

剪断力による形状とテクスチャの重畳提示手法

嵯峨 智^{1,a)} Ramesh Raskar²

概要: 我々はタッチパネルに触覚情報を付加するため、剪断力を利用した手法を提案する。タッチパネル上でテクスチャ情報として振動を利用する手法はいくつか提案されているが、形状情報と同時に重畳提示できる手法は提案されていない。我々は剪断力を利用することで、形状情報とテクスチャ情報を提示可能な手法を提案する。静的な剪断力により形状を、動的な振動方向制御による高周波振動によりテクスチャ情報を提示することで、それぞれの独立な情報提示を可能にする。心理物理実験により、提案する独立な情報提示が従来手法より「やわらかさ」の表現に適していることがわかった。また、形状とテクスチャの重畳提示実験により、被験者が双方の情報を同時に知覚していることを確認した。

Simultaneous Geometry and Texture Display Based on Lateral Force

SATOSHI SAGA^{1,a)} RAMESH RASKAR²

Abstract: Touching through a screen to a displayed object has been one of a goal of human interface. Several researchers employ vibrations in order to display texture information. However no systems realize to display geometrical shapes and textures. In this research we propose a method of feeling both large bump and precise textures simultaneously through a touchscreen. Our method employs lateral force and high frequency direction-controlled vibration. Vibration, normal to moving direction of finger enables independent display between geometrical and texture information. The technology realizes not only geometrical shapes but also textures to be felt.

1. はじめに

近年、タッチパネルは世界中で利用されるようになった。さらに、スマートフォンのような情報機器端末においてタッチパネルは不可欠なインタフェースとなっている。しかし、そのようなタッチパネルだが、現在のタッチパネルの多くには触覚によるフィードバックが存在しない。一般の人にとって触覚フィードバックは付加情報として、触れて理解する視覚障害者にとっては不可欠な情報として、形状情報により情報の所在を明確にし、テクスチャ情報によりリッチなコンテンツを実現する手段となる。このように、有用なタッチパネルを実現するには形状とテクスチャ情報を同時に重畳提示可能な触覚ディスプレイが不可欠である。

テクスチャを提示するためのデバイスとして、研究レベルにおいては、液晶パネルとの組み合わせを前提とした研究として、Chubb, et al.[1] によるスクイーズ膜を利用した摩擦変化による触感デバイスなどが開発されている。そ

のほか、Takasaki, et al.[2] による表面弾性波を利用した触感デバイス、Konyo, et al.[3] による、振動周波数制御と仮想ポインタを利用した触感デバイスなどがある。さらに、Wang, et al. は剪断力を利用したスライディングシステムを開発している [4]。また、静電気力を利用し、摩擦力を変化させるデバイスも Bau, et al.[5] によって研究開発されている。記録された振動を利用する研究もなされてきた。Romano, et al.[6] は加速度センサ、タッチパネル、力センサ、ボイスコイルを利用したシステムを開発している。このシステムではこれらの情報を記録することで、スタイラスの現在の動作に適した 1-10kHz 程度の記録された機械振動を与えることを実現している。また Minamizawa, et al.[7] はマイクとボイスコイルにより類似のシステムを開発している。これらいくつかの振動刺激はテクスチャの再現性が高いが、いずれのシステムも大きな凸凹のような形状情報を提示することはできない。

我々は大きな凹凸のような形状情報と小さなテクスチャを同時にディスプレイ画面上で感じさせる手法を提案する。我々は剪断力により形状情報を、方向を制御した 1-10kHz 程度の機械振動によりテクスチャ情報を提示する、触覚提示手法を提案する。これにより大きな形状情報だけでな

¹ 東北大学 情報科学研究科

² Media Lab, MIT

^{a)} saga@fractal.is.tohoku.ac.jp

く、テクスチャ情報も同時に提示することができる。さらにこの手法は他の剪断力ディスプレイにも用意に実装可能である。本手法により、我々は日常においてより触覚を利用可能になるであろう。これによりインターネットショッピングや、テレビ番組さらには遠隔コミュニケーションはより大きな可能性を持つことになる。インタフェースを通じてぬいぐるみや、衣服さらにはペットに触れることも可能になるかもしれない。

2. 剪断力を利用した振動提示

これまでに剪断力を用いた触覚提示の手法は、Minky, et al. 他、多くの研究者によってなされている [8], [9] 剪断力とは横方向に働く力であり、今回の場合、指に対してタッチパネルに沿った2方向に力を働かせる。本手法は触覚における錯覚に基づくものである (Fig. 1)。この錯覚現象を簡単に説明すると、図1上に示すような剪断力分布を提示することにより、人は図中下に示す凹凸感を感じられる。

我々はこの方式をタッチパネルに適用することで、タッチパネルにおける2.5次元触覚フィードバックを提案している (Fig. 2)。これまでに、我々は、剪断力を利用した触覚提示により2.5次元的な形状提示を実現する提案をしてきた [10]。SPIDAR-mouse[11]を利用し、タッチパネル四隅に設置したモータによりワイヤを駆動することで4本のワイヤの張力を制御し、ワイヤにつながれたパッドを牽引することで、パッドにのせた指先にパネルと平行な剪断力を提示する。このとき提示される剪断力は画像の深度情報 $I(x)$ から計算される。

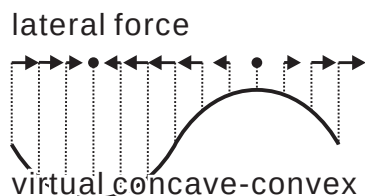


図1 Lateral-force-based haptic Illusion

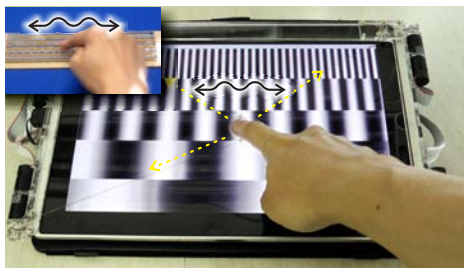


図2 Lateral-force-based 2.5D haptic screen

これまでの研究 [10] から、さまざまな空間周波数をもつ波形上で同程度の凹凸、すなわち画面に対し奥行き方向の振幅が同じである感覚を知覚させるには、提示する空間周波数により提示すべき剪断力の大きさを変化させる必要があることが判明している。そのため、空間周波数分布の実

時間計測手法として、Haar wavelet 基底を利用した多重解像度解析により空間周波数を計算し、空間周波数による刺激強度補正関数 $G(x)$ のための引数としている。剪断力の大きさが刺激強度補正関数 $G(x)$ によって調整され、その場の空間周波数に応じた適切な剪断力 $F(x)$ が導出される。

$$F(x) = G(x) \cdot \nabla I(x) \quad (1)$$

タッチパネルの普及が進むなか、多くのタッチパネルには触覚フィードバックが存在しない。これはひとえに適切な提示技術が確立していないためである。しかしながら、一般の人にとって触覚フィードバックはコンテンツの付加情報としての手段となり、視覚障害者にとってはコンテンツ理解のための不可欠な情報となる。このような触覚フィードバックとして必要な情報について検討すると、インタフェースとしての利用場面では、形状情報によりおおまかな情報の所在を明確にし、テクスチャ情報により情報の弁別を実現できる。また、表示された対象にバーチャルに触れる場面では、形状情報により大局的な情報を、テクスチャ情報により精細な情報を提示できる。このように、形状とテクスチャ情報を同時に重畳提示可能な触覚ディスプレイを実現することで、さまざまな場面での利用形態を実現できる。

本研究では、これまでの研究によるバーチャルな形状情報に、精細なテクスチャ情報を重畳表示する手法を提案する。テクスチャ情報としては Romano, et al., Minamizawa, et al. [6], [7] のような、1-10kHz 程度の記録された機械振動を利用する。このとき、剪断力のみを用いることで、既存研究で不可欠であったボイスコイルなど付加的なデバイスを用いることなく、シンプルな実装により双方の重畳表示を実現する。提示力 $F(x)$ に振動的な力 $F_{\{T,B\}}(x)$ を付加することで、本デバイスは2.5次元的な形状情報だけでなく、テクスチャ情報も提示可能になる。記録手法は Romano, et al.[6] の手法と同様に、加速度センサを利用することで振動情報を記録する。提示手法として、記録振動の変調および振動方向の制御による提示を提案する。記録振動の変調により、少ない記録情報からのテクスチャ情報の復元を実現し、振動方向制御による提示手法を比較することにより、振動方向の違いにより実現される触覚表現の違いを明らかにする。

2.1 テクスチャ情報の記録手法

ここでは我々のシステムにおいて、テクスチャ上で指を触察したときの1-10kHz程度の機械振動を記録する手法について説明する。我々は精細な振動情報の記録手法として、3軸加速度センサ (Kionix KXM52-1050, bandwidth: 0 to 3kHz) とタッチパネル (Samsung XE700T1A) を利用することにより、振動による加速度情報 $a_r(t_r)$ と、模擬指の移動速度情報 $\dot{x}_r(t_r)$ を取得する。移動速度はタッチパネルによる位置情報の差分を利用する。添字の r は記録を表す。

加速度センサは Fig. 3 のように、指先の側面にテープで固定する。触察動作によりテクスチャと指の間に振動が発生する。そして指を伝った振動が加速度センサにより計

測される。振動は $f_a = 44.1$ kHz で記録され、速度はタッチパネルのサンプリング周波数である約 $f_s \simeq 20$ Hz で計測される。添字の a, s はそれぞれ音声入力とタッチパネル入力を表す。

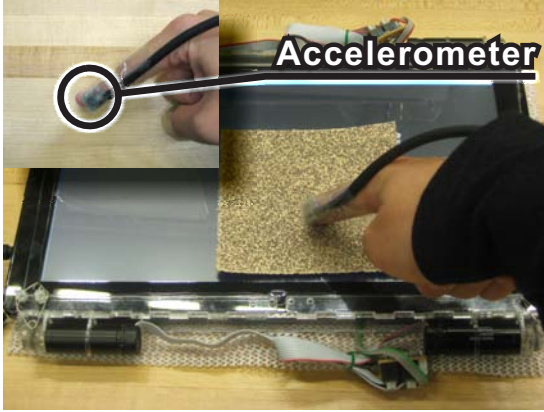


図 3 Recording Setup

2.2 テクスチャ情報の提示手法

記録時には加速度センサから加速度 ($a_r(t_r)$) が、タッチパネルセンサから指の移動位置 ($\mathbf{x}_r(t_r)$) が取得され、この差分情報として指の移動速度 ($\dot{\mathbf{x}}_r(t_r)$) が記録される。記録する情報を提示するには、得られる加速度と位置情報から、位置に応じた信号を出力する方法が最も素直である (Eq. 2).

$$a_p(t_p(|\mathbf{x}_p|)) = a_r(t_r(|\mathbf{x}_p|)) \quad (2)$$

しかし、それぞれの更新周期の違いにより、この手法では $a_p(x_p)$ の更新周期が $\mathbf{x}_p(t_p)$ に律速され、 f_s となる。これでは 1-10kHz 程度の記録された機械振動を再現できない。加速度 $a_r(t_r)$ は音声入力のサンプリング周期 $f_a = 44.1$ kHz で記録されるため、多くのデータ点を持つ。他方、指の速度 $\dot{\mathbf{x}}_r, \dot{\mathbf{x}}_p$ はタッチパネルのサンプリング周期 $f_s \simeq 20$ Hz で記録されるため、加速度情報よりデータ点数が少ない。さらに、モータによる振動信号の制御周期 f_v は $f_v \leq 10$ kHz となっている。添字の v はモータによる振動提示を表す。上記それぞれの周期 f_a, f_s, f_v の違い、また記録時と再生時の指の速度の違いを補償するため、我々は次の式を導入する。ここで、記録/再生時のフレーム間時間差は $\Delta t_r \simeq \frac{1}{f_a}$, $\Delta t_p \simeq \frac{1}{f_v}$ である。添字の r, p はそれぞれ記録/再生時を表す。周期が f_s である Δt_p の代わりに、正確なタイム ΔT_p , $\frac{1}{\Delta T_p} \simeq 10$ kHz を用いることで記録信号を変調し、周期 f_v に即した出力を得る。式 8 により、指の記録/再生時の移動速度 $\dot{\mathbf{x}}_r, \dot{\mathbf{x}}_p$ の比を利用して、記録振動信号から信号を再サンプリングする。

$$t_r = \frac{|\mathbf{x}_r|}{|\dot{\mathbf{x}}_r|} \quad (3)$$

$$a_p(t_p(|\mathbf{x}_{p_{n+1}}|)) = a_r(t_r(|\mathbf{x}_{p_n} + \Delta \mathbf{x}_{p_n}|)) \quad (4)$$

$$\simeq a_r(t_r(|\mathbf{x}_{p_n}|) + t_r(|\Delta \mathbf{x}_{p_n}|)) \quad (5)$$

$$= a_r(t_r(|\mathbf{x}_{p_n}|) + t_r(|\dot{\mathbf{x}}_{p_n}| \cdot \Delta t_p)) \quad (6)$$

from Eq.(3),

$$= a_r\left(t_r(|\mathbf{x}_{p_n}|) + \frac{|\dot{\mathbf{x}}_{p_n}|}{|\dot{\mathbf{x}}_{r_n}|} \cdot \Delta t_p\right) \quad (7)$$

$$= a_r\left(t_r(|\mathbf{x}_{p_n}|) + \frac{|\dot{\mathbf{x}}_{p_n}|}{|\dot{\mathbf{x}}_{r_n}|} \cdot \Delta T_p\right) \quad (8)$$

$\dot{\mathbf{x}}_r, \dot{\mathbf{x}}_p$ は更新周期 f_s であることに留意する。そのため、式 8 の分数の項は更新が f_s 程度となるが、 ΔT_p が周期 f_v で更新されるため、再生時の振動出力 $a_p(t_{p_{n+1}})$ はもとの記録振動 $a_r(t_r)$ から周期 f_v で再サンプリングされた擬似的な信号が出力される。つまり、位置情報ではなく速度情報の比と正確な時間情報を併用することにより、それぞれの周期 f_a, f_s, f_v の違いを補償している。

Romano, et al. の手法 [6] では、異なる移動速度および接触力の条件下でのそれぞれのテクスチャにおける振動信号を加速度センサを用いて計測していた。そのため、テクスチャあたりの情報記録に費やされる手間が大きくなる。一方我々は、接触力の測定を省略し、上記の補償手法を利用することで、より簡単な記録/再生手法を実現した。記録情報には接触力に関する情報がないため、生成される振動の再現性は低くなる。しかしながら、我々の手法により、多くのテクスチャ情報が簡単なサンプリングにより提示可能になる。

2.3 適切な振動方向の検証

これまでの数多くの既存研究における振動を用いたテクスチャ表示は、振動子としてボイスコイルなどを利用することが多く、振動方向が固定であった。そのため、振動方向によるテクスチャ再現性の効果を検証できなかった。一方、我々のシステムでは、糸の張力による 2 次元での力提示が可能であるため、パネル平面の 2 次元上での振動方向制御が可能となる (Fig. 4)。ここで我々は振動方向制御による提示手法を比較することにより、振動方向の違いにより実現される触覚表現の違いを明らかにする。そのため、方向を制御した平面方向の 2 つの振動提示を提案し、どちらの方向の振動がよりさまざまなテクスチャ提示に適切であるのか、心理物理実験を通じて検証する。なお、我々は剪断力での機能実現を目指すため、振動の方向が固定された従来型の振動については比較の対象としない。以下に、それぞれの振動方向と予想される効果について記述する。

指の動きに並行な振動 (F_T) 形状提示手法と類似のアルゴリズムを実現する。すなわち、指の動きの方向に沿った反力を生成する。形状による変位情報とテクスチャの情報は常に反力として表現される。

指の動きに垂直な振動 (F_B) 形状情報とテクスチャ情報の独立な提示を可能にする。形状情報は反力として提示され、テクスチャによる振動情報は移動に対して垂直な力として提示される。そのため、形状情報と混じ

ることなく提示される。

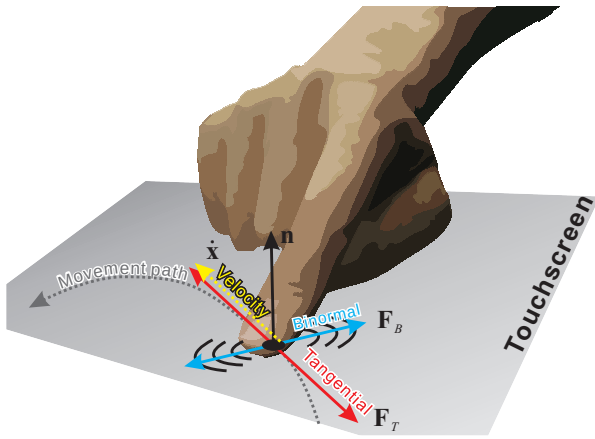


図 4 Direction of Vibration

$$\mathbf{F}_{\{T,B\}}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}_{\{T,B\}} \cdot a_p(t_p) \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{g}_T = h\dot{\mathbf{x}} & \text{in case of } \mathbf{F}_T \\ \mathbf{g}_B = h\dot{\mathbf{x}} \times \mathbf{n} & \text{in case of } \mathbf{F}_B \end{cases} \quad (10)$$

$\mathbf{n}$: normal vector toward screen

3. 情報提示実験

3.1 テクスチャ提示の各手法の比較

前述した記録, 提示手法により, 次の 8 つのテクスチャ情報を記録する (Fig. 5).

記録された加速度情報を利用し, 被験者は本物のテクス



図 5 The eight textures

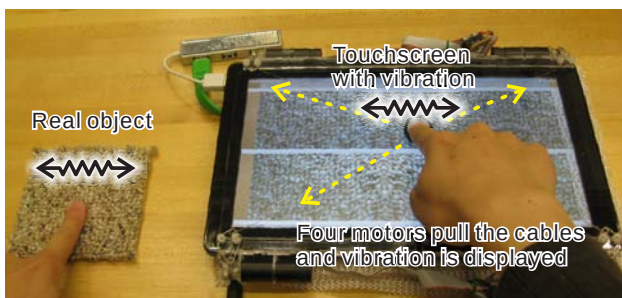


図 6 Comparing experiment of texture display

チャと 2 手法によるバーチャルなテクスチャ $\mathbf{F}_T$ と $\mathbf{F}_B$ を指で触察する。被験者は触察した 2 手法によるテクスチャのうち, どちらがより本物に近いかを答える。本実験においてはテクスチャ情報提示の比較のため, 形状情報は提示しない。一つのテクスチャについて 3 回ずつ, 8 つのテクスチャ (紙やすり, 製氷皿, カーペット 2 種, スポンジ 2 種, 柄タイル, 鉄やすり)(Fig. 6) について本実験を実施する。被験者は 25-34 歳までの健康な 6 人の男性と 2 人の女性である。本実験中は被験者はヘッドフォンにより外部の音を遮断する。

Fig. 7 に結果を示す。それぞれの**は t 検定において $p < 0.01$ で有意な結果を示している。多くの対象において $\mathbf{F}_B$ による手法がより高い類似性を示している。研磨スポンジ, 鉄やすり, 両カーペットにおいて統計的に有意な結果が見てとれる。これらの結果から, カーペットやスポンジといったやわらかな素材においては $\mathbf{F}_B$ による手法が $\mathbf{F}_T$ による手法よりもより本物らしいテクスチャを提示可能であることがわかる。他方, 柄タイル, 製氷皿といったより硬いテクスチャにおいては, 2 つの提示手法の間に統計的に有意な差は認められなかった。すなわち, より硬いテクスチャを提示する際には, どちらの手法も利用可能であることがわかる。

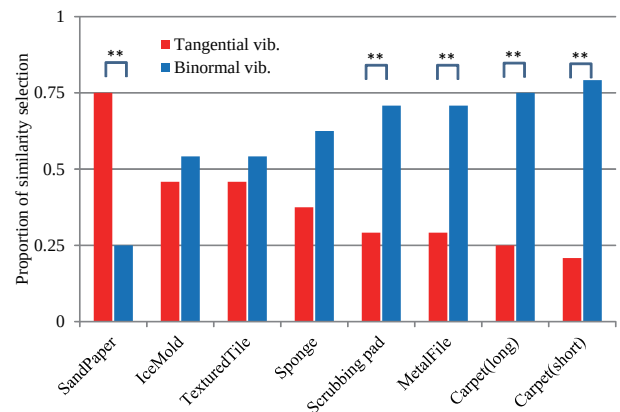


図 7 Comparison result between tangential and normal. Subjects are asked to choice two alternatives. Each ** shows $p < 0.01$ which is significance test results of t-test

紙やすりは他のテクスチャに比べ, 特異的な結果を示している。また, 鉄やすりにおいては, 硬い素材にもかかわらず $\mathbf{F}_B$ による手法が有意に本物らしいことを示している。この結果について考察する。これは, 紙やすりが引っ掛かりのあるテクスチャであり, $\mathbf{F}_T$ の手法による反力が適切な刺激になりうるためであると考えられる。すなわち, 引っ掛かりのあるテクスチャにおいては, $\mathbf{F}_T$ の手法による提示が $\mathbf{F}_B$ による提示より本物らしい触感を提示可能であると考えられる。一方, 鉄やすりについては, 鉄やすりの空間周波数 (約 1.4 山/mm) が指紋の空間周波数 (約 2 山/mm) と大変近いため, 鉄やすりがなめらかに感じられた可能性がある。そのため, やわらかい素材と類似した結果になったと考えられる。以上をまとめると, 次のようになる。

- よりやわらかい素材 (カーペットや研磨スポンジなど), 空間周波数が指紋に近い素材 (鉄やすり) においては F_B が適している
- ひっかかりの多い素材 (紙やすりなど) においては F_T が適している
- より硬い素材 (柄タイル, 製氷皿など) においては両手法に有意な差はない

3.2 テクスチャの再現性

提案するシステムにおける本物のテクスチャの再現性を評価するため, 同じ被験者に対しそれぞれの素材について本物のテクスチャとの比較による, バーチャルテクスチャの再現性評価を行った.

被験者は本物のテクスチャと2手法によるバーチャルなテクスチャ F_T と F_B を指で触察する. 被験者にはそれぞれのバーチャルテクスチャの再現性を0.0から1.0までの数値として評価してもらった. Fig. 8に結果を示す. *はt検定において $p < 0.1$ で有意な結果を示している. 同様の実験を行っている Romano, et al.[6]の研究との比較を行うと, 彼らの実験においては, 木, 紙, 荒いプラスチック, キャンパス, デニム, ビニールがそれぞれ類似度0.75, 0.51, 0.91, 0.60, 0.65, 0.70となっている. 一方我々の実験においては, 紙やすり, 製氷皿, 柄タイル, スポンジ, 研磨スポンジ, 鉄やすり, カーペット (長毛, 短毛) がそれぞれ類似度0.56, 0.53, 0.49, 0.55, 0.65, 0.65, 0.50, 0.47となった.

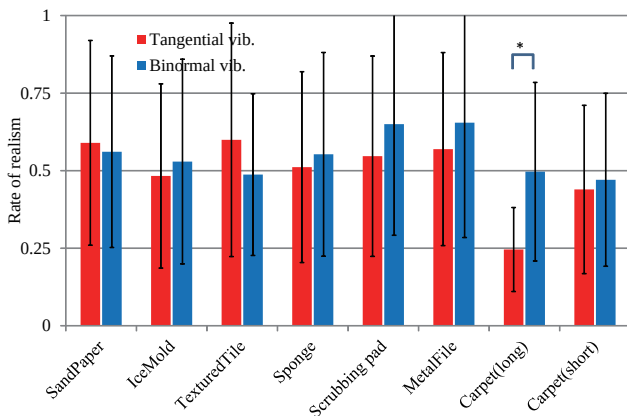


図8 Rating result of reality between tangential and normal. Each bar shows mean and standard deviation. Subjects are asked to rate each virtual texture with free number between 0.0 and 1.0. * shows $p < 0.1$ which is significance test results of t-test

我々の結果は一見, Romano, et al. による研究に比べ, 評価が低いように見える. この原因として, これらのテクスチャがカーペットやスポンジといった, 彼らの実験で利用したテクスチャよりやわらかい素材を含んでいることが考えられる. これらのテクスチャは1-10kHz程度の機械振動による手法では表現が難しい可能性がある. さらに, 彼らの実験はスタイラスを介して実施されていた. そのため, 情報経路はスタイラスを経由して自己受容感覚へ伝えられる振動に制約される. 一方, 我々の実験は指で行って

いる. 本物の情報は自己受容感覚へ伝えられる振動だけでなく, 皮膚感覚からも感じられるが, システムからの情報は振動だけである. これらの違いがあるにもかかわらず, F_B の手法で全ての素材において約50%以上の評価を得ており, 我々の手法の有効性を示していると考えられる. これらの結果から, F_B の手法による方向制御振動はこれらのテクスチャについて有効な情報を提示可能なことが示された.

3.3 形状情報とテクスチャ提示の同時提示

本稿にて提案するテクスチャ提示手法と, これまでの形状提示手法 [10] を重畳提示したときに被験者が双方の情報をどの程度知覚できるかを確かめるため, 同じ被験者に対し, 形状とテクスチャ情報の同時提示実験を行った. 被験者にはバーチャルな半円柱が3本並んだ形状のうち, それぞれに紙やすり, 鉄やすりのテクスチャおよびテクスチャなしの情報を重畳した刺激を触察し, 指で感じた形状の断面を自由に紙に記述してもらった. 提示された刺激は Fig. 9に示されるような画像 ($I_0(x)$) に基づくバーチャルな半円柱形状と, 記録された紙やすり, 鉄やすりによるテクスチャ振動刺激の組み合わせである. 画像 $I_0(x)$ と式1を用い, バーチャルな形状情報が提示される. Fig. 9,10における赤と青の領域において, 紙やすり, 鉄やすりから記録された機械振動によるテクスチャ情報が形状情報に重畳提示される. 赤の領域においては F_B , 青の領域においては F_T によるテクスチャ提示を行った.

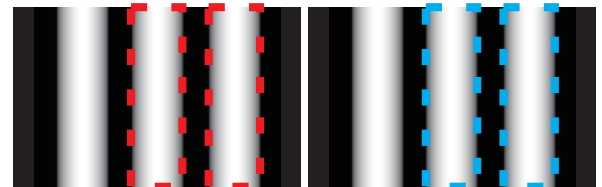


図9 Displayed image source

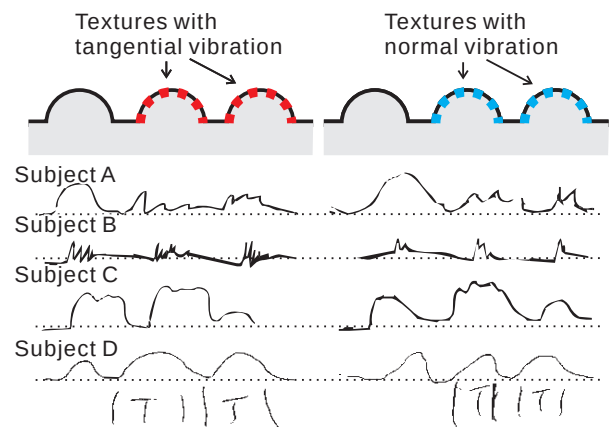


図10 Representative sectional handwriting figures of displayed objects

彼らは視覚からの刺激なしに, 触覚と力覚のみから刺激を感じる. その後彼らは提示された形状とテクスチャを自

由に記述する。Fig. 10 に結果の代表例を示す。被験者はこのような刺激が初見の者ばかりであるが、8人中5人の被験者が形状だけでなくテクスチャ情報を感じることができた。その他の者も形状もしくはテクスチャを知覚できていることがわかった。また、この結果から、それぞれの手法とも形状およびテクスチャ情報を提示できているようにみえるが、 F_T の手法によるいくつかの結果において F_B の手法による結果に比べて形状がつぶれていることがわかる。

脳における触覚情報処理に関する既存研究のいくつかはこれらの結果を支持している [12]。ヒトの脳において、小さな形状特性を処理する階層経路は大きな形状特性を処理する階層経路とは部分的には明確に異なっている。このことから、形状情報とテクスチャ情報の入力とは独立であるべきであると考えられる。

4. まとめ

本稿において、我々はタッチパネルのための形状およびテクスチャ同時提示システムを目指し、剪断力と、振動方向を制御した 1-10kHz 程度の機械振動を利用する手法を提案した。記録された 1-10kHz 程度の機械振動を利用することにより、我々のシステムはテクスチャの情報を提示する。さらに、振動の方向制御が可能であるため、我々は接線方向の振動手法 F_T と、垂直方向の振動手法 F_B を提案した。さらに、それぞれの周期の違いを吸収する補償的な提示手法を利用することにより、多くの振動情報収集なしにさまざまなテクスチャを容易に提示可能であることを示した。

心理物理実験の結果から、よりやわらかい素材の提示のためには F_B による手法がよいということと、より硬い素材の提示のためには、両手法に有意な差がないことがわかった。さらに、カーペットやスポンジといった難しいテクスチャに対しても、 F_B による手法であれば 50% を越える本物らしさの評価を得られることがわかった。さらに、同時提示の実験において、8人中5人の被験者が形状だけでなくテクスチャ情報を知覚可能なことがわかった。また、より詳細に見ると F_T の手法では F_B の手法に比べ、いくつかの結果においてより平らな形状結果を示すことがわかった (Fig. 11)。



図 11 Simultaneous display of geometry and texture

我々の提案手法により、タッチパネル上に表示された物体にバーチャルに触れることが実現できる。我々は日常においてより触覚を利用可能になるであろう。これによりインターネットショッピングや、テレビ番組さらには遠隔コミュニケーションはより大きな可能性を持つことになる。インタフェースを通じてぬいぐるみや、衣服さらにはペットに触れるとことも可能になるだろう。

参考文献

- [1] Erik C. Chubb, J. Edward Colgate, and Michael A. Peshkin. Shiverpad: A glass haptic surface that produces shear force on a bare finger. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 189–198, 2010.
- [2] Masaya Takasaki, Ryo Tamon, Hiroyuki Kotani, and Takeshi Mizuno. Pen tablet type surface acoustic wave tactile display integrated with visual information. In *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 364–367, 2008.
- [3] Masashi Konyo, Hiroshi Yamada, Shogo Okamoto, and Satoshi Tadokoro. Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force. In *Haptics: Perception, Devices and Scenarios (Proceedings of 6th International Conference, EuroHaptics 2008)*, pp. 619–629, 2008.
- [4] David Wang, Kevin Tuer, Mauro Rossi, and Joseph Shu. Haptic overlay device for flat panel touch displays. In *Proceedings of 12th International Symposium on HAPTICS'04*, p. 290. IEEE, 2004.
- [5] O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, and C. Harrison. TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces. In *Proceedings of the 23rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 283–292. ACM, 2010.
- [6] Joseph M. Romano and Katherine J. Kuchenbecker. Creating realistic virtual textures from contact acceleration data. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 5, No. 2, pp. 109–119, 2012.
- [7] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. TECHTILE toolkit - A prototyping tool for design and education of haptic media. In *Proceedings of Virtual Reality International Conference (Laval Virtual) 2012*, 2012.
- [8] Margaret R. Minsky, Ming Ou-hyoung, Oliver Steele, Jr. Frederick P. Brooks, and Max Behensky. Feeling and seeing: Issues in force display. In *Proceedings of the 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics*, 1990.
- [9] Vincent Levesque and Vincent Hayward. Experimental evidence of lateral skin strain during tactile exploration. In *Proceedings of Eurohaptics*, 2003.
- [10] Satoshi Saga and Koichiro Deguchi. Lateral-force-based 2.5-dimensional tactile display for touch screen. In *Proceedings of IEEE Haptics Symposium 2012*, pp. 15–22, Mar. 2012.
- [11] Tatsuro Igarashi, Masaharu Isshiki, Liping Lin, Yu Liu, Katsuhito Akahane, and Makoto Sato. Proposal of spider-mouse. In *Proceedings of 15th Virtual Reality Society of Japan Annual Conference*, 2010.
- [12] Sunah Kim and Thomas W. James. *The Handbook of Touch*, chapter 6, pp. 143–159. Springer Publishing Company, 2011.