

視覚の同時刺激による テクスチャ感覚呈示システムの構築とその評価

福山 恵士^{†1} 澤田 秀之^{†1}

我々はこれまでに、形状記憶合金の細線を微小振動アクチュエータとして利用した触覚ディスプレイを開発し、素材の手触り感覚を呈示できることを見出した。呈示触覚と実素材との比較実験を行った結果、触覚刺激のみによる呈示では個人差が大きく、同じ条件の刺激を呈示しても人によって異なる素材として認識される場合があることが分かった。人間は物体のテクスチャを触覚によって認識する際、視覚情報や体性感覚も有効に活用している。そこで、視覚ディスプレイ上に表示したテクスチャ画像に対応した触覚刺激を、マウス上に実装した薄型触覚ディスプレイによってユーザの手掌部に呈示するシステムを構築した。本システムは、複数のテクスチャ画像を視覚ディスプレイに表示し、ユーザがマウス操作によって各画像上でカーソルを移動させることにより、その速度に応じた触覚刺激を呈示して、能動的に物体の表面を撫でているかのような感覚を呈示することが可能である。システムの評価実験から、視覚情報が触覚認識に有意に影響を与えていることが示され、また触覚刺激と同時に適切な視覚情報を呈示することで、よりリアリティのある触覚感覚の呈示が可能となることが分かった。

A Texture Presentation System that Stimulates Visual and Tactile Sensations and its Evaluation

KEISHI FUKUYAMA^{†1} and HIDEYUKI SAWADA^{†1}

The authors have developed a tactile display using shape memory alloy wires, and constructed a presentation system of various texture sensations. However, different subjects perceive different sensations by one tactile stimulus generated by certain conditions. A human recognizes a texture of an object by referring not only to the tactile sensations, but also to the visual and other physical sensations. This paper introduces a texture presentation system, which consists of the tactile display and a visual display, and describes the evaluation of the system and effects of visual stimuli to texture sensations by several experiments.

1. はじめに

現在、計算機をはじめとする各種機器から人間への情報呈示は、視覚や聴覚を利用したものが大半であるが、最近では一般のユーザがネットワーク上に存在する膨大な情報に触れる機会が増えており、従来の手法だけでは円滑な情報取得が困難になってきている。そこで、新たな情報呈示手法として、触覚を利用したものが注目されている。触覚を呈示可能なデバイスを用いれば、視聴覚を拘束しない情報呈示や、視聴覚による情報呈示の補助として運用しユーザへの負担を軽減するなど、様々な応用が期待できる。たとえばネットワークを通して、視聴覚情報とあわせて手触り感覚の呈示が可能となれば、より存在感を感じるバーチャルリアリティやコミュニケーションツールなどの実現にもつながる。

このような背景のもと、ユーザの身体部位へ触覚情報や力覚情報を直接呈示しようとする研究が、近年さかんに行われるようになってきている。ソレノイドや圧電アクチュエータをアレイ状に並べて、振動によって文字や図形パターン、触覚の伝達を行う手法¹⁾⁻⁵⁾や、電気刺激によって皮膚に触覚情報を伝達するデバイス⁶⁾、段階的に上下するピンによって物体の表面形状を呈示するシステム^{7),8)}、また超音波や空気噴流を使って非接触で触覚を呈示する研究^{9),10)}などが報告されている。これらの成果のうち、一部は実用化に向けた開発が進められてはいるものの、視覚ディスプレイや音響スピーカのように、触覚呈示手法として標準化されたものはまだない。たとえば身体に常時装着して触覚を呈示するデバイスの構築には、制御装置のサイズや消費電力、呈示条件の制限など、いまだ解決すべき課題がある。

我々はこれまでに、形状記憶合金の細線を用いた微小振動アクチュエータを開発し、これを用いた超小型省電力の触覚ディスプレイを構築して、触覚の高次知覚を利用した新しい情報呈示手法を提案してきた¹¹⁾。このアクチュエータは、直径 $50\mu\text{m}$ の細線を絶縁体に直接固定し、これに特定の条件で制御された微弱パルス電流を与えるだけで、低消費電力で駆動できるという利点がある。構造が単純であるため、細線をアレイ状に任意の曲面やフレキシブル基板上へ実装、あるいは布などへも編み込みが可能であり、これを乾電池や携帯端末のバッテリーを用いて長時間駆動できる。さらに、アレイ状に配置した複数のアクチュエータを、確率密度関数を用いたランダムパルスで駆動することにより、実物体のテクスチャ感覚を再現できる可能性も示した¹²⁾。ところが人間は、物体の手触りを触覚によって

^{†1} 香川大学
Kagawa University

知覚しているものの、それが具体的に何であるかを理解するために、同時に視覚や聴覚による情報や体性感覚、その他様々な身体感覚を利用している¹³⁾。そこで本研究では、触覚ディスプレイと視覚ディスプレイから構成されるテクスチャ感覚呈示システムを構築した。これは、複数の実素材画像を視覚ディスプレイに表示し、ユーザがマウス操作によって各画像上でカーソルを移動させた際に、その速度に応じた触覚刺激を触覚ディスプレイから呈示して、能動的に物体の表面を撫でているかのような感覚を知覚させるものである。本稿では、仮想テクスチャに能動的に触れる際の手触り感覚の呈示実験と、その評価について述べる。

2. 触覚ディスプレイとテクスチャ感覚呈示

2.1 微小振動アクチュエータ

本研究では、触覚ディスプレイのアクチュエータとして、糸状に加工した形状記憶合金 (SMA) を用いる。直径 $50\mu\text{m}$ 、長さ 5mm 程度に加工した SMA ワイヤは、 72°C まで加熱されると、最大 5% 程度長さ方向に収縮し、 68°C まで下がると元の長さに戻るという特性を持つ。この SMA ワイヤは、長さ 1mm あたり 0.6Ω 程度の抵抗値を持ち、電流を流すとオーム損によって瞬時に発熱するため、微弱な電流によって伸縮運動を制御することが可能である。この SMA ワイヤを図 1 に示すようにアーチ状に配置して適当なパルス電流を加えると、それに同期してワイヤが伸縮運動を繰り返すため、微小振動が発生する。SMA ワイヤ部に手掌部や指腹部で直接触れることで、十分に強い振動が知覚される。なおワイヤの伸縮の際には、刺激呈示部は発熱により 70°C 前後となるが、素子が $50\mu\text{m}$ と細く、デューティ比 $1:20$ 程度のパルス電流による加熱がごく短時間であることにより、ユーザが熱さを

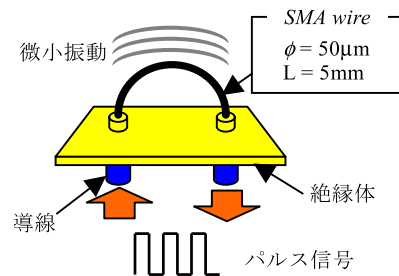


図 1 微小振動アクチュエータ
Fig. 1 Micro-vibration actuator.

感じることはない。

機械的な振動は、皮膚組織下に存在する触覚受容器であるマイスナー小体およびパチニ小体で知覚されるが、それぞれ 100Hz 以下、 $70\sim 300\text{Hz}$ 程度の周波数に応答することが知られている^{12),14)}。本 SMA ワイヤの振動形態を観測するため、高速度カメラを用いて撮影を行い、 300Hz までのパルス信号に完全に同期して振動していることを確認している。また、 $50\sim 100\text{Hz}$ の振動時の伸縮の変位量は、ワイヤ 5mm あたり約 $3\mu\text{m}$ であることも分かった¹⁵⁾。この変位量は、上述のマイスナー小体およびパチニ小体のサイズと同程度であり、本アクチュエータによる振動が皮膚下に分布する触覚受容器を選択的に刺激し、十分に知覚可能な触覚感覚を呈示できる。また本 SMA アクチュエータは細線であるため、任意の曲面に実装できるだけでなく、たとえば布などの柔軟物にも編み込んで触覚呈示を行うことも可能である。さらに、パルス制御回路のみで動作させることができ、アクチュエータ 1 個あたりの消費電力は数 mW 程度と省電力であることも特徴である。

2.2 触覚の高次知覚と触覚ディスプレイ

複数の SMA アクチュエータを特定の条件下で駆動させることにより、ファントムセンセーション (PS) や仮現運動 (AM) のような、仮想的な刺激像を知覚させる錯覚現象を発生させることが可能である¹¹⁾。我々は、これらを利用して触覚感覚を呈示するために、これまでに SMA アクチュエータを 8 個用いた小型・軽量かつ薄型の触覚ディスプレイを構築してきた。

PC 上で作成したパルス信号を電流増幅回路を介して個々のアクチュエータに入力することで、8 つの SMA アクチュエータの振動を独立に制御することができ、任意に PS や AM を発生させることが可能である。さらに、パルスの Duty 比や波高値、周波数といった各種パラメータを適切に選べば、スポンジやタオル、紙といった実素材のテクスチャに近い触覚刺激も呈示可能であることを、実験により実証を行ってきた^{12),16)}。

3. 触覚ディスプレイによるテクスチャ呈示

3.1 確率密度関数の利用

ものを撫でたときの皮膚感覚は、多様な周波数の振動が複雑に合成された面状の刺激が呈示されたことに対する触覚受容器の応答であると考えられる。よって、単に機械的振動を生起させる、あるいは PS や AM を発生させるだけでは、テクスチャ感覚を再現するのは困難である。そこで本研究では、アクチュエータ駆動のパルス信号の生成に、式 (1) で与えられる確率密度関数 $p(t)$ を用いる。

$$p(t) = \alpha + \beta \exp\left\{-\frac{(t - m_i)^2}{2\nu_i^2}\right\} \quad (1)$$

式 (1) 中の α はパルス発生確率の最低密度, $\alpha + \beta$ は最高密度を示し, m_i は最高密度を発生する時刻, ν は分散を示している. この確率密度関数によって発生するパルス列を入力信号として, 各アクチュエータを駆動する. たとえば, チャンネル i と j の間で異なる m を与えることで, $|m_i - m_j|$ (以下, dm) の時間差を置いてパルス密度が変化し, PS や AM が複雑に発生することにより, 多様なテクスチャ感覚を生起させることが可能である. また, 各チャンネルの m_i を適切に設定することで, 皮膚上をある方向に擦られているような刺激を生成することもできる. さらに, 各チャンネルごとの時間差 dm , および分散 ν_i, ν_j を変化させることで, 刺激の呈示時間や刺激の方向を制御することが可能である. α および β で刺激の最高密度および最低密度を変化させることで, 滑らかさや凹凸感, 柔らかさなどが異なる刺激を呈示することもできる.

3.2 呈示感覚評価実験

本ディスプレイが呈示する感覚を評価するため, 健康成人男性 7 名を被験者とし, 実験内容について説明後, デバイスによる刺激を評価させた. 評価項目を選出するにあたり, 布の特性評価に利用される風合いと呼ばれる基準を参考にした¹⁷⁾. しかしこれらの評価基準は布地評価の熟練者が利用するものであり, 一般の人には評価項目の意味や評価基準が理解し難いと考えられる. そこで, 5 種類の基本風合い評価項目である「こし」「ぬめり」「ふくらみ」「しやり」「はり」を参考に, 被験者が評価しやすいように, 我々が普段から使い慣れている言葉を用いて, 以下の 4 つの評価項目を用意した.

- 粗い (1) —滑らか (7)
- 凹凸している (1) —平坦である (7)
- 硬い (1) —柔らかい (7)
- 弾力性のある (1) —弾力性のない (7)

入力信号の条件は Duty 比を 1 : 20 で固定し, パルス周波数は 50 および 100 Hz とし, dm, ν はそれぞれ 300, 500, 800 の 3 種類ずつとした. この計 18 条件の刺激をランダムな順序で被験者に呈示し, 上述の 4 項目について 1~7 の 7 段階で評価させた. この評価は, 点数が高いほど滑らかで, 平坦であり, 柔らかく, 弾力性がないと感じたものとした. なお, 刺激は被験者が評価を終えるまで呈示し続けた.

各評価の平均を表 1 に示す. 平均を周波数別に見ると, すべての評価項目において 100 Hz での得点がやや高いことが分かる. このことから, 50 Hz よりも 100 Hz の方がきめの細か

表 1 評価点数の平均

Table 1 Average scores of evaluation.

(a) 滑らかさ							(b) 平坦さ						
Freq.	50Hz			100Hz			Freq.	50Hz			100Hz		
$\nu \backslash dm$	300	500	800	300	500	800	$\nu \backslash dm$	300	500	800	300	500	800
300	3.9	3.6	3.6	4.7	4.6	4.9	300	4.1	3.4	3.0	4.3	4.3	5.0
500	4.3	5.3	4.6	4.3	5.4	5.0	500	4.3	5.0	5.0	5.1	5.1	5.3
800	4.6	4.3	2.9	5.3	4.3	4.9	800	4.3	4.1	4.9	5.4	4.7	4.6

(c) 柔らかさ							(d) 弾力性の無さ						
Freq.	50Hz			100Hz			Freq.	50Hz			100Hz		
$\nu \backslash dm$	300	500	800	300	500	800	$\nu \backslash dm$	300	500	800	300	500	800
300	4.0	3.6	3.7	5.4	5.3	5.9	300	4.3	3.6	3.3	4.4	4.6	5.6
500	5.0	4.9	4.9	5.7	5.3	6.0	500	4.4	5.1	3.9	5.9	5.1	4.6
800	4.4	4.0	3.9	5.1	5.0	4.9	800	3.9	5.3	4.7	5.7	5.0	4.1

いテクスチャ刺激になることが分かった. この要因としては, 周波数が上がれば刺激発生密度が高くなる, あるいは Duty 比固定のためパルス幅が短くなるために, 粗さ, あるいは凹凸感を感じにくくなり, その結果, 滑らかさとして知覚されていると考えられる.

弾力性評価においては, 被験者から特に評価しにくいという感想を得た. 人間が物体の弾力性を知覚する際は, 自身の力で押したときの反発力を主な判断材料とする. 本アクチュエータによる刺激呈示では受動的な呈示となるために, 被験者自身の力で押し込む動作が不可能であり, 被験者がこのような感想をいただいたと考えられる.

以上のように, 本ディスプレイは駆動パルス信号の生成パラメータによって, 滑らかさや凹凸感だけでなく, 柔らかさの違いを再現できることが示された. 特に, 周波数を変化させることで, 4 項目の感覚について各々違った評価を知覚させることができ, 周波数が高いほどきめの細かい, 優しい触り心地となることが分かった. 本触覚ディスプレイ呈示部の皮膚への接触面は, SMA 素子部以外すべてが硬質な電子回路基板であることから, パルス信号の条件によって異なる柔らかさが知覚された要因は, SMA 素子の微小振動による刺激であると考えられる. よって, 適切なパラメータで SMA アクチュエータを駆動させることにより, 触覚受容器を選択的に刺激して高次知覚を生起させ, 物体の手触り感覚も再現できると考えた.

しかし本実験では、同じ条件であっても被験者によって回答得点が大きく異なる場合が見受けられた。そこで、この認識結果のばらつきが本ディスプレイ特有のものであるのかを確かめるため、人間が触覚のみによって物体をどの程度認識できるのかの検証実験を行った。

4. 人間のテクスチャ認識能力評価

人間が実物体の手触り感覚を、触覚のみでどの程度認識できるのかを、21歳から26歳までの被験者6名(男性4名,女性2名)を対象とした実験により考察した。被験者にはまず、用意した5種類の実素材を自由に触って、テクスチャを覚えさせた。次に被験者に目隠しをし、図2に示す実験装置を介して、5種類の実素材を2回ずつ計10回、ランダムな順序で呈示し、それが何なのかを答えさせた。なおアクリル製スライド板の上には各素材が貼

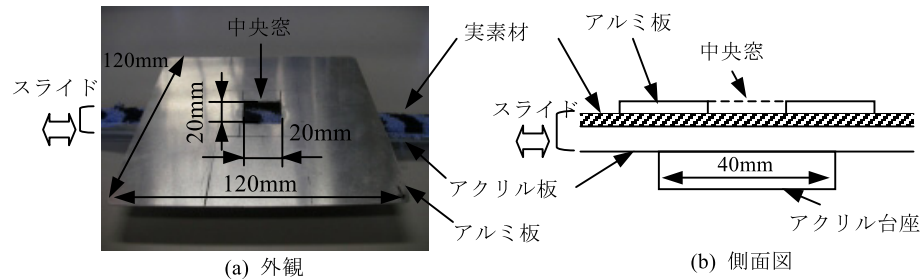


図2 実験装置
Fig.2 Experimental device.

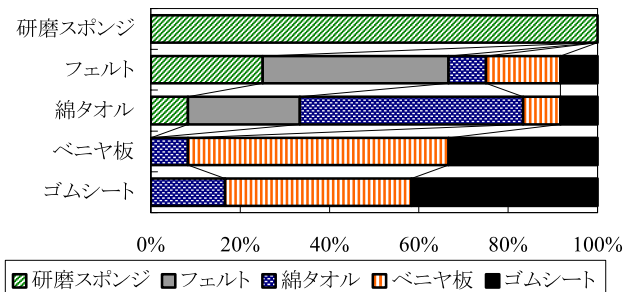


図3 呈示素材と回答の内訳
Fig.3 Relationship between presented materials and answers.

り付けられており、実験補助者が左右に20mm/sec程度の速度でスライドさせて触覚を呈示した。被験者は、中央窓に利き手の手掌部を軽く置いて受動的に素材の感覚を感じることにし、視覚情報はいっさい得ずに答えることになる。実素材として、明らかにテクスチャが異なるものの中から、研磨スポンジ、フェルト、綿タオル、ベニヤ板、ゴムシートの5種類を選んだ。

呈示素材と回答の結果を、図3にまとめた。縦には呈示した実素材、横軸はその素材を触りながら被験者が答えた回答の内訳を示しており、正答率は研磨スポンジを除き60%未満であったことが分かる。誤答の内訳を見ると、綿タオルとフェルト、ベニヤ板とゴムシートなど、比較的似た粗さの素材どうしで多いものの、フェルトとベニヤ板、ゴムシートと綿タオルなどまったく異なる素材どうしでの誤答も散見される。つまり人間は、触覚のみによって対象物が何であるかを判断することが困難であると考えられる。たとえば、暗がりや掴んだものが何であるかを触覚だけで判断することは困難であり、目で見ると判断するよりもはるかに時間を要する場合がある。また、頼るものが触覚のみである場合、我々は対象物を何度も触ってみるといった動作を行う。このように視覚から受ける刺激によって触印象が影響を受けるといった知見から^{13),18)}、人間は普段触覚によりものを認識する際、視覚や体性感覚といった他の感覚も有効に利用していると考えられる。

5. テクスチャ感覚呈示システム

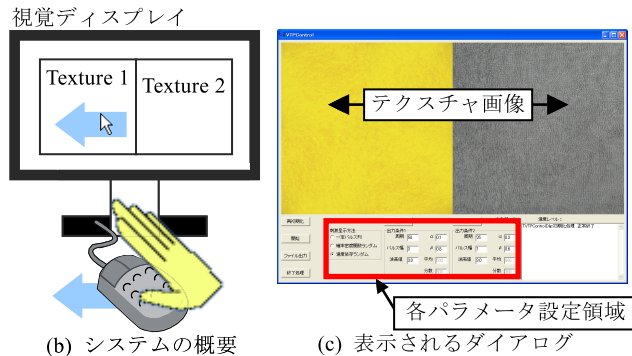
5.1 システムの構築

3章、4章の実験結果をもとに、図4に示すテクスチャ感覚呈示システムを構築した。図4(a)に示す触覚ディスプレイは、8個のSMAアクチュエータと柔らかい革素材で構成されており、ユーザの手掌部がアクチュエータに当たるような位置でマウスに実装されている。視覚ディスプレイ上には、左右2種類のテクスチャ画像が隣接して表示される。なお表示する画像は、実素材をデジタルカメラで撮影し、画面内で明るさが一様に、かつユーザから見たテクスチャのサイズが実物とほぼ同じとなるよう加工を行った。ユーザがマウスを操作してカーソルを画像上で移動させると、その画像に対応した触覚刺激が、マウス上の触覚ディスプレイからユーザの手掌部にリアルタイムで呈示される。この触覚刺激は、カーソルがテクスチャ画像上に存在する間は呈示され続け、テクスチャ画像間を移動した場合には、それに対応した刺激に切り替わる。カーソルが画像から外れた場合、触覚刺激呈示を停止する。これによりユーザは、能動的な動作によって呈示される触覚感覚を体感することが可能となる。

ここで、我々が普段物体を撫でる際には、その動作速度によって感覚が変化し、早く撫で



(a) マウスに装着された触覚ディスプレイ



(b) システムの概要

(c) 表示されるダイアログ

図 4 テクスチャ感覚呈示システム

Fig. 4 Texture presentation system.

たときにはゆっくり撫でたときに比べて強い刺激となって感じられる。本触覚ディスプレイで、なぞり動作にかかわらずつねに一定の触覚刺激を呈示すると、能動的な触動作が可能であるにもかかわらず、触覚刺激が一様で変化しないという不自然なものとなることが分かった。そこで本システムによる刺激強度を、マウスの移動速度に応じて変化させるアルゴリズムを実装した。

まず、一定の周波数 f_i で、くし幅 W_i [msec]、波高値 H_i [V] の電圧を持つパルスが繰り返すパルス列を、各テクスチャ画像ごとに用意する。このパルス列の各パルスを、マウスの移動速度に逆比例する確率で間引いたものを入力信号とする。パルス発生確率をリアルタイムに更新することで、ユーザの手の速度に応じて触覚の強度を変化させることが可能となる。パルス発生確率とマウス移動速度の関係を図 5 に、パルス列の例を図 6 に示す。マウスの移動速度とパルス発生確率 p_i の関係は、静止時と、動作の最大速度時に感じる触覚感

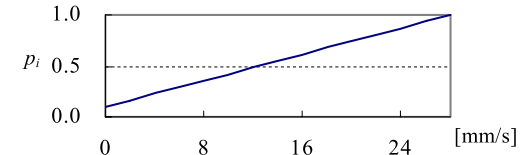


図 5 マウス移動速度とパルス発生確率の関係

Fig. 5 Relation between mouse moving speed and pulse density.

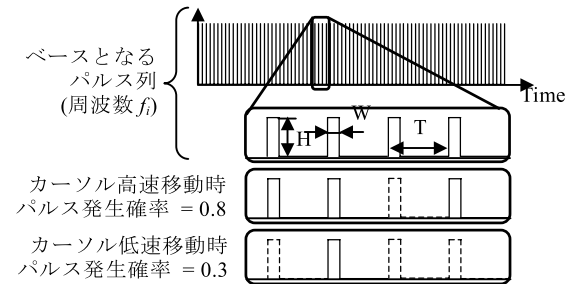


図 6 入力パルス列の生成例

Fig. 6 Examples of pulse sequence.

覚をもとに、その間を線形でつなぐものとした。

以上より、ユーザはテクスチャ画像を能動的に撫でるような動作によって、あたかも仮想テクスチャを撫でているかのような感覚を得られることが期待できる。

5.2 速度変化によるテクスチャ知覚の評価

ユーザの能動的なマウス操作により呈示されるテクスチャ感覚と、動作速度の変化によるテクスチャ知覚の違いを評価するため、前章と同じ 6 名の被験者を対象として触覚呈示実験を行った。実素材において比較的テクスチャの違いが大きいものとして、研磨スポンジと綿タオルを用いることとし、左側には前者を、右側には後者の写真画像を表示した。各画像に対応した触覚呈示パラメータは表 2 に示す値に定めたが、これらは呈示刺激が各素材のテクスチャに近くなるよう、本評価実験の被験者 1 名を含む 3 名を対象とした予備実験により決定したものである。被験者には呈示システムと実験の概要を説明後、自由に操作させながら、以下の質問に 7 段階で回答させた。

Q1) 左右画像による刺激の差は知覚できるか

Q2) マウスカーソルの速度変化による刺激の差は知覚できるか

表 2 触覚刺激呈示条件

Table 2 Parameter values of tactile stimuli.

対応する素材	周波数[Hz]	Duty 比
研磨スポンジ	6.7	1:50
綿タオル	10.0	1:50
段ボール	25.0	1:40

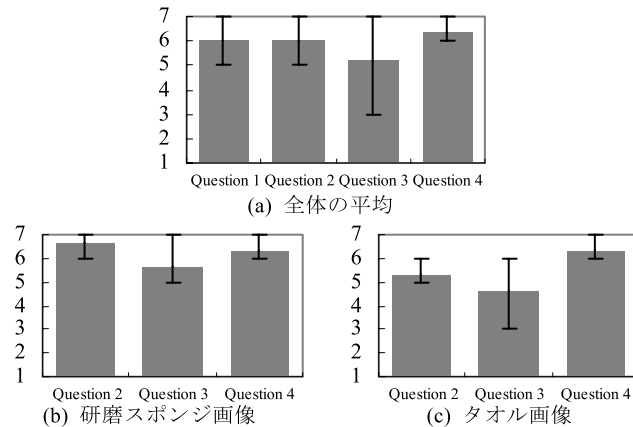


図 7 評価得点の平均および最大値と最小値
Fig. 7 Summary of evaluation scores.

Q3) 表示されている画像のテクスチャを撫でているように感じるか

Q4) マウス操作と触覚刺激の不一致はないか

質問 1, 2 では刺激の差を知覚できるときに、質問 3 では撫でているように感じたときに得点が高くなるよう、質問 4 では不一致を覚えた場合に得点が低くなるよう評価させた。すなわち、すべての評価項目で得点が高いほど、本システムが良好に撫で感覚を呈示できるといえる。

各質問に対する回答の平均と最大値および最小値を図 7(a) に示す。これを見ると、すべての項目で良好な評価を得ることができており、本手法を用いてテクスチャ感覚が呈示できることが示された。特にテクスチャの触覚刺激およびマウスの移動速度による刺激の変化はよく認識されており、本手法による刺激呈示は、2 つのテクスチャを十分異なる感覚として知覚できることが分かった。しかし撫で感覚に関する評価は他と比べるとやや低い。これに

関しては複数の被験者から、表示されている画像からテクスチャをイメージしにくいという感想を得た。表示しているテクスチャ画像は実素材を撮影したものであるが、一様なテクスチャとなるよう加工を施したため、全体形状や厚み、表面の陰影などの外見情報が欠落し、被験者が画像から触覚感覚をイメージしにくかったためと考えられる。

同結果を各画像別にまとめたものを図 7(b) および (c) に示す。タオル画像では速度変化による刺激差知覚に関する評価がやや低い。これは、予備実験の結果をもとに決定した p_i の範囲が、研磨スポンジでは 0.1~0.9 に対し、タオルでは 0.3~0.9 と変化幅が小さかったことに起因すると考えられる。

5.3 視覚刺激の影響調査

(1) 実験 1 無地画像とテクスチャ画像の比較

テクスチャ感覚の認識に視覚情報がどの程度影響しているのかを調査するため、前節の 6 名をすべて含む計 7 名の被験者（男性 5 名、女性 2 名）を対象にテクスチャ感覚の呈示実験を行った。

図 4(b) における Texture 1 の領域に黒色の無地画像を、Texture 2 には実素材の表面写真を表示し、触覚刺激は双方とも Texture 2 の領域に表示されている実素材に対応するものを呈示した。用いた実素材画像は、被験者がテクスチャをイメージしやすいと考えた、研磨スポンジ、綿タオル、段ボールの 3 種類を選び、触覚ディスプレイから呈示する刺激は、前節で用いた表 2 の条件を利用した。なお 5.2 節の実験結果を受け、 p_i はすべての素材について 0.1~0.9 と設定した。被験者には、黒色画像評価の際には、Texture 2 に呈示している素材のテクスチャを思い浮かべながら、また Texture 2 の素材画像評価の際には、その画像を意識的に見ながらマウスを動かすよう指示した。なお評価は、Texture 1 から行った。触覚呈示条件はいつさい明かさず、左右の画像に対して各々ランダムな条件で触覚刺激を呈示すると伝えた。

被験者にシステムと実験の概要を説明後、呈示された触覚刺激が Texture 2 に表示されているものと一致していれば 7 点、まったく違っていれば 1 点とする、7 段階で評価させた。これにより、同じ触覚刺激について、対応関係のある視覚刺激と、関係のない視覚刺激を与えながら評価することが可能となる。

各被験者の評価結果を、表示画像別に図 8 にまとめた。無地画像を見ながら行った評価では、評価値が大きくばらついたり、有意に低い得点が回答されることが見られたが、実素材の画像では半数以上の被験者が、無地画像の場合に比べて高い評価値を回答した。このことから、意味のある視覚情報を触覚刺激と同時に呈示すれば、個人差の激しい触覚呈示にお

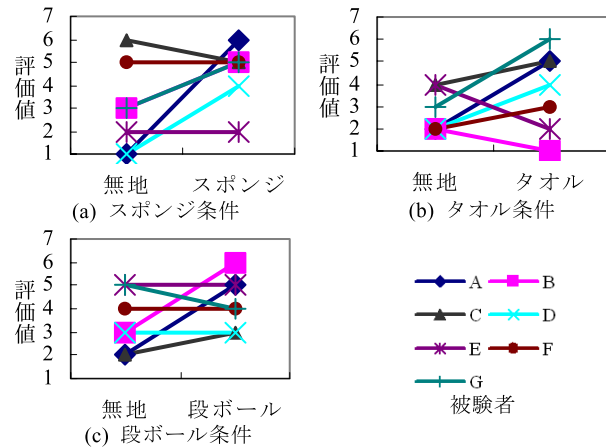


図 8 触覚刺激呈示条件別の類似度評価値変化

Fig. 8 Similarity evaluation with different conditions of tactile stimuli.

いて、良好にテクスチャ感覚の呈示が行えることが示唆された。

しかし一部の被験者は、2 画像間で評価得点に変化しない、あるいはテクスチャ画像で無地画像よりも低い評価得点を回答した。この原因として、表示したテクスチャ画像から視覚として得られる印象が、被験者によって異なっていた可能性が考えられる。テクスチャ画像で低い得点を回答した被験者の中には、緑色の研磨スポンジ写真を見て芝生だと誤認した者や、タオル画像を見て絨毯を連想していた者が見られた。実験前には実験補助者によって各画像の素材が何であるかは教示したが、実験中に被験者が視覚からいただいたイメージと触覚刺激が一致しなかったため、テクスチャ画像で評価得点が上昇しなかったと考えられる。

段ボール画像にはその素材が明確に判別できるよう、段ボール特有の波のような模様が見える画像を用意した。しかし、これも波模様から大きな凹凸感をイメージした被験者から、触覚刺激と一致しないという感想を得ている。このように視覚情報を同時に呈示する場合は、適切なものを用意しなければ逆効果となる可能性があり、画像の作成や選定も慎重に行う必要があるといえる。

(2) 実験 2 視触覚一致条件と不一致条件の比較

本実験では、触覚呈示を研磨スポンジに対応した刺激に固定し、表示する画像の組を研磨スポンジとタオル、研磨スポンジと段ボールの 2 組として、触覚刺激と視覚情報との類似度

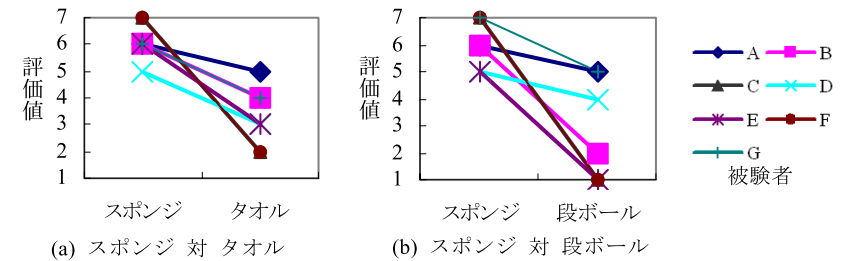


図 9 スポンジ触覚刺激に対する異なる視覚刺激呈示時の評価値変化

Fig. 9 Evaluation of different visual stimuli against sponge tactile stimulus.

を前実験と同じ基準で評価した。これにより、被験者は視覚情報と触覚刺激が一致している場合と、明確に一致していない場合で評価することになる。なお、被験者は前実験と同じ 7 名とした。

図 9 に結果を示すが、すべての被験者において、視触覚刺激が一致している場合は評価得点が高く、一致していない場合は評価得点が下がっている。このことから、呈示する触覚刺激に一致した視覚情報を呈示することで、より良好にテクスチャ感覚を呈示できるといえる。また本実験は、被験者 7 名の各々に対して、実験 1 から連続して実験を行っており、研磨スポンジの視触覚一致条件における評価値が実験 1 よりも高くなっている。これは繰返し実験による触覚刺激に対する慣れの効果と考えられ、わずかな訓練によって、より実物に近いテクスチャ感覚として認識させることができる可能性も示唆された。

被験者別に評価得点の変化を見ると、スポンジに対するタオル画像では、2 名の被験者が 5 点、5 名が 1~3 点低いスコアを与えている。対する段ボール画像では、4 人以上低く評価した被験者が 4 名おり、うち 2 名はスポンジで 7 点と段ボールで 1 点を回答している。残りの 3 名は 1~2 点の低下であった。視触覚刺激の一致に対して、不一致条件で 1~3 点程度の低下と評価した被験者は、実験 1 と同様に画像から受けた印象による影響が見られた。スポンジの触覚刺激は、チクチクとして粗く、ザラザラした感覚として知覚される。段ボールは本来、滑らかで皮膚への刺激が少ないテクスチャを持っているが、段ボール画像の波模様から凹凸感をイメージした被験者は、スポンジ刺激のザラザラ感覚と視覚情報が一致しているように感じたという感想を述べている。同様に、タオル画像でも硬い絨毯をイメージした被験者は、触覚刺激との一致度を比較的高く評価していた。一方でタオルの柔らかさを思い浮かべた被験者は、視覚情報と触覚刺激の間に大きな不一致を感じたことも分かった。

6. ま と め

本稿では、SMA の細線を微小振動アクチュエータとして利用した触覚ディスプレイをマウスに装着し、PC ディスプレイ上に表示した画像と同期させて触覚感覚を呈示するシステムを構築した。複数の実素材の画像を視覚モニタに表示し、ユーザがマウス操作によって各画像上でカーソルを移動させることにより、その速度に応じた触覚刺激を出力して、能動的に物体の表面を撫でているかのような感覚を呈示する手法について述べた。システム評価実験の結果、触覚刺激単独と比較して、視覚情報と同期させて呈示することにより、より良い実素材感として知覚されることが分かった。しかし不適切な視覚刺激を用いる場合、視触覚間で不一致感覚として知覚されて実素材感覚が損なわれる場合があるため、視覚情報の作成や選定は慎重に行う必要があることも分かった。今後はより詳細な評価実験を行い、さらに触覚と他の感覚や呈示条件との関係を調査し、実素材の呈示により適した視覚情報と触覚の呈示条件を見い出していく。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構による平成 21 年度シーズ発掘試験および、つなぐしくみの支援を受けて行われた。

参 考 文 献

- 1) 元木陽平, 山田浩史, 昆陽雅司, 田所 諭, 前野隆司: 超音波振動を用いた触覚インターフェースの開発 (第 2 報: ピンアレイの共振を利用した小型圧電振動子の開発), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-A08 (2007).
- 2) 山本晃生, 石井利樹, 樋口俊郎: 摩擦力制御を用いた静電皮膚感覚ディスプレイ, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.11, pp.1132-1139 (2004).
- 3) 昆陽雅司, 田所 諭, 高森 年, 小黒啓介, 徳田献一: 高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触感ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.4, pp.323-328 (2001).
- 4) Ikei, Y. and Shiratori, M.: TextureExplorer: A tactile and force display for virtual textures, *Proc. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp.327-334 (2002).
- 5) Kyung, K.-U. and Lee, J.-Y.: Ubi-Pen: A Haptic Interface with Texture and Vibrotactile Display, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.29, No.1, pp.24-32 (2009).
- 6) Kajimoto, H.: Electro-tactile Display with Real-Time Impedance Feedback, *Proc. EuroHaptics*, pp.285-291 (2010).
- 7) Velazquez, R., Pissaloux, E., Hafez, M. and Szwedczyk, J.: A Low-Cost

Highly-Portable Tactile Display Based on Shape Memory Alloy Micro-Actuators, *IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems, VECIMS 2005*, 1567577 (2005).

- 8) Yang, T.-H., Lee, J.-S., Lee, S.-S., Kim, S.-Y. and Kwon, D.-S.: Conceptual Design of New Micro-Actuator for Tactile Display, *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp.1306-1309 (2007).
- 9) Hoshi, T., Takahashi, M., Iwamoto, T. and Shinoda, H.: Non-contact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound, *IEEE Trans. Haptics*, Vol.3, No.3, pp.155-165 (2010).
- 10) Kotani, K., Yamamoto, K. and Horii, K.: Characteristics of Differential Threshold for Tactile Sensation Induced by Air-Jet, *Workshop on Tactile and Haptic Interaction*, pp.56-61 (2007).
- 11) 水上陽介, 内田啓治, 澤田秀之: 糸状形状記憶合金の振動を利用した高次知覚生起による触覚呈示, *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.12, pp.3739-3749 (2007).
- 12) 水上陽介, 澤田秀之: 形状記憶合金糸を用いた触覚ディスプレイと微小振動の発生確率密度制御による触覚感覚の呈示, *情報処理学会論文誌*, Vol.49, No.12, pp.3890-3898 (2008).
- 13) Guest, S.: Tactile dominance in speeded discrimination of textures, *Experimental Brain Research*, Vol.150, No.2, pp.201-207 (2003).
- 14) 田崎京二, 小川哲朗: 感覚の生理学 < 新生理科学体系 9 >, pp.290-308, 医学書院 (1989).
- 15) 澤田秀之, 水上陽介, 福山恵士, 内田啓治, 金子 真: 形状記憶合金糸を利用した微小振動アクチュエータとその特性解析, 計測自動制御学会第 8 回システムインテグレーション部門講演会, pp.67-68 (2007).
- 16) 福山恵士, 澤田秀之: SMA の微小振動子アレイによるテクスチャ感覚呈示とその評価, 計測自動制御学会第 9 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2008), pp.961-962 (2008).
- 17) 金丸勝彦: 編地の設計因子が風合いに及ぼす影響について, 山梨県工業技術センター研究報告, No.21 (2007).
- 18) 家崎明子, 杉田明弘, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: 複合現実型視覚刺激による触印象への影響, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.13, No.2, pp.129-139 (2008).

(平成 22 年 6 月 19 日受付)

(平成 23 年 1 月 14 日採録)



福山 恵士

1984年生．2008年香川大学工学部知能機械システム工学科卒業．2010年同大学院工学研究科知能機械システム工学専攻博士前期課程修了．同年4月より新日本製鐵株式会社に勤務．在学中は，ヒューマンインタフェース，特に触覚ディスプレイの研究，開発に従事．



澤田 秀之（正会員）

1967年生．1990年早稲田大学理工学部応用物理学科卒業．1992年同大学院博士前期課程修了．1998年同大学院博士後期課程修了．日本学術振興会特別研究員，早稲田大学助手を経て，現在，香川大学工学部教授．ロボティクス，音響信号処理，ヒューマンインタフェースの研究に従事．工学博士．電子情報通信学会，電気学会，計測自動制御学会，日本機械学会，ヒューマンインタフェース学会，IEEE各会員．平成21年度情報処理学会論文賞，電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション賞，ヒューマンインタフェース学会研究会賞，IEEE/RSJ IROS Hyper Human Tech Award ほか受賞．