

高品質触覚ディスプレイ: 素材の粗さ感を加工する振動触刺激

浅野 修平^{*1}, 岡本 正吾^{*1}, 松浦 洋一郎^{*1}, 山田 陽滋^{*1},

High-quality Texture Display:

Vibrotactile Stimulation to Modify Roughness Sensation of Textures

Shuheh Asano^{*1}, Shogo Okamoto^{*1}, Yoichiro Matsuura^{*1}, and Yoji Yamada^{*1}

^{*1} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan)

We developed a vibrotactile texture display that used real materials such as fabric, wood, and leather. The usage of real materials enables the texture display to present high-quality textures to its users. The display can slightly modify the roughness sensations of the materials by applying vibratory stimuli to user's finger pads. Through experiments, two types of vibrotactile stimuli could selectively modify the fine and macro roughness sensations of materials while maintaining their original perceptual characteristics. Our methods are effective for different types of textures such as paper, wood, leather, and cloth.

Key Words : Tactile display, Vibration stimulus, Texture, Roughness

1. 緒 言

近年, さまざまな分野の製品設計や販売戦略において, 触感の価値への注目が向上している。触感によって製品に高級感・親近感などの印象を演出することができるため, 触感には製品設計の際の重要な要因になっている。このような背景を踏まえ, われわれは製品設計を支援するための触覚テクスチャ・ディスプレイを開発する。触覚テクスチャ・ディスプレイとは, 布や木のような素材表面の触感をヒトに呈示する装置である。製品設計の際にこの触覚テクスチャ・ディスプレイを用いることにより, 設計者は実際にさまざまな素材の触感を体験しながら所望する触感を選択することが可能になると期待される。これまでにテクスチャを簡易な機構で代替的に呈示したり, バーチャルリアリティ・システムで要求される単一デバイスでの多種のテクスチャ呈示という広範適用性を目的とした触覚テクスチャ・ディスプレイが開発されてきたが, 製品設計の分野での利用を前提としたリアリティの高いものの開発はなされていない。

本研究の目的は, 製品設計を支援するための触覚テクスチャ・ディスプレイ技術の開発である。われわれは, 製品設計の支援に用いることが可能なほどの触感のリアリティを実現するために, 本物の素材を採用する。さらに, この素材のテクスチャ(粗さ感)を加工するために, 振動触刺激を付加するという新たな着想

に至った。Fig. 1に示すように, この技術は, 素材をなぞる指腹に振動触刺激を加えることにより, 素材の触感を軽微に加工するものである。広範適用性には, 素材を取り替えることで対応可能である。例えば, 設計者がある製品の筐体表層の素材に木を用いる場合を考える。その際にわれわれが開発する触覚テクスチャ・ディスプレイを用いることで, 設計者は, 粗さ感が異なる木の触感を体験しながら触感を選択することが可能となる。ただし, 選択した触感を有する本物の素材をどのように作成するかは, 別途解決されなければならない課題ではある。

本物の素材に振動触刺激を加えて, その触感を加工しようという試みはこれまでに例がなく, その可能性は未知である。前報では振動触刺激により素材の粗さ感を加工可能であることを予備実験にて示した⁽¹⁾。本研究では, 倫理部会の承認の下, 十分な数の実験参加者を伴って前報の実験を追試するとともに(実験1, 2), われわれの手法の有効性が素材の種類に依存するかを新たに検証する(実験3)。実験1では, 振動触刺激が本物の素材の粗さ感を加工可能であることを確認する。実験2では, 振動刺激によって素材の触感が軽微に加工されることを確認する。つまり, 刺激によって素材の触感が全く異質なものに変化しないことを確認する。実験3では, 触感を加工する振動刺激の閾値が素材に依存するかどうかを確認する。

^{*1} 名古屋大学工学部工学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町)

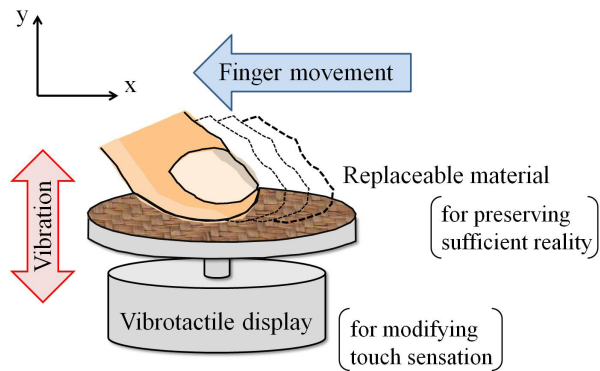


Fig. 1 Vibrotactile texture display with real materials

2. 関連研究

触覚テクスチャ・ディスプレイは利用目的から大きく2種に分類される。バーチャル・リアリティ・システムで要求される単一デバイスでの多種のテクスチャ表示という広範適用性を目的とするものと、テクスチャを簡易な機構で代替的に表示することを目的とするものである。しかし、これらのディスプレイは、われわれが目的とするような製品設計の分野での利用を前提としたリアリティが高いものではない。

広範適用性とは、一つの装置を用いて、より多くの種類のテクスチャを呈示することである。例えば、Caldwell ら⁽²⁾は振動子や熱変換素子を用いた触覚インターフェイスを開発し、素材の表面粗さ・摩擦・熱伝導率の違いを呈示した。Ikei ら⁽³⁾や Kyung ら⁽⁴⁾は素材の表面形状を呈示するためにピンマトリクス型触覚ディスプレイを用いた。Yamamoto ら⁽⁵⁾、Winfield ら⁽⁶⁾、Wiertelowski ら⁽⁷⁾は指腹と素材表面の相互作用によって生じる摩擦力を模擬することによりテクスチャを呈示した。

もう一つの分類として、簡易な機構で代替的にテクスチャを呈示することを目的とした研究が存在する。例えば、Konyo ら⁽⁸⁾はスティック・スリップ現象を模擬した振動触覚刺激を指腹に与えることにより、触察時の摩擦感覚を呈示するディスプレイ法を開発した。Bicchi ら⁽⁹⁾や Fujita ら⁽¹⁰⁾は、指腹と素材の接触面を制御することにより簡易に仮想的な柔らかさを呈示した。さらに、指腹への接線方向の変位により摩擦感覚を呈示する研究⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾も存在する。電気触覚ディスプレイは機械的な構造をほとんど用いることなく、簡易な構造で実現される⁽¹⁴⁾。以上のテクスチャディスプレイは簡易な構造の触覚ディスプレイを用いて限定的なテクスチャを呈示することを目的としている。

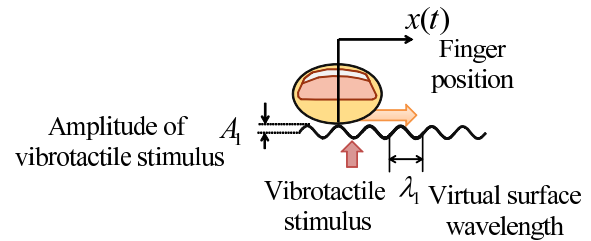


Fig. 2 Vibrotactile stimulus to modify fine-roughness sensations

3. 粗さ感を加工する振動触刺激

本研究では、素材をなぞる指腹に振動触刺激を呈示することにより、ファインおよびマクロな粗さ感を加工する。素材表面の突起の間隔が数百 μm から 1 mm 以下の凹凸をなぞる際に感じられる触感をファイン粗さ感、素材表面の突起の間隔が 1 mm 以上の凹凸をなぞる際に感じられる触感をマクロ粗さ感と呼ぶ⁽¹⁵⁾。この2種類の粗さ感は知覚メカニズムが異なることが知られている。

3.1 仮想的な表面波長刺激によるファイン粗さ感の加工法 仮想的な表面粗さの変化を振動刺激を用いて呈示する手法がある⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。この方法により呈示される触感は、キメの細かい織布を指でなぞるときに感じられるような粗さ感である。Fig. 2 にこの粗さ感加工法のイメージを示す。素材表面を指でなぞる際に、触覚ディスプレイが指腹に与える変位を、

$$y_1(t) = A_1 \sin\left(2\pi \frac{x(t)}{\lambda_1}\right) \quad (1)$$

で決定する。ここで、 A_1 は振動刺激の振幅、 $x(t)$ はなぞり運動を行っている素材上での指の位置、 λ_1 は仮想的な素材表面の空間波長である。本研究では、空間波長を 0.8 mm と設定することでファイン粗さ感を呈示する。この手法は指の速度に応じた刺激を呈示するため、素材をなぞる速度に応じて、振動刺激の周波数が変化する。振幅 A_1 を大きくすることで、呈示される変位刺激の粗さ感は強く知覚される。素材をなぞる指腹に正弦波状の変位 $y_1(t)$ を呈示することで粗さ感の加工を行う手法をファイン粗さ感加工法と呼ぶ。

3.2 インパルス振動触刺激によるマクロ粗さ感の加工法 素材表面に加工された溝を擦った際の振動を模擬するインパルス刺激を指腹に呈示することで、その溝から得られる粗さ感を呈示する手法がある⁽¹⁸⁾。この方法により呈示される触感は、素材をなぞる指が突起にひっかかるような粗さ感であり、ファイン粗さ感とは異なる。Fig. 3 にこの粗さ感加工法のイメージを示す。インパルスを減衰正弦波とすると、指腹に呈

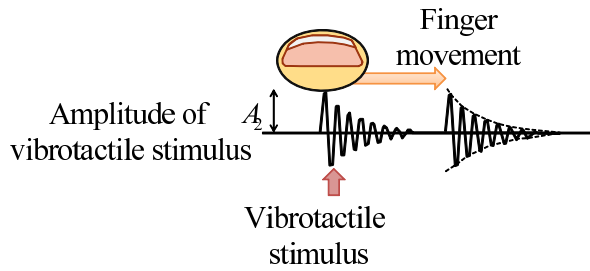


Fig. 3 Vibrotactile stimulus to modify macro-roughness sensations

示される変位は,

$$y_2(t) = A_2 \exp(-at) \cdot \sin(2\pi f_2 t) \quad (2)$$

で表される。ここで、 A_2 は振動刺激の振幅、 a は減衰係数、 f_2 は指腹の減衰固有周波数 200 Hz である。指腹の減衰固有周波数は、文献⁽¹⁹⁾に基づいて決定した。呈示された感覚が不自然にならないように a の値は 5.0 s^{-1} に設定した。この手法で呈示される刺激は手の動きに依存しない。つまり、手の速度に関わらず仮想突起の上を指が通過した瞬間にインパルス刺激が呈示される。刺激の頻度は、空間密度として任意に設定可能である。本実験では 1 impulse/10 mm と設定した。この手法は素材表面に疎に分布した仮想突起を想定しており、疎な表面粗さを呈示する。刺激の振幅 A_2 を大きくすることで、呈示される粗さ感は強く知覚される。この $y_2(t)$ を呈示することで粗さ感の加工を行う手法をマクロな粗さ感加工法と呼ぶ。

4. 振動触覚テクスチャ・ディスプレイ

4.1 触覚ディスプレイの機械的構造: 本研究で用いる触覚テクスチャ・ディスプレイは、アクチュエータとしてボイスコイルモータ (X-1740, 青山特殊鋼) を駆動させることにより振動触覚刺激を呈示する。定格電流時における最大推力は 2.42 N である。Fig. 4 に触覚テクスチャ・ディスプレイの構成を示す。素材・アクリル板・コイルは連結している。これらの駆動する 3 部品は色をつけて表示し、それ以外の磁石・アルミの土台・拘束棒は透明に表示している。拘束棒によりボイスコイルモータの変位は y 方向に拘束される。素材は取り換えることが可能である。出力変位は最大で 4 mm である。ボイスコイルモータへの司令値は周波数成形されており、周波数帯域に関わらず目標の変位が出力される⁽¹⁾。

4.2 制御システム: 実験装置を Fig. 5, ディスプレイシステムを表すブロックダイアグラムを Fig. 6 に示す。実験参加者は触覚ディスプレイの上に固定さ

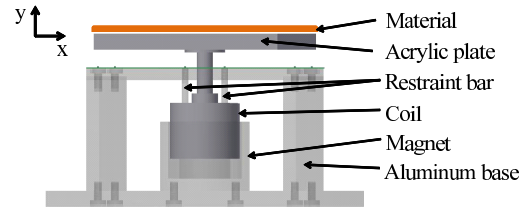


Fig. 4 Schematic representation of vibrotactile display based on voice coil motor

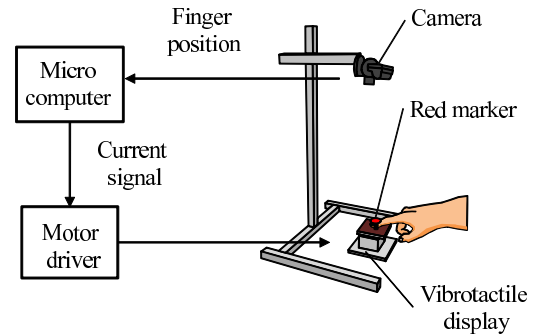


Fig. 5 Schematic of experimental setup

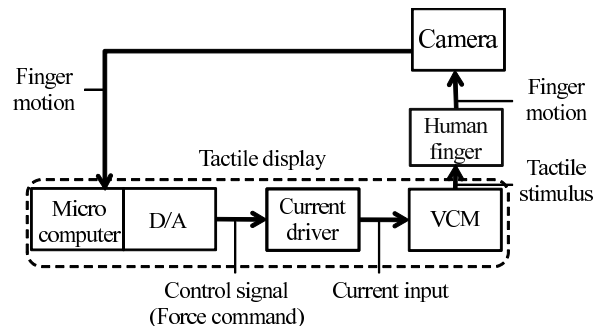


Fig. 6 Block diagram of vibrotactile display

れている素材をなぞる。参加者の指先に取り付けられた赤色のマーカの位置を、触覚テクスチャ・ディスプレイの真上に設置したカメラ (Playstation Eye, Sony Computer Entertainment) で捉えることで指の速度を計測し、なぞり運動中の示指の位置を計算した。カメラのサンプリングタイムは 30 fps であり、指の位置情報は 5 kHz で更新した。計算された位置情報に基づいて、ボイスコイルモータが駆動され、指腹を変形させることで粗さ感を加工した。

5. 素材の粗さ感加工実験

素材の粗さ感を加工する手法を 3 種の実験から評価した。実験 1 では、2 種類の粗さ感加工法により、素材のファインおよびマクロな粗さ感を選択的に加工可能であることを検証した。実験 2 では、振動刺激により素材の触感が軽微に加工されており、素材そのものの

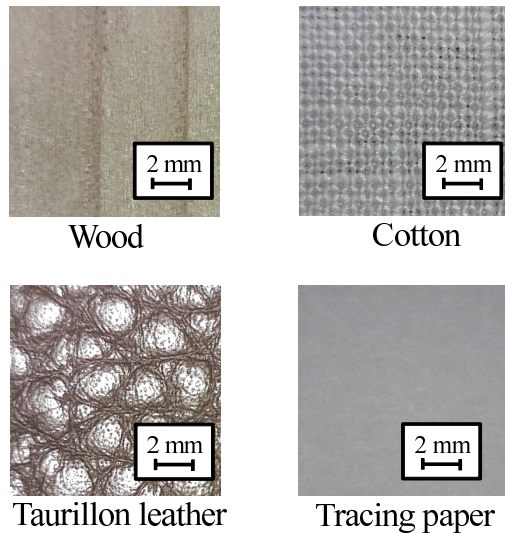


Fig. 7 Optical microscopy images of materials to which vibratory stimuli were applied

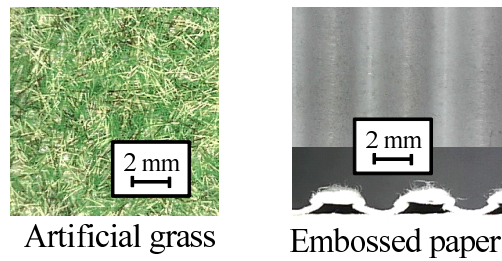


Fig. 8 Reference materials. Left: reference for fine roughness. Right: reference for macro roughness. Up: top view. Bottom: cross-sectional view.

触感と著しく異なっていないことを検証した。最後に実験3では、振動刺激の閾値を調べることで、素材に依存することなく粗さ感を加工可能であることを検証した。実験は、その手続きおよび参加者の選定方法を含め、名古屋大学工学部倫理部会の承認を得て行った。

5.1 参加者と素材 素材には木綿（粗く、柔らかい素材）、トリヨンレザー（凹凸が大きく、柔らかい素材）、木材（粗く、硬い素材）、トレーシングペーパー（滑らかな素材）の触感が異なる4種類を用いた。素材の厚みは、木綿0.196 mm、トリヨンレザー2.06 mm、木材4.88 mm、トレーシングペーパー0.134 mmであった。素材の表面をFig. 7に示す。参加者は、公募によって選ばれた名古屋大学の学生12名であった。実験中はアイマスクとピンクノイズが流れるヘッドホンにより参加者の視聴覚を遮断した。

5.2 実験1: ファイン・マクロ粗さ感の選択的加工

5.2.1 刺激: 実験1では、ファイン粗さ感加工法の振幅 (A_1) を7.5, 10, 12.5, 15 μm , マクロ粗さ感加工法の振幅 (A_2) を0.7, 1.0, 1.3, 1.6 mmの四段階にそれぞれ設定した。振動触刺激を呈示せず、素材をそのままなぞるという条件も刺激群に加えた。これら9種類の刺激を素材ごとにランダムに呈示した。36試行 (9刺激 \times 4素材) を1セットとし、参加者1人当たり合計4セット (144試行) を行った。

5.2.2 タスク: 参加者は利き手の示指の背側に赤色のマーカーをつけて、開始の合図とともにディスプレイ上の素材をなぞり、知覚したファインおよびマクロ粗さ感の強度を数値を用いて回答することを繰り返した (マグニチュード推定法)。参加者には、ファイン粗さ感およびマクロ粗さ感の基準として、目が細かい人工芝および周期的な凹凸を有するエンボス紙をそれぞれ与えた。これらの表面の写真を図. 8に示すこれらの基準の強度をともに50と指定し、18試行 (1/2セット) ごとに参加者に呈示した。

5.3 実験1の結果 参加者が回答した数値の幾何平均値を素材ごとにFig. 9とFig. 10に示す。

Fig. 9はファイン粗さ感加工法の結果である。刺激の振幅が大きくなるにつれて、参加者が知覚するファイン粗さ感が大きくなる (Fig. 9上) のに対して、マクロ粗さ感は大きく変化しなかった (Fig. 9下)。このグラフの傾向を評価するために、素材と刺激の有無を因子として、2次元配置分散分析を行った。素材そのものを呈示した際のファイン粗さ感の回答値と、 $A_1 = 12.5 \mu\text{m}$ の際のファイン粗さ感の回答値を比較したところ、有意な差が認められた ($F_0(1, 280) = 18.12$, $p = 2.83\text{E-}5$)。一方で、素材そのものを呈示した際のマクロ粗さ感の回答値と、 $A_1 = 12.5 \mu\text{m}$ の際のマクロ粗さ感の回答値を比較したところ、差は認められなかった ($F_0(1, 280) = 1.01$, $p = 0.315$)。 $A_1 = 15 \mu\text{m}$ の回答値に対しても、同様の傾向が確認された。すなわち、ファイン粗さ感刺激は、ファイン粗さ感に影響するが、マクロ粗さ感には影響しなかった。

Fig. 10はマクロ粗さ感加工法の結果である。刺激の振幅が大きくなるにつれて、参加者が知覚するマクロ粗さ感の数値が大きくなる (Fig. 10下) のに対して、ファイン粗さ感は大きく変化しなかった (Fig. 10上)。先程同様に、2次元配置分散分析を行い、この傾向を評価した。素材そのものを呈示した際のマクロ粗さ感の回答値と、 $A_2 = 1.3 \text{ mm}$ の際のマクロ粗さ感の回答値の間には、有意な差が確認された ($F_0(1, 280) = 17.85$, $p = 3.2\text{E-}5$)。一方で、素材そのものを呈示した際のファイン粗さ感の回答値と、 $A_2 = 1.3 \text{ mm}$ の

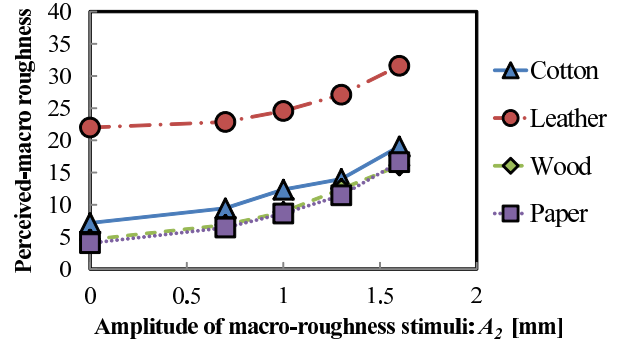
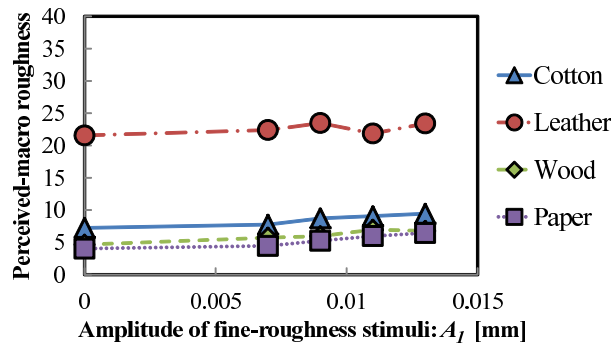
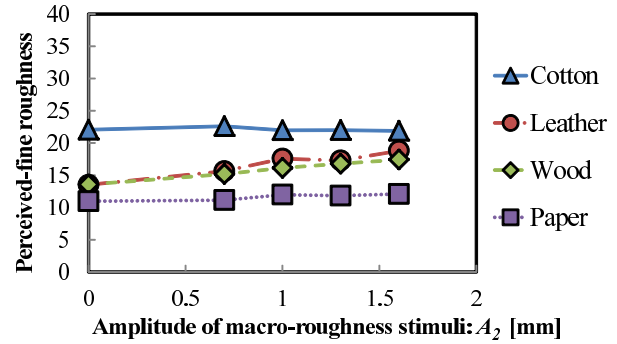
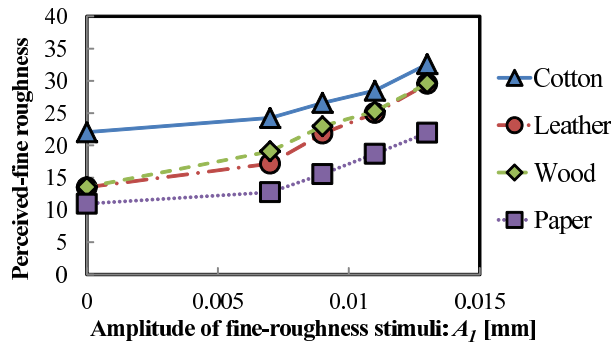


Fig. 9 Perceived fine and macro-roughness values upon application of fine-roughness vibratory stimuli to real materials

Fig. 10 Perceived fine and macro-roughness values upon application of macro-roughness vibratory stimuli to real materials

際のファイン粗さ感の回答値の間には、差が認められなかった ($F_0(1, 280) = 0.39, p = 0.53$). $A_2 = 1.6$ mmの回答値に対しても、同様の傾向が確認された。すなわち、マクロ粗さ感刺激は、マクロ粗さ感に影響するが、ファイン粗さ感には影響しなかった。

以上の解析から、われわれが用いた2種の振動触覚刺激によりファイン粗さ感およびマクロ粗さ感を選択的に加工可能である。

5.4 実験2: 素材の触感の軽微な加工 参加者は、振動触刺激を付加した素材を比較して、それらの非類似度を回答した。得られたデータを分析することで、振動刺激は、あくまでも素材の触感を軽微に加工するためのものであり、素材本来の触感を全くことなるものに変えるわけではないことを確認する。

5.4.1 刺激: ファイン粗さ感加工法では振動刺激の振幅が $12.5 \mu\text{m}$ の刺激を、マクロ粗さ感加工法では振幅が 1.3 mm の刺激を用いた。実験1の結果から、これらの刺激は、ファインおよびマクロな粗さ感を加工可能であることが分かっている。これらの2種類の刺激に加え、振動を加えずに素材そのままを呈示する条件も一つの刺激とした。以上の3種の条件を4種の素材に適用し、合計12刺激を用意した。これらの刺激が対になって呈示されるため、参加者一人あたり66

試行を行った。

5.4.2 タスク: 実験1と同様に参加者は開始の合図とともにディスプレイ上の素材をなぞり、対として呈示された刺激との主観的な非類似度を数値を用いて回答した。触感が全く同じならば参加者は0と回答した。

5.5 実験2の結果 Torgersonの多次元尺度構成法を用いて、12名の非類似度データの算術平均を刺激間の距離とし、刺激を2次元のユークリッド平面内に配置した。多次元尺度構成法とは、対象間の類似度ないし非類似度データを距離データとして多次元空間に位置づける多変量解析の手法である。その結果をFig. 11に示す。素材そのもの(白抜き)と素材にファインおよびマクロな粗さ感加工法を適用した刺激(灰色および黒)が近在している。平面上で近在している刺激は、知覚的に類似している。したがって、振動刺激によって素材の触感が全く異質なものになったのではなく、素材の触感が軽微に加工されたことが確認できた。すなわち、われわれの手法では、素材特有の触感を維持したまま、それらの粗さ感を軽微に変化させることが可能である。

5.6 実験3: 素材への依存性の検証 刺激の効果があらわれる振動刺激の振幅閾値を特定することで、

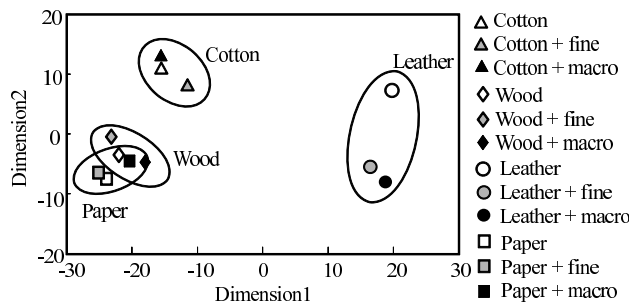


Fig. 11 Displacements of materials based on their dissimilarity.

振動刺激の効果が素材に依存するかを検証する。

5-6-1 刺激: 閾値を測定するために粗さ感加工法の振幅を一定のステップで上昇もしくは下降させて参加者に回答を求めるという極限法を用いた。ファイン粗さ感加工法のステップは $1.5 \mu\text{m}$ 、マクロ粗さ感加工法のステップは 0.15 mm とした。実験1の結果から、振動刺激による粗さ間の変化率を算出すると、振動刺激の効果が最も高い素材は木綿であり、最も小さい素材は革であることがわかる。したがって、ここでは、木綿と革について、振動刺激の効果が現れる閾値を特定し、比較する。4 試行 (2 素材 \times 2 種類の粗さ感加工法) を 1 セットとして、参加者一人あたり合計 2 セット (8 試行) を行った。

5-6-2 タスク: 参加者は対になった刺激を体験し、それらの粗さ感が同じか、それとも異なるかを回答した。対となった刺激の内、一方は素材そのものであり、もう一方は、素材に振動触刺激を加えたものであった。参加者が、両者の粗さ感が同じと感じられると回答すれば、振動触刺激の振幅を一段階上げた刺激を次に呈示した。また粗さ感が異なると回答すれば、振幅を一段階下げた刺激を次に呈示した。例えば、振動触刺激の振幅が十分に小さければ、参加者は、対となった刺激の粗さ感が同じと感じられると回答する。そして、粗さ感の差が感じられるまで振幅は上昇し続け、やがて、参加者は、粗さ感が異なると回答する。このように、参加者の反応が変わったとき、刺激系列の方向を上昇から下降 (もしくはその逆) に反転させる。この系列が反転する点を遷移点と呼ぶ。遷移点が 10 個に達したとき、試行を終えた。

5-7 実験3の結果 ファインおよびマクロ粗さ感刺激のそれぞれについて、革と木綿に対する閾値を求めた。10 個の遷移点の振幅を平均し、それを閾値とした。それぞれの素材と粗さ感加工法の組み合わせにつき、参加者 12 名からは 24 件の閾値が得られた

が、これらの最大値と最小値を 2 件ずつ除き、残りの 20 件を統計に用いた。ファイン粗さ感刺激を呈示した際の、革および木綿の閾値はそれぞれ $8.6 \pm 2.4 \mu\text{m}$ と $8.1 \pm 2.6 \mu\text{m}$ であった。またマクロ粗さ感刺激を呈示した際の、革および木綿の閾値はそれぞれ $2.2 \pm 1.2 \text{ mm}$ と $1.8 \pm 0.96 \text{ mm}$ であった。

分散分析の結果、ファイン粗さ感刺激 ($F_0(1, 39) = 0.4, p = 0.53$) に関しても、マクロ粗さ感刺激 ($F_0(1, 39) = 3.08, p = 0.087$) に関しても、革と木綿の閾値に差が認められなかった。したがって振動刺激の効果は素材に著しく依存すると言えない。振動を明らかに減衰させるような素材 (例えば、スポンジ) に関しては、閾値が上昇することが予想されるが、本研究で用いたような素材の範囲では、素材の種類による閾値の変化を気にする必要はないと言える。

6. 結 論

われわれは、製品設計の支援に用いることが可能なほどの触感のリアリティを実現するために、本物の素材を用いた触覚テクスチャ・ディスプレイを考案した。素材に振動触刺激を付加し、テクスチャのファインおよびマクロな粗さ感を独立に変化させることが可能である (実験1)。このとき、素材そのものが有する触感の特徴を維持したまま、それらの粗さ感が軽微に加工される (実験2)。さらに、布・木材・皮革・紙の素材に依存することなく、われわれの手法は有効である (実験3)。ただし、振動刺激を著しく減衰させるような素材にはこの限りではないと予想される。

参 考 文 献

- (1) S. Asano, S. Okamoto, Y. Matsuura, H. Nagano, and Y. Yamada, "Vibrotactile Display Approach that Modifies Roughness Sensations of Real Textures", *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, (2012), pp.1001–1006.
- (2) D. G. Caldwell and C. Gosney, "Enhanced tactile feedback (tele-taction) using a multi-functional sensory system", *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1993), pp. 955–960.
- (3) Y. Ikei, K. Wakamatsu and S. Fukuda, "Vibratory tactile display of image-based textures", *IEEE Computer Graphics and Applications*, (1997), pp.53–61.
- (4) K. Kyung and J. Lee, "Ubi-pen: A haptic interface with texture and vibrotactile display", *IEEE Computer Graphics and Applications*, (2009), pp.56–64.
- (5) A. Yamamoto, S. Nagasawa, H. Yamamoto and T. Higuchi, "Electrostatic tactile display with thin film slider and its application to tactile telepresentation systems",

- IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, No.2(2006), pp.168–177.
- (6) L. Winfield, J. Glassmire, J. E. Colgate and M. Peshkin, “T-pad: Tactile pattern display through variable friction reduction”, *Proceedings of The Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, (2007), pp.421–426.
- (7) M. Wiertelwski, J. Lozada, and V. Hayward, “The spatial spectrum of tangential skin displacement can encode tactual texture”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol.27, No.3(2011), pp.461–472.
- (8) M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto and S. Tadokoro, “Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force”, *Proceedings of the EuroHaptics*, (2008), pp.619–629.
- (9) A. Bicchi, E. P. Schilingo and D. De Rossi, “Haptic discrimination of softness in teleoperation: the role of the contact area spread rate”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.16, No.5(2000), pp.469–504.
- (10) K. Fujita and H. Ohmori, “A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control”, *Proceedings of the 5th World Multiconference on Systemics Cybernetics and Informatics*, (2001), pp.78–82.
- (11) T. E. Murphy, R. J. Webster and A. M. Okamura, “Design and performance of a two-dimensional tactile slip display”, *Proceedings of the EuroHaptics*, (2004), pp.130–137.
- (12) W. R. Provancher and N. D. Sylvester, “Fingerpad skin stretch increases the perception of virtual friction”, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol.2, No.4(2009), pp.212–223.
- (13) Y. Kurita and S. Yonezawa and A. Ikeda and T. Ogasawara, “Weight and friction display device by controlling the slip condition of a fingertip”, *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems*, (2011), pp.2127–2132.
- (14) H. Kajimoto “Electro-tactile display with real-time impedance feedback”, *Proceedings of the Eurohaptics*, (2010), pp.285–291.
- (15) 永野 光, 岡本 正吾, 山田 陽滋, “触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向”, *日本バーチャルリアリティ学会誌*, Vol. 16, No. 3(2011), pp.343–353.
- (16) M. Konyo, A. Yoshida, S. Tadokoro and N. Saiwaki, “A tactile synthesis method using multiple frequency vibration for representing virtual touch”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, (2005), pp.3965–3971.
- (17) T. Yamauchi, S. Okamoto, M. Konyo and S. Tadokoro, “Real-time remote transmission of multiple tactile properties through master-slave robot system”, *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2010), pp.1753–1760.
- (18) A. M. Okamura, J. T. Dennerlein and R. D. Howe, “Vibration feedback models for virtual environments”, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1998), pp.674–679.
- (19) R. Lundstrom, “Local vibrations-mechanical impedance of the human hand’s glabrous skin”, *Journal of Biomechanics*, Vol.17, No.2(1984), pp.137–144.