



ノイズの位相変調とテクスチャ感との関係

Relationship between textures and the phase modulation of noise

久原拓巳¹⁾, 川合章史¹⁾, 井上雄斗¹⁾, 湯川光¹⁾, 田中由浩¹⁾²⁾

Takumi KUHARA, Akifumi KAWAI, Yuto INOUE, Hikari YUKAWA and Yoshihiro TANAKA

1) 名古屋工業大学 工学研究科 (〒 466-0061 名古屋市御器所町名古屋工業大学, t.kuhara.538@nitech.jp)

2) 稲盛科学研究機構

概要: テクスチャに関する振動触覚情報を解析する場合には、フーリエ変換を通して振幅スペクトルへの着目が広く行われている。一方、筆者らの知る限り位相スペクトルについては深く検討されていない。振幅変化や提示時間に応じて触覚が変化することから、位相スペクトルもテクスチャ感の提示に有効な可能性がある。そこで本研究では、ピンクノイズを用いて、振幅スペクトルを変えずに位相スペクトルのみを変えることで、触覚が変化するかを基礎的検討を行った。

キーワード: 触覚, 位相スペクトル, レンダリング

1. はじめに

ヒトの触知覚にとって振動情報は欠かせない重要な要素の一つである。振動情報を扱ったテクスチャ感の提示に関する研究の多くは振動情報に対し、フーリエ変換を施した後に得られる振幅スペクトルに着目して行われてきている。例えば Bensmaïa ら [1] は知覚される強度が、振幅スペクトルから導出できるパワーをパチニ小体の感度で重み付けしたものと相関することを示した。また、Heravi ら [2] は振幅スペクトルを用いた深層学習で時間加速度信号を再構築することで、テクスチャが提示可能であることを示した。

テクスチャをなぞった際に感じられる振動は時間によって逐次変化をしている。Kuhara ら [3] や Bocherreau ら [4] は正弦波やガボール波形の持続時間を長くすることで振幅の大きさを変えずに知覚される振動強度が増加することを確認している。また、久原ら [5] は振動情報の振幅の時間変化に着目し、過渡的な変化は知覚されやすく、変化の知覚にも個人差が存在している可能性を報告している。これらの先行研究から、振動情報における時間変化の情報もテクスチャ感などに影響している可能性が考えられる。そこで、本研究では位相スペクトルの違いがテクスチャ感などへ与える影響を明らかにすることを目的とする。まず本稿では、振動の振幅スペクトルを変えずに位相スペクトルのみを変えることで、提示される振動刺激の感覚が変化するかを検証する。

2. 実験方法

2.1 刺激

ピンクノイズ及び 5 種類のテクスチャを指先でなぞった際に得られる皮膚振動を用意した。図 1 で示すように、それらをフーリエ変換して得られた振幅スペクトルと位相スペクトルを用いて、振幅スペクトルにはピンクノイズのものを、

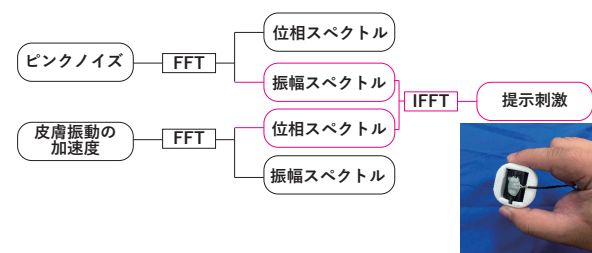


図 1: 提示刺激の作成方法

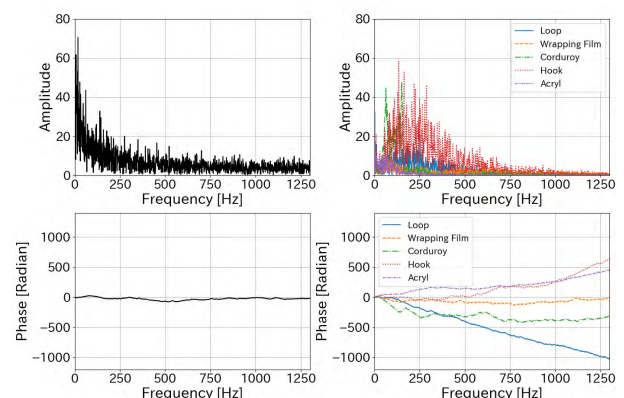


図 2: 振幅スペクトルと位相スペクトル：(左) 元々のピンクノイズ, (右) 用意したテクスチャを指先でなぞった際の皮膚振動

のを、位相スペクトルにはテクスチャをなぞった際の皮膚振動のものを組み合わせて振動刺激を生成した。生成する振動刺激は 1 秒間とし、サンプリング周波数 10kHz で生成した。実験には生成した 5 種類の刺激と最初に用意したピンクノイズの合計 6 種類の刺激を用いた。なぞった対象はアクリル、コーデュロイ生地、ラッピングフィルムの 400 番、

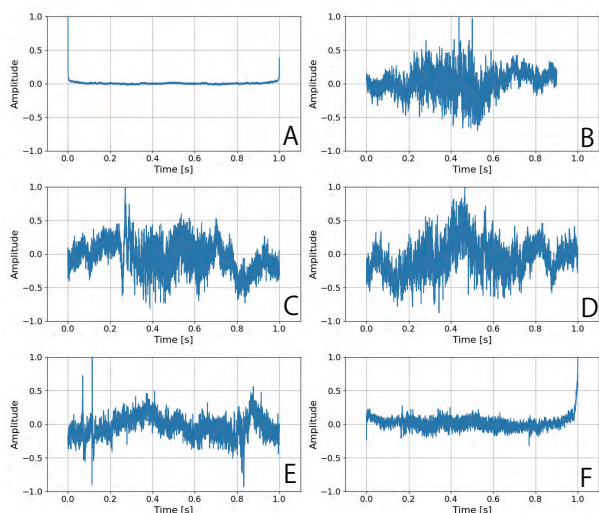


図 3: 用意したピンクノイズと生成した 5 種類の刺激の時間領域の振幅; A) 用意したピンクノイズ, B) ベルクローテープフック面, C) コーデュロイ生地, D) ベルクローテープループ面, E) アクリル, F) ラッピングフィルム 400 番

ベルクロテープのフック面およびループ面である。ピンクノイズおよび 5 種類のテクスチャに対する振幅スペクトルと位相スペクトルを図 2 に示す。また、図 3 に図 1 の方法を用いて、ピンクノイズと 5 種類のテクスチャの位相スペクトルで生成した振動刺激の波形を示す。

皮膚振動は第一関節と第二関節の間にリングの形で取り付けられた加速度センサ(昭和測器社, Model 2302-b)を用いて計測した。押し付け力を統制するために 6 軸センサ(ATI Industrial Automation 社, F/T センサ:Gamma) の上に対象を置き、0.5N で 80mm/s のなぞり速度で 1 秒間なぞってもらった時の皮膚振動を、サンプリング周波数 10kHz で計測した。

2.2 実験手順

実験では 5 名の被験者(20 代男性:5 名)に協力してもらい、図 1 で示すように利き手の親指と人差し指で振動子(Foster 社, 646752)を振動方向に把持してもらった。実験中は被験者にはノイズキャンセリングヘッドホン(SONY 社, WH-1000 XM5)を装着してもらい、聴覚による影響を排除するためにホワイトノイズを提示しながら実験を行った。被験者には元々のピンクノイズ及び生成した 5 種類の振動、計 6 種類の振動触覚刺激の組み合わせ(全 21 通り)を各 5 回ずつ、計 105 試行ランダムに提示し、同一または異なると感じたかを回答してもらった。さらに、疲労の影響を避けるため、52 回目の試行後に 3 分間の休憩を設けた。

3. 結果および考察

全被験者分の「同じ」と回答した平均回答率と標準偏差の結果を刺激ごとにまとめたヒートマップを図 4 に示す。縦軸と横軸はそれぞれ提示した刺激の名称が示されている。この結果から元々のピンクノイズと生成した刺激を比較した際にはベルクロテープのループ面の位相で生成された刺激

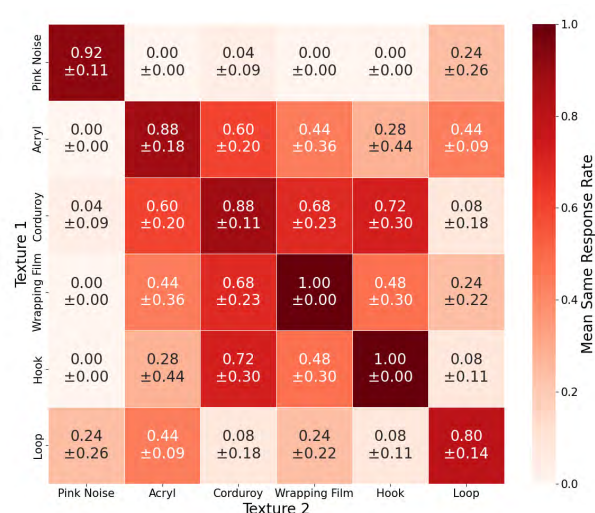


図 4: 全被験者分の「同じ」と回答した平均回答率をまとめたヒートマップ

との組み合わせは 80%, それ以外の生成した刺激との組み合わせではほぼ 100%異なると知覚されたことがわかった。したがって、位相スペクトルを変えることはピンクノイズの振動とは大きく変化させたものとして知覚されている可能性が考えられる。次に、生成した刺激同士の比較では、その刺激についても同一の刺激を同じと回答する割合が最も高いが、ベルクロテープのループ面の位相で生成された刺激を除く 4 種類の刺激間で混同しやすかったことが明らかとなった。特にアクリル、コーデュロイ生地の位相を用いて生成した刺激はそれぞれの間で回答を間違いやすく、同様にコーデュロイ生地とベルクロテープのフック面の位相を用いて生成した刺激で回答を混同しやすかった傾向にあった。

これらの結果から、位相スペクトルを変化させることで振動情報のテクスチャ感を変化させることできる可能性が示唆された。また、異なる位相スペクトルでも似ていると評価された場合もあり、位相スペクトルの類似性と触感の類似性を今後調べていく必要がある。

4. まとめ

本研究では、振動触覚刺激の位相スペクトルが触覚に与える影響を検証した。ピンクノイズの振幅スペクトルに、異なるテクスチャをなぞった際に得られた皮膚振動の位相スペクトルを組み合わせることで 5 種類の刺激を生成し、その知覚的違いを比較した。その結果、位相スペクトルはテクスチャの印象に影響を及ぼす可能性が示唆された。今後は、位相スペクトルの調整が知覚に与える影響を調べるため、知覚空間や周波数特性について解析を進める。

謝辞

本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム(JP-MJSPS2112)、科研費研究活動スタート支援(JP23K19999)、稲盛科学研究機構フェローシッププログラムの支援を受けたものです。

参考文献

- [1] S. J. Bensmaïa, M. Hollins: The vibrations of texture, *Somatosens Mot Res*, Vol. 20, No. 1, pp. 33–43, 2003.
- [2] N. Heravi, H. Culbertson, A. M. Okamura, and J. Bohg: Development and Evaluation of a Learning-Based Model for Real-Time Haptic Texture Rendering, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 17, No. 4, pp. 705–716, 2024.
- [3] T. Kuhara, H. Yukawa, Y. Tanaka: Influence of Longterm Duration and Damping Shapes to Perceived Intensity for Vibrotactile Stimulation, *Proceedings in IEEE/SICE International Symposium on System Integrations*, 2025.
- [4] S. Bochereau, A. Terekhov, & V. Hayward: Amplitude and Duration Interdependence in the Perceived Intensity of Complex Tactile Signals, *Proceedings of EuroHaptics*, pp. 93–100, 2014.
- [5] 久原拓巳, 湯川光, 田中由浩: 振動触覚刺激における包絡線形状知覚に関与するパラメータの基礎検討, *ロボットメカトロニクス講演会*, 2025.