

# DFT321

## まず

ハプティックインタフェースは、まるで本物で手が届く範囲にあるかのように、仮想の遠くのオブジェクトにユーザが触れるように設計されています。

多くのアプリケーションにとって、ユーザーはこれらの仮想的な、そして遠く離れた接触の間に提供される触覚フィードバックができるだけ現実の物体の感触に一致することを望みます。

ツールで実際の表面に触れると、形状、コンプライアンス、および摩擦を伝える低周波数の力を感じます。また、オブジェクトの質感と現在のツールとの接触状態を反映する高周波数の振動も感じます[[5]、6]。

これらの重要な高周波振動を検出する機械受容体は、Pacinian corpuscles (PC) パチニ小体です。それらは、20~1000 Hzの振動刺激に敏感で、250~550 Hzの間にピーク感度があります[1、2]。

また、PCはあらゆる方向に発生する振動に反応することが知られており、肌の表面に平行な動きは肌に垂直な動きよりも検出がやや簡単です[3]。

セクション2で説明したように、高周波加速度測定は表面接触のリアルな触覚レンダリングを可能にすることが示されています。

ツールの振動は3方向すべてに発生しますが、これらの以前の研究では振動の1つの軸のみを測定して再作成し、他の2つの軸の潜在的に重要な触覚情報を破棄することで問題を単純化しました。これらの単軸技術を3つの直交方向に複製することを想像することができかもしれませんが、そのようなアプローチはかなり複雑な振動モデルと触覚ハードウェアを必要とするでしょう。代わりに、1次元の信号で完全な3次元加速度の感覚を再現することで、振動方向に対する人間の手の鈍感さを利用できると考えています。第3節では、この次元削減問題に対する定量的目的を示します。次にセクション4では、検討した候補変換について説明します。その結果、新しいアプローチDFT321を紹介します。最後に、セクション5では、このホワイトペーパーの寄稿を要約し、今後の作業について説明します。

## 背景

いくつかの研究チームは高周波加速度信号の使用を通して現実的な触覚レンダリングを作成することに成功しました、これらの努力のすべてが本当の振動の3Dの性質を無視したけれども。

遠隔操作のために、KontarinisとHoweはカスタムロボットハンドの指先で一軸加速度を測定し、オペレーターがマスターインターフェースの指にある2つの反転オーディオスピーカーを通して感じるようにこれらの振動を継続的に演奏しました[7]。

この感覚増強は、ベアリング検査および針穿刺作業におけるユーザーのパフォーマンスを向上させました。

他の何人かの研究者は、パラメトリックモデル[12、4]または直接再生[8]のいずれかを通して、仮想表面接触のリアリズムを改善するために実際の接触加速度の一軸記録を使用しました。

直接操作の分野では、Yao、Hayward、Ellisがツールチップに垂直な加速度を測定し、それらを直交方向に出力するハンドヘルドツールを作成しました。

この以前の研究に触発されて、私たち自身の研究室での作業は、ツールを使った接触の間に実際の表面の感触を捉えて再現することに焦点を合わせてきました。

このプロジェクトの一環として、テレオペレーション中に1軸の接触加速度をフィードバックできるように、Phantom Omniのハンドルにボイスコイルアクチュエータを追加しました[10]。

このシステムは当初、接触面に垂直な加速度を再現するように構成されていましたが、テクスチャの知覚に焦点を当てた人間の被験者の研究では接線加速度を伝達するように変更されました[11]。

被験者は、専用のアクチュエータからの振動が含まれている場合には、表面レンダリングを大幅にリアルに評価しましたが、実際のサーフェスほど高いリアリズム評価を達成するサンプルはありませんでした。

実際、最高定格のレンダリングでは、測定された接線方向の値よりも50%強い振動が得られました。これは、振動測定を単一軸に制限すると、結果として生じる相互作用の忠実性が損なわれる可能性があることを示します。

最後に、我々はまた、仮想表面レンダリングのために記録された加速度の集合をテクスチャモデルに蒸留する方法を開発した[13]。その研究は3Dセンサー信号を1Dに減らすために主成分分析を使用した、それはこの変換がシステム性能において果たす重要な役割を厳密には考慮しなかった。

## 目的

人間の手はあらゆる方向の高周波振動を検出するが、これらの方向を互いに容易に区別することはできない。

したがって、ハプティックレンダリングシステムは、3D接触加速度を1D振動としてモデル化して出力できるはずです。

図1は、このような振動を捉えて再現するための実験的な設定を示しています。

3軸加速度計（ADXL345）は、 $\pm 78.5 \text{ m/s}^2$  ( $\pm 8 \text{ g}$ ) の範囲に設定されており、1000 Hzでサンプリングされます。

スタイラスには、振動を出力するための一对のボイスコイルアクチュエータも装備されています。

図2は、実際のコンタクト操作中にこのデバイスで収集された8秒間のデータを示しています。

時間領域と周波数領域の信号の形状は、3つの軸で大きく異なることに注意してください。

各スペクトルの平滑化バージョンを計算しました。

振動識別のための22%ウェーバー比と一致する可変周波数分解能を持ちます[2]。

対数スケールでは、平滑化されたものは正しく配置されていますが、プロット内で高すぎるように見えます。 $\mathbf{R}^3$  から  $\mathbf{R}$  へのマッピングは明確ではないため、変換パフォーマンスを測定するための2つの目的を特定しました。

## スペクトル一致

高周波振動に対する人間の知覚は、信号のスペクトル成分に依存します[2]。

したがって、寸法的に低減された振動は、それが元の記録された信号と同じスペクトルを有するように感じるはずである。

合成された1D振動は、元の振動の3つの成分方向にその周波数で存在するエネルギーの合計と同じ周波数を各周波数で持つべきであると言ってこれを形式化します。その結果、変換は、元の3

次元信号の全エネルギースペクトル密度（ESD）を保存しなければならない。ここで、各成分  $a(t)$  の ESD は、 $E_s(f) = |A(f)|^2$  である。  
ここで、 $A(f)$  は  $a(t)$  のフーリエ変換です。

生のスペクトル推定はノイズが多いので、各周波数におけるエネルギースペクトル密度からスペクトルの類似性を直接判断することはしません。

代わりに、前のセクションで説明したように、人間の振動知覚の限られた周波数分解能を考慮に入れたスペクトルメトリックを設計しました。

したがって、私たちのスペクトル知覚比較は、Matlabのspafdrコマンドを介して実装された、この規則に従って変化する周波数平滑化分解能を使用します。この平滑化の一例が図2に示されており、我々は平滑化されたバージョンの  $A(f)$  を  $\tilde{A}(f)$  と表す。

変換から生じる1D合成信号を表すために  $a_s(t)$  を使用して、我々は以下のようにスペクトルマッチメトリックを定義する。

$$M_{sm} = 1 - \frac{1}{n_f} \sum_{f=20\text{ Hz}}^{1000\text{ Hz}} \left( \frac{|\tilde{A}_x(f)|^2 + |\tilde{A}_y(f)|^2 + |\tilde{A}_z(f)|^2 - |\tilde{A}_s(f)|^2}{|\tilde{A}_x(f)|^2 + |\tilde{A}_y(f)|^2 + |\tilde{A}_z(f)|^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 $n_f$  は和の中の離散周波数の数を表します。ここでは、PCの感度範囲と一致するように選択された、20 Hzから1000 Hzまでの周波数について、合成された信号が元の3D信号のエネルギーを保持する程度を定量化しています。この計算は、1D信号の平滑化ESDと3D信号の平滑化ESDの間の平均正規化偏差の厳密な尺度を提供します。もし両者が同一であれば、スペクトル整合測定基準は1になります。

## テンポの一致

スペクトル基準は信号の定常特性の要件を捉えますが、トランジェントを捉えるために別の基準を課す必要があります。

理想的には、1D信号のピークと突然の変化は、3Dコンポーネントの同様の機能と一致する必要があります。

時間的整合の簡単な尺度として、3つのオリジナル成分の各々と合成信号との間の相互相関の絶対値をゼロの時間シフトで見ることになります。

人間の手は振動の方向に敏感ではないので、絶対値を使用します。

完全な時間的一致メトリックを次のように書きます。

$$M_{tm} = \frac{1}{3} \left( \frac{|a_x \star a_s|}{\sqrt{a_x \star a_x} \sqrt{a_s \star a_s}} + \frac{|a_y \star a_s|}{\sqrt{a_y \star a_y} \sqrt{a_s \star a_s}} + \frac{|a_z \star a_s|}{\sqrt{a_z \star a_z} \sqrt{a_s \star a_s}} \right) \quad (2)$$

ここで★は、ゼロ時間遅延で評価された相互相関を表します。

言い換えれば、この方程式は正規化相互相関の絶対値の平均を提供します。

得られた値は、1D信号と元の成分との間の同時の時間的類似性の尺度である。

(めったに実現できないが) 3つすべての成分と完全に相関する (または相関しない) 信号は、1の時間的一致メトリックを有するであろう。

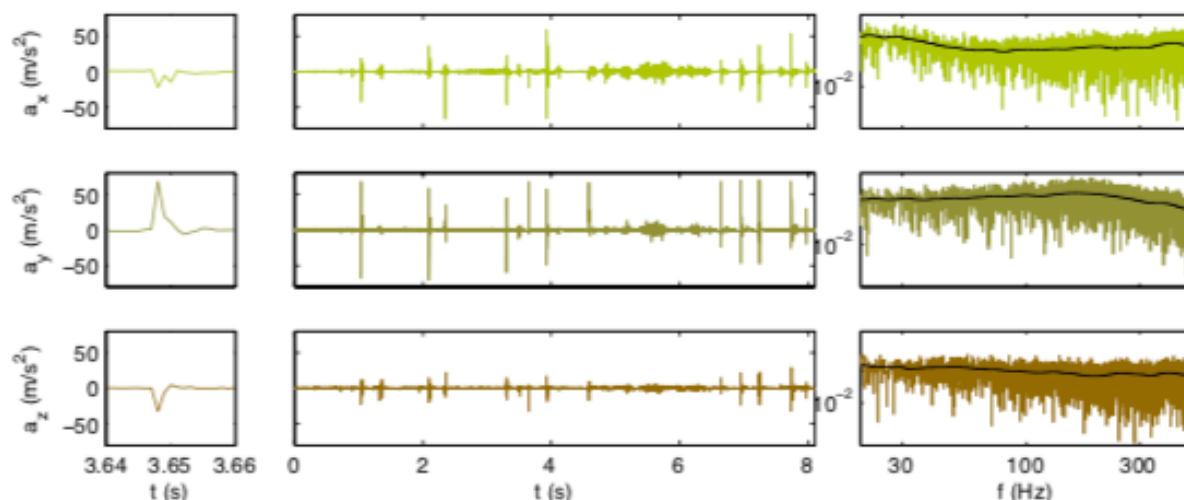


Fig. 2: Sample three-dimensional acceleration data. The user ran the tool tip over several small surface features, dragged across a textured vinyl surface, and then tapped on a hard piece of plastic.

## 手法

3つの加速度値を経時的に1つの値に変換するための多くの潜在的な方法がある。

このセクションでは、これまで考えてきたアプローチについて説明します。最も単純なオプションから、新しく開発したより洗練された方法へと進みます。

各アルゴリズム名は、時間領域信号の次元を3から1に減らすことを示すために、接尾辞3 2 1を含み、この接尾辞は我々の合成アルゴリズム (例えばD F T 3 2 1) に由来する分析アルゴリズム (例えばD F T) から名付けています。

図3は、図2のサンプルデータに対する4つの候補の影響を示し、図4は、より短いテクスチャのみのサンプルでのパフォーマンスを示しています。

対応するスペクトルおよび時間的測定結果を表1に示す。

### Single-axis(SA321)

最も簡単な解決策は、以前の研究で行われたように、センサーに固定された軸を使用することです[10、11]。

主振動エネルギーがその軸に沿って発生するという保証はないので、かなりの信号損失が予想される。

これは、図2のサンプルデータを調べることによって確認されます。ピークは常に軸間で発生するわけではありません。

このアプローチは振動の全エネルギーを捉えず、そのスペクトルおよび時間的一致測定基準は優れていません。

### Sum of Components(SoC321)

他の計算上簡単な方法は単に 3 つの成分を一緒に加えることである。

コンポーネント間の相関はありそうですが、それは正または負の可能性があります。したがって、このアプローチは、負の相互相関を持つコンポーネント間の有害な干渉を受けやすくなります。図 3 および図 4 の上部パネルに示されるように、この方法はスペクトルエネルギーを保存せず、矛盾した時間的性能を有する。

### Vector Magnitude(Mag321)

図 3 および図 4 の第 2 のパネルに示されるように、構成要素の平方の合計の平方根をとることもできる。

この変換は、概説した目的には適していません。3Dベクトルの大きさは常に正になり、元の高周波振動の感度を反映しないDC成分が発生します。

また、3つの成分のスペクトル成分は、異なる周波数成分の大きさに大きく依存する非線形の方法で再分配される。

### Principal Component Analysis(PCA321)

[13]で行われているように、PCAが最もエネルギーを含んでいると識別した単一の固定軸に3D信号を投影することができます。

このアプローチは、データを生成したハプティックインタラクションが図 4 のテクスチャ探索データのように高度に制約されている場合には適切であり得るが、それは常に 2 つの垂直方向の情報を破棄する。

少し改善するために、信号を経時的にセグメントに分割し、継続的に最初の主成分の推定値を適応させることができます。

### Discrete Fourier Transform(DFT321)

上記の変換はどれも私たちの目的を完全には満たしていないため、DFTに基づいた新しいアプローチを開発しました。

3次元信号の各成分を直交基底関数展開として表現することによって、相殺的干渉なしに成分を合計することができます。

合成信号に対するスペクトル要件を考慮すると、DFTはそのような基底関数の 1 つの実行可能な選択を表す。(1) に続き、次に設定します。

$$|\tilde{A}_s(f)| = \sqrt{|\tilde{A}_x(f)|^2 + |\tilde{A}_y(f)|^2 + |\tilde{A}_z(f)|^2} \quad (3)$$

$\tilde{A}_s(f)$  の絶対値を取得し、それによって局所スペクトルを  $a_s$  とすると、望ましい時間的性質を保証する位相  $\theta_f$  を割り当てなければならない。

この目的のために、簡単のために絶対値を無視して、メトリック (2) に向かって位相を最適化します。周波数領域では、ゼロタイムシフトにおける相互相関の合計は次のように表すことができます。

$$\sum_{i=1}^3 a_i \star a_s$$

$\tilde{A}_s$  の位相が以下のように選択されたときにこの量が最大になることを示すことができる。

$$\theta_f^{\max} = \angle \sum_{i=1}^3 \tilde{A}_i \quad (4)$$

合成された時間領域信号は、平方根によって得られるので、 $e^{j\theta_f^{\max}}$  ここで、 $j = \sqrt{-1}$ 、および Inverse DFT.

Parsevalの定理によると、結果は常に成分のエネルギーの合計と同じシグナルエネルギーを持つことになります。

この新しい次元削減アプローチをDFT 321と呼びます。

図3に示す過渡データとオンラインアプリケーション (?) では、DFT321法を短いウィンドウに分割する必要があります。ここでは、35ミリ秒のウィンドウ長が使用されており、これは視覚刺激と触覚刺激の間の最小検出可能時間遅延より10ミリ秒短い[14]。

25ミリ秒から50ミリ秒の範囲のウィンドウ長が、 $0.94 \leq M_{sm} \leq 0.97$ 、 $0.45 \leq M_{tm} \leq 0.46$ で、一貫して良い結果をもたらすことを我々は発見しました。

図4に示すような定常振動のオフライン処理では、ウィンドウ処理は不要で、振動のスペクトル成分が正確に捉えられます。

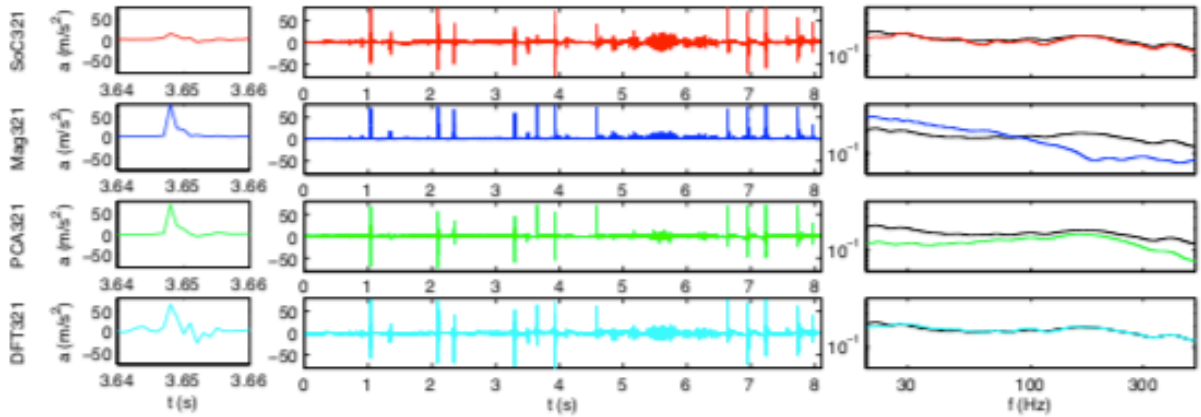


Fig.3: Four of the candidate transformations applied to the data from Figure 2. The left column shows a detailed time view, and the right column presents the smoothed energy spectral density along with the original signal's smoothed ESD (black line).

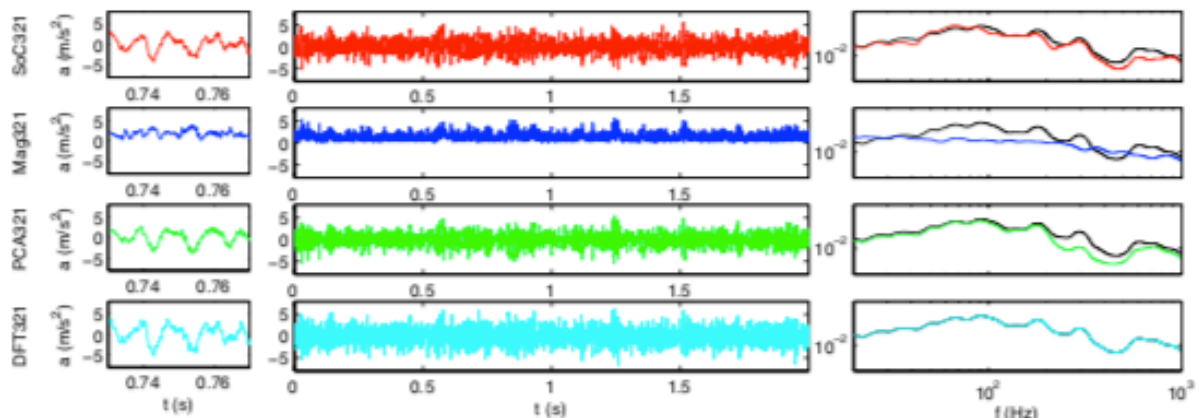


Fig. 4: Four of the candidate transformations applied to a 3D texture vibration.

		SA <sub>x</sub> 321	SA <sub>y</sub> 321	SA <sub>z</sub> 321	SoC321	Mag321	PCA321	DFT321
Figure 3	$M_{sm}$	0.34	0.56	0.10	0.90	0.34	0.56	0.97
	$M_{tm}$	0.37	0.38	0.39	0.51	0.11	0.40	0.46
Figure 4	$M_{sm}$	0.27	0.51	0.23	0.48	0.37	0.52	1.00
	$M_{tm}$	0.69	0.68	0.60	0.62	0.02	0.80	0.64

Table 1: Spectral match and temporal match metrics for the candidate transformations on the data shown in Figures 3 and 4.

## まとめ

この論文は、三次元高周波加速度信号を知覚的に整合した一次元信号に変換するための可能な方法に焦点を合わせました。

この分野における以前の研究をレビューした後、我々は候補変換を判断するための2つの目的を提示し、そして我々は我々の新しいDFT321法を含むいくつかの可能な選択肢を述べました。

DFT321は、過渡データと定常データの両方に対する最有力候補ですが、アプリケーションと利用可能なリアルタイム計算リソースに応じて選択を調整する必要があります。

このようにして次元削減すると、高周波加速度測定に依存するハプティックレンダリングアプローチに大きなメリットがあります。

例えば、我々の方法は、表面テクスチャモデルのためのデータ記憶の必要性和パラメータの複雑さを減らし、遠隔操作システムのために要求される伝送帯域幅を減らし、そしてそれらは一次元触覚振動アクチュエータの効果的な使用を容易にします。

今後の展望として、スペクトルと時間の一致の測定基準を検証し、洗練するために人間の被験者テストを行います。