC2)

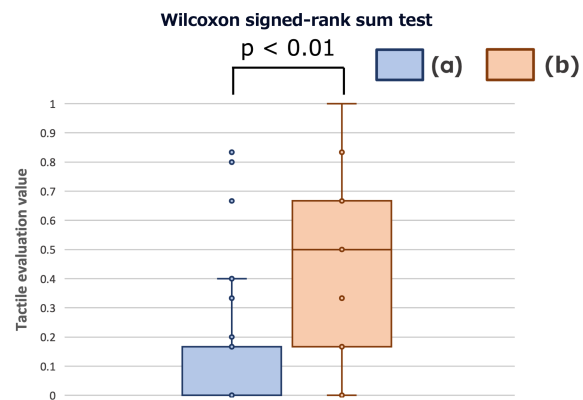


図 9: Differences between evaluators

現精度が相対的に低くなる傾向が確認されたと解釈できる。さらに、PC2 が触感提示手法の違いを反映しているかどうかを検証するために、「振動提示（周囲考慮あり／なし）」を統合した「振動あり」と「振動なし」の2群に分類し、PC2の値に対して Mann - Whitney の U 検定を実施した。その結果、両群間には1%水準で有意な差が認められた ($U = 3.000$, $p = 0.0022$)。この結果は、PC2 が触感提示手法の違いを統計的に反映している可能性を示唆している。

4.2 官能評価実験における評価の揺らぎについて

また、「振動なし」の条件では、2種類の評価傾向が見られた (Fig.9)。1つ目が「滑らかなサンプルである」と評価するパターンである (Fig.9(a))。本実験で用いたデバイスの表面素材は滑らかなガラスであるから、振動が発生しない場合に直感的に「滑らかである」と評価していると推察できる。2つ目が「どちらともいえない」と評価するパターンである (Fig.9(b))。振動による触感再生をすることを前提としたときに、振動が発生しない場合は評価のしようがないという判断をしたため、「どちらともいえない」と評価したといえる。これらの2群は Wilcoxon の順位和検定により、 p 値は 3.5×10^{-26} と算出され、1%の水準で有意差が確認できた。この結果より、振動による提示に対しての評価をするのか、あるいはモバイル端末上における指先の感覚を評価するののかという「評価基準の捉え方」において評価者間で揺らぎがあったと考えられる。評価者間の評価傾向を揃えるために、事前の感性項目の定義や基準の提示などが有効であるのではないかと考えた。

5. 結言

本論文では、スマートフォンに内蔵されている振動子を用いた微細なテクスチャを触感再生するためのデバイスを開発し、実サンプルと触感デバイスの触感評価値の比較を行うことで有効性を検証した。開発したシステムを用いることにより、微細なテクスチャ感の再生が可能であることを示すことができなかったが、振動提示（周囲考慮あり）による表面粗さや凸凹感の強いサンプルに対する再現の可能

性という新たな知見が得られた。実験結果より、現状の課題としては滑らかさの再現精度の低さが挙げられる。今後は被験者数の増加、実験プロトコルの見直しを行い、振動の出力に対応させる関数を非線形関数への変更および周囲ピクセルの考慮する場合の平均値以外の計算方法を精査し、テクスチャ再現精度の向上可能性を再検討する。加えて、今回の実験では iPhone10 を使用したが、利用する端末によって、同じ振動信号を与えたときに異なる信号が生成される可能性があるため、デバイス間の特性調査も今後の課題である。本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP/バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」(JPJ012495) (研究推進法人：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) によって実施された。

参考文献

- [1] H. Kajimoto, Y. Kanno, and S. Tachi, ““fore-head electro-tactile display for vision substitution”,” *Proc.EuroHaptics*, 2006.
- [2] 昆陽雅司, 岡本正吾, ““振動刺激を用いた擬似力覚提示”,” *日本ロボット学会誌*, vol. 30, no. 5, pp. 457-477, 2012.
- [3] 山本晃生, 石井利樹, 飛騨信崇, 樋口俊郎, ““静電気力による摩擦力制御とフィルム移動子を用いた薄型皮膚感覚ディスプレイ”,” *日本 VR 学会論文誌*, 7th, pp. 157-160, 2000.
- [4] S.Kim, A.Israr, and I.Poupyrev, ““tactile rendering of 3d features on touch surfaces”,” *UIST 2013*, pp. 531-538, 2013.
- [5] 川合悟, 小林久幸, 中村秀夫, ““指先の力発揮に伴う皮膚接触面積の変化”,” *帝塚山短期大学紀要. 人文・社会科学編・自然科学編*, vol. 31, pp. 213_a-204_a, 1994.
- [6] C. Tymms, D. Zorin, and E. P. Gardner, “Tactile perception of the roughness of 3d-printed textures,” *Journal of neurophysiology*, vol. 119 3, pp. 862-876, 2018.