

# 調整, 制御が可能な狭帯域フィルタによるテクスチャモデリング

○戸塚 圭亮 (東京電機大学), 五十嵐 洋 (東京電機大学)

## Adjustable and Controllable Texture Modeling

### with Narrow Bandwidth Filters

○ Keisuke TOZUKA (Tokyo Denki University), and Hiroshi IGARASHI (Tokyo Denki University)

Abstract: The vibration transmitted to the finger changes according to the speed and force when the finger touch textures. The digital filters are used to reproduce these changing vibrations to reproduce the texture feeling. However, when actually reproduced using a transducer, the vibration is modified by the reproduction environment. In addition, if the measured vibration is reproduced as it is, the generated data becomes redundant. Therefore, this paper describes a method to reproduce vibration properties individually, enabling adjustment and control. In order to adjust and control the vibration spectrum, each peak was reproduced using narrow bandwidth filters. Spectral similarity was evaluated when several narrowband filters used for reproduction were eliminated. Then, the gain of the narrow band filter was PI-controlled. This control enabled the construction of a system capable of reproducing vibrations without influence from reproduction environments.

## 1. 序論

物体表面をペンなど硬質なツールでなぞるとその物体表面がどのようなテクスチャを持つか知覚できる。これは振動がツールに伝達する物理現象によっておきる。この振動とテクスチャの関係を利用して、テクスチャを再現する取り組みが行われた<sup>[1][2]</sup>。そして、振動の知覚は位相情報は関係なく、同一のスペクトルであれば人間は振動を区別できないことが明らかにされた<sup>[3]</sup>。彼らの貢献により、実際になぞったときの振動を測定してデジタルフィルタでそのスペクトルを再現する手法も提案されてきた<sup>[4][5]</sup>。自動フィルタデザインシステムは ARMA を利用することで、より次数の少ないフィルタでの再現に成功している<sup>[6]</sup>。最近ではこの自動フィルタデザインシステムを起点として、様々な方向にアップデートがされている。例えば、異方性テクスチャへの対応<sup>[7][8][9][10]</sup>や測定していないテクスチャを再現するための研究<sup>[11][12][13]</sup>などがある。

一方でまだ課題は残されている。自動フィルタデザインシステムは測定した振動をそっくり再現する。この再現は人間の知覚を考慮しておらず、実際には冗長なデータが含まれる。振動の知覚はパチニ小体とマイスナー小体で知覚される。マイスナー小体はおよそ 10 Hz から 100 Hz 以下が対象であり、パチニ小体は 100 Hz から 400 Hz 程度が知覚範囲である<sup>[14]</sup>。この範囲外にある周波数の振動は冗長であり、再現する必要がない。さらに、知覚範囲にあってもマスキング効果が報告されており<sup>[15]</sup>、より低周波が重要とされる傾向がある<sup>[16]</sup>。また、振動特性のどの部分が重要かという議論においては帯域幅の重要性などが挙げられている<sup>[17]</sup>。

これらの作業から実際には必要としない冗長なデータがあることは明らかだが、その除去には専用のフィルタを別で用意しなければいけない。例えば Hassen らは加速度知覚閾値 (ADT) によるフィルタリングを提案している<sup>[18]</sup>。2つ目の課題として、レンダリング環境に応じて目的のテクスチャが再現できない場合がある。振動子にはそれぞれ共振点があり、同等の電圧をかけても周波数によって出力できる振幅が変わる。通常は逆フィルタをかけることで、目的の振動を再生しているが、この共振点は設置位置など外的要因によって変

動する。つまり、外的要因によって共振特性が変わるため、逆フィルタをその都度設計し直す必要がある。これらのフィルタデザイン後の調整に注目した自動フィルタデザインシステムは提案されていない。

これらの課題2つを同時に解決するには狭帯域フィルタの利用が適している。Burns らは先に挙げたフィルタによる圧縮<sup>[18]</sup>や岡本らの量子化による圧縮<sup>[19]</sup>をトップダウン戦略として説明している<sup>[20]</sup>。かれらはテクスチャに合わせて振幅と周波数を調整する手法を提案した。狭帯域フィルタによる再現はどちらかというところボトムアップ戦略よりであるが、場合によっては品質を落とすことなく再現できる。実際に、細かいテクスチャについては狭帯域フィルタで代替しても遜色がないことを Alma らは示している<sup>[21]</sup>。かれらはいくつかの実験を試行し、テクスチャ振動に代替できる理想的なローパスフィルタとハイパスフィルタの組み合わせを模索した。狭帯域フィルタによる代替は、これまで提案されてきた ARMA や WST, FDNN, DSTN と比較して非常に軽いフィルタで再現する。さらに、追加のフィルタを使用せずに代替で圧縮を実現できる。しかし、現状で測定された加速度信号から狭帯域フィルタを自動的にデザインするシステムは提案されていない。

我々はピーク検出に基づくパラメトリックイコライザの自動デザインシステムを提案した<sup>[22]</sup>。PEQ は狭帯域フィルタの組み合わせであり、これによって広帯域振動の再現ができる。さらに、ADT に基づき使用する狭帯域フィルタの数を削減することで、代替刺激を生成する。この PEQ による代替刺激生成システムの利点は圧縮率の任意調整とピーク振幅の可制御性にある。知覚範囲にある振動の特徴も用途次第では不要であり、これをモデリング後に任意に削除できる。加えて、ピークの振幅そのものをフィルタデザインに使用する。これにより再現した振動から再度ピーク検出し、振幅を比較することで制御を可能にする。この論文では、測定した振動から代替刺激を自動的に生成する手法を紹介する。次に、この手法で生成されるスペクトルの再現性を評価する。そして、ピーク振幅の制御手法とシミュレーション上での制御結果を示す。

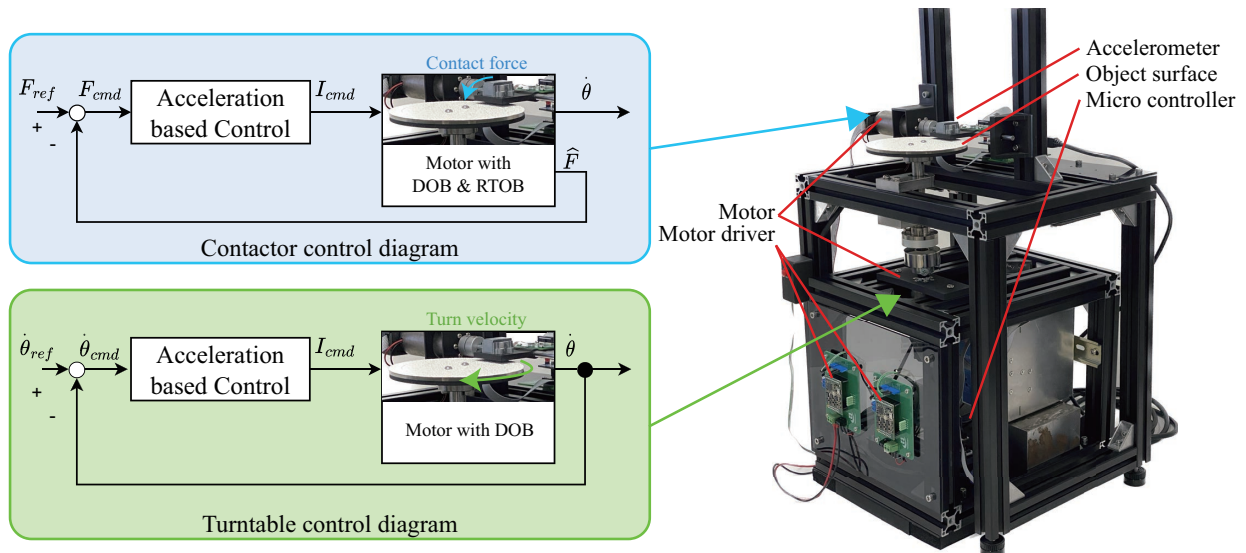


Fig.1 Device for recording vibrations when proving the texture surfaces. The turntable rotates to reproduce the tproving motion like the recorder. Circumferential recording is not affected by sudden bumps.

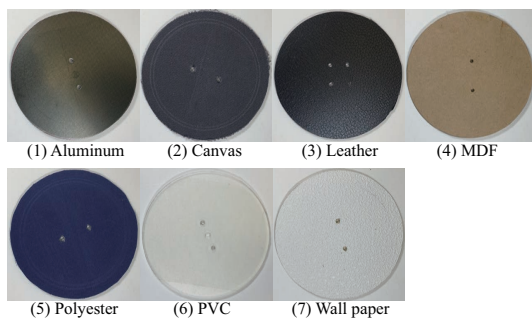


Fig.2 Texture surfaces used to generate and evaluate texture models.

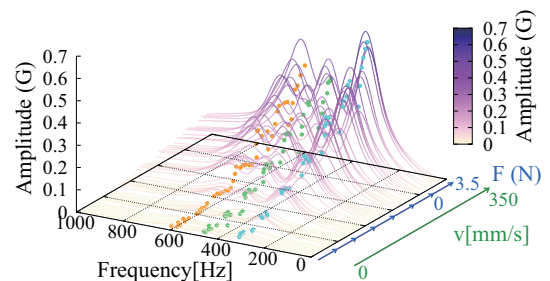


Fig.3 Peak detection procedure. Peaks were detected in descending order from the data with the highest amplitude. Example is the wall paper data set.

## 2. 手法

この論文は測定した振動から狭帯域フィルタをデザインして代替刺激としての有効性を確認することを目的とした。このセクションでは測定振動から狭帯域フィルタを自動的にデザインする詳細な手順を説明する。最初にデータの収集方法と処理について説明する。次にピーク検出と周波数解析をもとにフィルタ特性を決定し、テクスチャモデルを生成する手順を説明する。

### 2.1 振動の取得

測定装置の機構はレコードプレイヤーと同じである。ターンテーブルとその台に接触する接触子がある (Fig. 1)。装置は2重構造で、ターンテーブルと接触子は上部パーツに配置された。そしてターンテーブルを駆動させるモータや電源、マイクロコントローラは全て下部パーツに配置された。これは速度制御されたモータの振動が記録データに混入することを防止している。そのため、ターンテーブルとそれを駆動するモータは磁器カップリングで10 mm 離して結合された。

テストに使用されたテクスチャは7種あり、金属、布、皮、プラスチック、木の材料が用意された (Fig. 2)。記録時はアルミ製の直径120 mmのターンテーブル上に材料をネジ止めで固定した。3DプリントされたABS樹脂製の接触子上に AnalogDevices 社の ADcmXL3021 が配置され、接触点にはクロム加工され

た鋼球が採用された。ターンテーブルおよび接触子は Maxon Motor のギアレスモータ DCX32L で駆動される。接触点からモータ軸までの距離は30 mmで、最大4.0 Nまでの垂直力を出力できる。回転速度は7260 rpmまで出力可能であり、人間と材料間でのインタラクションを全てカバーできる。力制御には大西らが提案した外乱オブザーバと反トルクオブザーバ<sup>[23]</sup>が採用され、センサレスで接触力が制御された。外乱オブザーバは速度制御にも適用されることで、指令通りの速度でターンテーブルが回転した。モータの制御は全てARMのマイクロコントローラ F767ZI で5 kHzのサンプリングレートで制御された。

振動データは評価ボード EVAL-ADCM によって1秒間の記録を22.704 kHzで実行された。データが指定のフォルダに保存されるとファイルの数に応じて測定装置の速度及び力のパラメータが変化し、2分程度で測定を終える。記録されたデータは5 kHzにダウンサンプリングされ、10 Hzのハイパスフィルタと1 kHzのローパスフィルタが適用された。

### 2.2 モデリング

本論文で提案する手法は、ピーク検出結果から PEQ の特性を決めて振動を再現する。PEQ による信号の合

成は次式ようになる。

$$\hat{S}_o(z) = G_w S_w(z) + H_{peq}(z) S_w(z) \quad (1)$$

ここで、 $S_w$  はホワイトノイズ信号である。合成信号は  $H_{peq}$  によって制限された信号とノイズゲイン  $G_w$  で増幅された信号の加算である。 $H_{peq}$  は次式のように定義される。

$$H_{peq}(z) = \sum_{i=1}^m G_i(z) H_i(z) \quad (2)$$

ここで、 $G_m$  はピークゲイン、 $H_m$  はバンドパスフィルタである。この二つはピークの数  $m$  に応じて増加し、帯域制限と増幅でピークを再現する。 $H_m$  の特性  $Q_m$  は基本周波数  $F_m$ 、帯域幅  $B_m$  で決定される。つまり、PEQ を構築するために必要なパラメータはピークの情報であり、これはピーク検出後に解析することで得られる。

はじめに、記録されたテクスチャデータセットは FFT 後、シグマ 30 のガウシアンフィルタによって平滑化され、山登り法でピークが検出された。検出されたピークの振幅と周波数は PEQ のピークゲイン  $G_m$  と基本周波数  $F_m$  になる。ピークゲイン  $G_m$  は検出された振幅に対してスカラー倍 (120 倍) で決定された。さらに検出されたピークに対してガウシアンフィッティングを適用してその帯域幅を推定した。推定された帯域幅は PEQ の帯域幅  $B_m$  として使用された。次に、十分にピークから離れた帯域 (今回は 2k から 2.5 kHz) の振幅平均をノイズ量として定義し、ピークゲイン  $G_m$  に使用したものと同じスカラー倍でノイズゲイン  $G_w$  を算出した。

このピーク検出と解析から PEQ のパラメータを決定する手順においてはピークの同一性を確保する必要がある。その理由は PEQ のパラメータそれぞれがなぞる速度や力に対応する必要があるためである。このとき、ピークの同一性が取れていないと速度と力の条件間での補完をパラメータに適用できない。そこで最大ピークになるデータとして、最も強い力かつ、早い速度のデータから降順でピーク検出を実行した (Fig. 3)。そして一番最初のデータにおけるピーク検出数を最大ピーク数として固定した。ここで、検出されたピークの周波数の前後のデータをを比較し、もっとも近い周波数のピークが同一のピークとして保存された。比較範囲は  $\pm 60$  Hz に限定され、次のデータで検出されなかった場合は基本周波数と帯域幅は前のピークのデータが継承され、振幅のみ変化する。この継承システムによって突発的なピークの検出ミスや低速域でのピーク消失に対応した。

PEQ パラメータのなぞり速度、力に対するプロットはバイリニア補完で補われた。バイリニア補完の数は PEQ パラメータ数に依存し、ピークの数で変動する。1 つのピークの場合は 4 つ必要とし、2 つのピークの場合は 7 つ、3 つのピークであれば 10 必要になる。この数は ARMA モデルの場合、合計で 10 以上必要だったことを考えると十分な簡略化である。実際のところ、周波数と帯域幅はピークがほとんどない低速域でばらつきが出るが、高速域はほぼリニアに変化している。そのため、バイリニアではなく単純な線形補完に置き換えられる可能性がある。

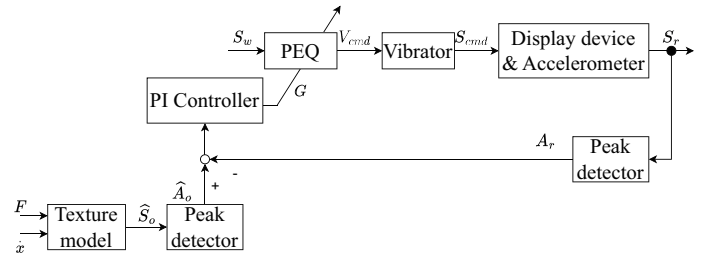


Fig.4 Control system to reproduce vibrations as modeled without being affected by the reproduction environment.

### 2.3 外乱除去制御

再生デバイスや再生環境によって指令通りに振動が出ないことは、触覚振動を取り扱う研究者の中で問題とされてきた。特に振幅が主に影響を受けるパラメータである。狭帯域フィルタによるテクスチャモデルはこの問題を解決できる。我々の手法では、収集したテクスチャのデータセット  $\hat{S}_o$  からピーク検出したときのピーク振幅  $\hat{A}_o$  をターゲットとして PI 制御する (Fig. 4)。通常、PEQ のピークゲイン  $G_m$  は振幅のスカラー倍によって決定することができる。これによって生成された信号を電圧  $V_{cmd}$  としてマイクロコントローラが指令し、振動子に入力されて振動  $S_{cmd}$  が出力される。ただし、 $S_{cmd}$  は観測できない。

実際には振動子は提示環境に固定され、加速度センサによって観測が可能である。つまり、提示環境の伝達関数、振動子が持つ伝達関数、加速度センサが持つ伝達関数の影響を受けた振動  $S_r$  が取得される。この  $S_r$  は再生環境の影響を受けて想定通りの波形にならない。従来のように逆フィルタを設計するとたしかに  $\hat{S}_o = S_r$  が成り立つが、環境が変わった場合に再度設計が必要である。そこで、 $S_r$  を触覚情報を失わない解像度 256 データ<sup>[24]</sup> ごとに FFT し、ピークを検出する。検出されたピークの振幅  $A_r$  とターゲット振幅  $\hat{A}_o$  の差に応じて PI 制御をかけて  $G_m$  を決定する。この  $G_m$  が制御された PEQ で振動を生成することで逆フィルタを作成することなく、 $\hat{S}_o = S_r$  が成り立つ。

## 3. 結果

本論文で提案する手法はピークを個別に再現し、必要に応じて除去や制御を可能にする。ここでは人間の知覚特性を考慮したスペクトル類似度評価関数を用いて、ピークを削除しても類似性が低下しないことを証明する。さらに本手法が外乱除去に対しても対応可能であることをシミュレーション結果より説明する。

### 3.1 スペクトルマッチング評価

スペクトルのマッチング精度の評価はこれまでのモデリング手法で様々な評価式が使用されてきた。最もよく使用される RMSE はスペクトルのマッチング評価に適してないとされる。Culbertson らは次式で定義される光のスペクトルの類似評価に使用された Goodness Fitting Coefficient (GFC) を使用した<sup>[25]</sup>。この式はコサイン類似度をスペクトル評価用に符号なしで算出するように改良された類似度評価式である<sup>[26]</sup>。

$$GFC = \frac{|\sum_i \hat{S}_o(f_i) S_o(f_i)|}{\sqrt{|\sum_j [\hat{S}_o(f_j)]^2|} \sqrt{|\sum_k [S_o(f_k)]^2|}} \quad (3)$$

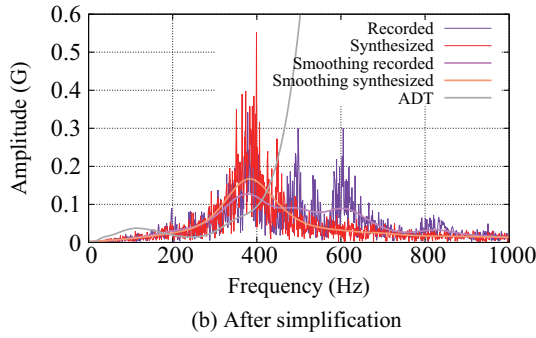
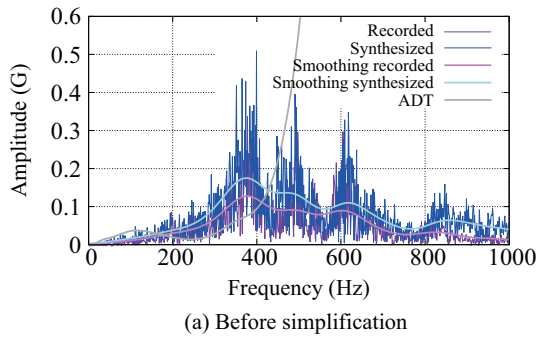


Fig.5 Evaluation and comparison of the accuracy of the reproduction of vibration spectra. (a) is the case where all peaks are reproduced. (b) is the case where peaks below the ADT are reduced. Spectra of canvas are shown as an example.

ここで、 $S_o$  は測定信号であり、 $\hat{S}_o$  はモデルから出力される信号である。この式には人間の振動に対する弁別域が考慮されていない欠点を備えている。Hassen らが提案している ST-SIM はスペクトル類似度と時間類似度の2つで信号の類似性を評価する<sup>[18]</sup>。彼らの提案する評価式の特徴のひとつに ADT を考慮した類似度評価がある。人間が知覚できる最小変位に関する研究のデータ<sup>[27]</sup>をもとに加速度領域に変換した閾値 ADT を使い、類似度評価に反映させていた。

そこで、本研究はスペクトル類似度の評価に適した  $GFC$  に対して、ADT による調整を加えた新しい評価式を用いる。ADT が小さいほど感度が高いため、感度の高い周波数における類似性の評価の影響力を強くする。よって ADT を利用した人間の知覚が考慮された評価指標  $GFC_h$  は次式のようになる。

$$G_{th} = 1/S_{th} \quad (4)$$

$$GFC_h = \frac{|\sum_i G_{th}(f_i) \hat{S}_o(f_i) S_o(f_i)|}{\sqrt{|\sum_j G_{th}(f_j) [\hat{S}_o(f_j)]^2|} \sqrt{|\sum_k G_{th}(f_k) [S_o(f_k)]^2|}} \quad (5)$$

ADT の逆数を各ベクトルにかけることで、周波数ごとの評価式に与える影響を変える。さらに ADT 未滿に比較対象の振幅二つがある場合、知覚できない振幅とみなせる (Fig. 5)。この場合の信号は、評価に含めないことで知覚領域のデータのみを対象に評価した。

Fig. 6 は 1000 Hz までのデータを従来の  $GFC$  で評価した結果である。 $GFC$  は 0.9 以上あると類似性が高いスペクトルとされており、すべてのピークを再現した場合のみ一部のテクスチャで 0.9 を超える。そして、ADT を考慮して再現するピークを削減した場合、評価は canvas を除いて減少傾向にある。一方で ADT を加え

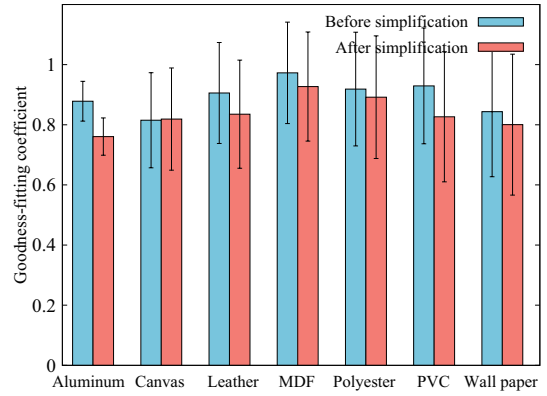


Fig.6 Evaluation results of spectrum matching with  $GFC$ .

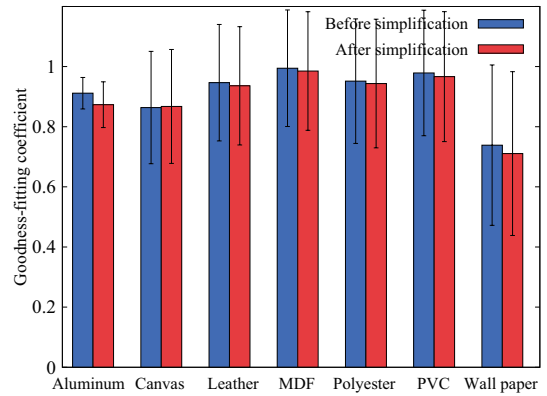


Fig.7 Evaluation results of spectrum matching with  $GFC_h$  included ADT.

た  $GFC_h$  で評価した結果では、ほぼすべてのテクスチャにおいてピーク除去前後での差が見られなかった (Fig. 7)。また、wall paper の評価については ADT を加えた評価式の方が低く評価し、aluminum の評価はほとんど変化がなかった。

### 3.2 外乱除去シミュレーション

本シミュレーションでは、二つの状況を想定して PI 制御をした場合としなかった場合について検証した。1 つ目はテクスチャモデルからの出力が一定な場合、2 つ目はテクスチャモデルからの出力が一定でない場合である。これはなぞり動作が一定、一定でない場合の両条件で外乱が除去できることを証明するための条件である。外乱は 0.5 Hz で入力されるものとし、目標振幅  $\hat{A}_o$  が一定でない条件では 1 Hz の正弦波状に変化するものとした。

目標振幅  $\hat{A}_o$  が一定の場合、制御されていない振幅は正弦波状に遷移していた (Fig. 8-a)。また、目標振幅に十分に達していない振幅であった。一方で、外乱除去された振幅  $S_r$  は目標とほぼ同じあたりに制御されていた (Fig. 8-b)。ここで、振幅が上下する原因はホワイトノイズのランダム性が起因するものであり、外乱を含まない信号にも確認された。目標振幅  $\hat{A}_o$  が正弦波状に遷移する場合も同様に追従可能であることを確認した。外乱の周期が遅いため、部分的にしかその影響が確認できないが、5.5 sec 付近で特に外乱の影響を受けていた。しかし、外乱除去の制御がかかることで、その外乱を打ち消して目標振幅  $\hat{A}_o$  に近づけていることが確認された。

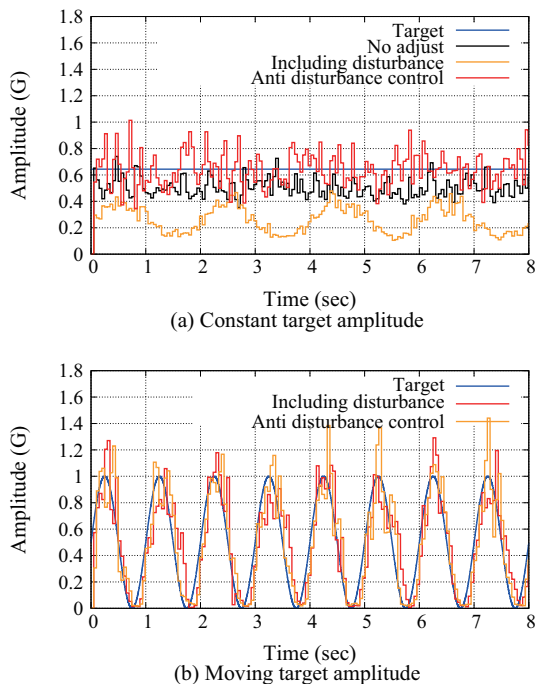


Fig.8 Simulation results of disturbance rejection control. (a) is the case where the target amplitude is constant. (b) shows the case where there is a change in target amplitude.

## 4. 討論

### 4.1 スペクトルマッチング評価

スペクトルマッチングの評価式として、従来手法の  $GFC$  と新たに  $ADT$  を加えた  $GFC_h$  を使用した。この二つで評価した結果、再現するピークを削減しても人間の知覚できない範囲であれば  $GFC_h$  の評価が下がらなかった。これは、 $ADT$  を加えた  $GFC_h$  に人間の知覚特性が考慮された影響である。この評価式によって評価が上がったテクスチャもあれば、低下したテクスチャもあった。例えば wall paper の評価が低下した原因は、100 Hz 付近の重要なピークが検出されなかったためである。このピークを検出するためには、ガウシアンフィルタのシグマを 30 よりも小さくする必要があった。本論文では、シグマの最適化をしなかったが、ここで提案した評価式をもとにシグマを最適化することで対応可能である。Aluminum において評価式の違いに差がなかった原因は、削除したピークの周波数が 1000 Hz 以上だったためである。従来の  $GFC$  での評価においても 1000 Hz 以上は評価に含まれておらず、これが原因である。若干の違いはほとんどピークではない範囲の評価の差によって発生していた。

評価結果全体について、標準偏差が Aluminum 以外が大きい原因は粗さが原因である。粗さが大きいほど、なぞり速度に応じて周波数の変動が大きくなる。提案手法は、ピーク検出におけるピークの同一性確保のために前後のピークの周波数を比較していた。比較範囲を超える周波数のピークは同一とはみなせないため、粗さが大きいテクスチャはピークの同一性を維持しづらい。実際に、標準偏差の大きなテクスチャにおいて、低速になるほど評価が減少傾向にあることを確認した。mdf の場合は超低速においてはほとんど  $ADT$  以下のため高評価だが、中間における評価は低かった。これは粗

さとは別にピークの数(乱雑性)が影響し、ピークの同一性を維持することを困難にしていたといえる。これらの問題はピークの同一性確保の手法がテクスチャごとに一定だったことが原因である。粗さや乱雑性をもとに、比較範囲などの設定を変えることでより精度の高いモデルが生成可能である。

### 4.2 外乱除去シミュレーション

本論文で提案する PEQ によるテクスチャモデリングの利点として、振幅を制御できることを挙げた。今回はシミュレーション上で外乱を与えた環境で、振幅を目標振幅に制御できるか検証した。その結果として、正弦波上の外乱の影響を受けずに振動を出力することが可能となった。この制御において、PEQ のゲインは変動するため、モデル生成時のゲインは使用されない。目標振幅  $\hat{A}_0$  として、実際に測定したテクスチャの振幅情報を持っていけば良い。つまり、本論文で提案するモデリングおよび制御手法は、測定振動の解析情報をそのまま使用して振動を生成した。これは、これまでのスペクトル全体を包絡線上に IIR フィルタで再現する手法とは全く異なる手法と言える。

今回はシミュレーションでの検証だったが、実際に主観評価を行う必要がある。本手法はどのような再生環境でも測定した振動を出力できるように制御されている。つまり、再生環境を無視して測定環境における振動が再生される。このことにより、正しい振動が再生できるが、再生環境を無視することで違和感を人間が感じる可能性がある。例えば人間が振動体を強く握れば通常減衰される振動が、減衰されずに再生されることになる。そのため、主観評価を実施し、さらに目標振幅に関して改善する必要がある。

## 5. 結論

本論文では、テクスチャをなぞったときに振動から、狭帯域フィルタによる代替刺激を自動的に生成するシステムを提案した。提案した手法は、再現時に必要に応じて再現するピーク数を調整可能な手法となった。実際に、人間の知覚に合わせてピークを削減して、人間の知覚を考慮した評価式でスペクトル再現性を評価した。その結果として、ピーク数の調整ができることを確認し、さらに削減しても人間の知覚に影響しないことを示唆した。

さらに、提案手法の利点として再現するピークの振幅を制御するシミュレーションをした。シミュレーションにおいては外乱を加えて、制御によってその外乱を取り除けることを確認した。このようにピークを個別に制御して外乱を除去できるテクスチャモデリング手法は本手法のみである。本手法は、他のテクスチャモデリング手法に比較すると再現精度が劣るものの、調整可能という利点があることが証明された。制御手法にさらなる改善を加えることで、より利便性の高いモデリング手法になる。

## 参考文献

- [1] Masashi Konyo et al.: "A Tactile Synthesis Method Using Multiple Frequency Vibrations for Representing Virtual Touch". 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3965–3971, (2005).

- [2] S. Choi and H.Z. Tan: “Toward realistic haptic rendering of surface textures”. *IEEE Computer Graphics and Applications* 24.2, pp. 40–47, (2004).
- [3] Sliman J. Bensmaïa and Mark Hollins: “Complex tactile waveform discrimination”. *The Journal of the Acoustical Society of America* 108.3, pp. 1236–1245, (2000).
- [4] Hari Vasudevan and M. Manivannan: “Recordable Haptic textures”. *2006 IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications (HAVE 2006)*, pp. 130–133, (2006).
- [5] Vijaya L. Guruswamy, Jochen Lang, and Won-Sook Lee: “Modelling of Haptic Vibration Textures with Infinite-Impulse-Response Filters”. *2009 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*, pp. 105–110, (2009).
- [6] Heather Culbertson, Juliette Unwin, and Katherine J Kuchenbecker: “Modeling and rendering realistic textures from unconstrained tool-surface interactions.” *IEEE transactions on haptics* 7.3, pp. 381–93, (2014).
- [7] Weizhi Nai et al.: “Vibrotactile Feedback Rendering of Patterned Textures Using a Waveform Segment Table Method”. *IEEE Transactions on Haptics* 14.4, pp. 849–861, (2020).
- [8] Sunghwan Shin et al.: “Data-Driven Modeling of Isotropic Haptic Textures using Frequency-Decomposed Neural Networks”. *2015 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 131–138, (2015).
- [9] Sunghwan Shin and Seungmoon Choi: “Hybrid Framework for Haptic Texture Modeling and Rendering”. *IEEE Access* 8, pp. 149825–149840, (2020).
- [10] Joolekha Bibi Joolee and Seokhee Jeon: “Deep Multi-Modal Network Based Data-Driven Haptic Textures Modeling”. *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 1140–1140, (2021).
- [11] Waseem Hassan et al.: “Towards Universal Haptic Library: Library-Based Haptic Texture Assignment Using Image Texture and Perceptual Space”. *IEEE Transactions on Haptics* 11.2, pp. 291–303, (2017).
- [12] Yusuke Ujitoko, Yuki Ban, and Koichi Hirota: “GAN-Based Fine-Tuning of Vibrotactile Signals to Render Material Surfaces”. *IEEE Access* 8, pp. 16656–16661, (2020).
- [13] Negin Heravi et al.: “Development and Evaluation of a Learning-based Model for Real-time Haptic Texture Rendering”. *arXiv*, (2022).
- [14] Kenneth O Johnson: “The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors”. *Current Opinion in Neurobiology* 11.4, pp. 455–461, (2001).
- [15] Keisuke Tozuka and Hiroshi Igarashi: “Effects on Perception when Removing One Frequency Component from Two Harmonic Vibrations”. *2023 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 425–431, (2023).
- [16] Inwook Hwang, Jeongil Seo, and Seungmoon Choi: “Perceptual Space of Superimposed Dual-Frequency Vibrations in the Hands”. *PLoS ONE* 12.1, (2017).
- [17] Shin’ya Nishida Scinob Kuroki Masataka Sawayama: “The roles of lower- and higher-order surface statistics in tactile texture perception”. *Journal of Neurophysiology* 126.1, pp. 95–111, (2021).
- [18] Rania Hassen, Basak Gleczyz, and Eckehard Steinbach: “PVC-SLP: Perceptual Vibrotactile-Signal Compression Based-on Sparse Linear Prediction”. *IEEE Transactions on Multimedia* 23, (2020).
- [19] Shogo Okamoto and Yoji Yamada: “Lossy Data Compression of Vibrotactile Material-Like Textures”. *IEEE Transactions on Haptics* 6.1, pp. 69–80, (2013).
- [20] David Arthur Burns et al.: “A Low-Parameter Rendering Algorithm for Fine Textures”. *IEEE Transactions on Haptics* 15.1, pp. 57–61, (2021).
- [21] Ugur Alican Alma and Ercan Altinsoy: “Perceived Roughness of Band-Limited Noise, Single, and Multiple Sinusoids Compared to Recorded Vibration\*.”. *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 337–342, (2019).
- [22] Keisuke Tozuka and Hiroshi Igarashi: “Automatically Haptic Texture Modeling with Parametric Equalizer”. *Proceedings of the International Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control (SAMCON 2022)*, (2022).
- [23] T. Murakami, F. Yu, and K. Ohnishi: “Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 40.2, pp. 259–265, (1993).
- [24] Yutaro Toide et al.: “Sufficient Time-Frequency Resolution for Reproducing Vibrotactile Sensation”. *IEEE Transactions on Haptics* 16.3, pp. 412–423, (2023).
- [25] Heather Culbertson-A et al.: “Refined Methods for Creating Realistic Haptic Virtual Textures from Tool-Mediated Contact Acceleration Data”. *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 385–391, (2012).
- [26] Javier Romero, Antonio Garcia-Beltran, and Javier Hernandez-Andres: “Linear bases for representation of natural and artificial illuminants”. *Journal of the Optical Society of America A* 14.5, p. 1007, (1997).
- [27] Ronald T. Verrillo: “Vibrotactile thresholds measured at the finger”. *Perception & Psychophysics* 9.4, pp. 329–330, (1971).