

テクスチャ感覚呈示システムの試作と 視覚刺激の触覚知覚への影響の評価

福山 恵士[†] 澤田 秀之[†]

我々はこれまでに、糸状形状記憶合金を利用した微小振動アクチュエータを開発し、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。人間はもののテクスチャを触覚を利用して認識する際、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、形状記憶合金ワイヤを利用した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モニタに表示し、ユーザがどのテクスチャ上をどのような速度でなでるかによって呈示刺激を変化させることにより、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、触覚と視覚の同時呈示により、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わかった。

A Texture Presentation System and the Evaluation of Effects of Visual Stimuli to the Perception of Tactile sensations

KEISHI FUKUYAMA[†] HIDEYUKI SAWADA[†]

The authors have developed a tactile display using shape memory alloy wires, and constructed a presentation system of various texture sensations. A human recognizes a texture of an object by referring not only to the tactile sensations, but also to the visual and 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 by several experiments.

1. はじめに

現在、計算機など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、様々な応用が期待される。さらに、従来手法では呈示することが困難であった、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つながる。

我々はこれまでに、糸状形状記憶合金を利用した微小振動アクチュエータを開発し、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¹⁾。また、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事により、実物体のテクスチャ感

覚を再現できる可能性も示した²⁾。ところが人間は、ものの手触りを触覚によって知覚しているものの、その物体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、その他様々な情報を利用している。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、仮想テクスチャに能動的に触れることのできる手触り感覚呈示の実験をおこなった。また、視覚刺激が触覚知覚に与える影響について、評価を試みた。

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 μ m、長さ5mm程度に加工したSMAワイヤは、72 $^{\circ}$ Cまで加熱されると、最大5%程度長さ方向に収縮し、68 $^{\circ}$ Cまで下がると元の長さに戻るという特性を持つ。SMAワイヤに電流を流すとその内部抵抗により発熱するため、本研究で用いるような非常に細いものであれば、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パルス電流を加えると、それに

[†] 香川大学 工学部

Faculty of Engineering, Kagawa University

同期して SMA ワイヤは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接触することで、十分に強い振動が知覚される。

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、100~300Hz 程度の周波数に応答することが知られている^{2),3)}。本 SMA ワイヤは、300Hz までのパルス信号に同期して、十分に触覚呈示に利用できる振動を生成できる。SMA アクチュエータは 1 個あたりの消費電力は数 mW 程度であり、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¹⁾。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、実験により実証をおこなってきた^{2),4)}。

しかし触覚のみの呈示では知覚感覚の個人差が大きく、同条件で刺激を呈示しても、ユーザ実験で安定した評価を得ることが困難であった。そこで本研究では、新たに人間のテクスチャ認識能力を実験により考察した上で、視覚刺激が人間の触印象に影響する⁵⁾という知見を利用し、視覚情報による刺激を併せたテクスチャ感覚呈示システムの構築と評価をおこなった。

3. 人間のテクスチャ認識能力評価

まず、人間が実物体の手触り感覚をどの程度認識できるのかを、被験者 6 名を対象とした実験により考察した。被験者には実験の内容を説明後、用意した 5 種類の実素材を触ってテクスチャを覚えさせてから目隠しをさせた。次に図 2 に示す実験装置を介して、5 種を 2 回ずつ計 10 回、ランダムな順序で触らせ、それが何なのかを答えさせた。アクリル製スライド板の上には各素材が貼り付けられており、実験時には呈示者が左右に 20 mm/sec 程度の速度でスライドさせて触覚

を呈示した。これにより被験者は、素材の手触り感覚のみを手掌部で感じ、それ以外の情報は一切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。縦軸は呈示した実素材、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わかる。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同士で多いものの、フェルトとベニヤ板、ゴムシートと綿タオルなど全く異なる素材同士での誤答も散見している。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能力が十分であるとは言いがたく、曖昧な結果となることが示された。例えば、光源のない暗所で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

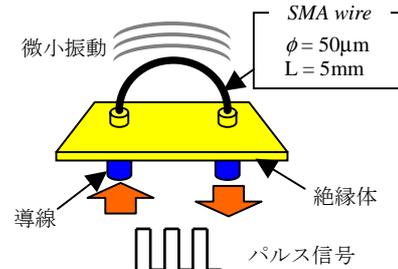


図 1 微小振動アクチュエータ

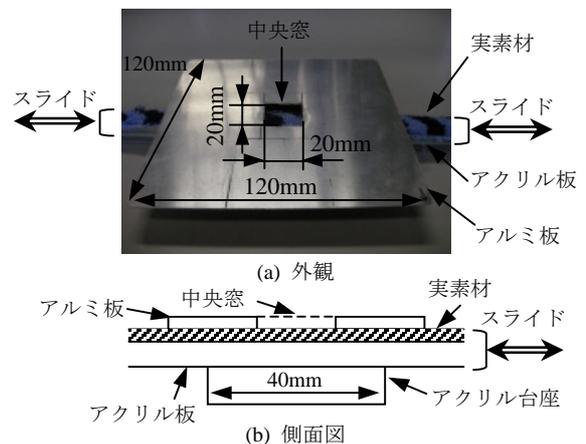


図 2 実験装置

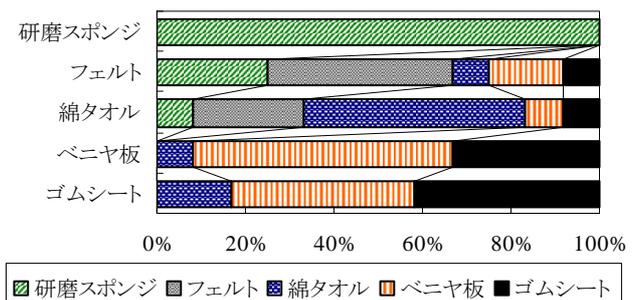


図 3 呈示素材と回答

り、目で見て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う動作を行う。以上のことから、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。

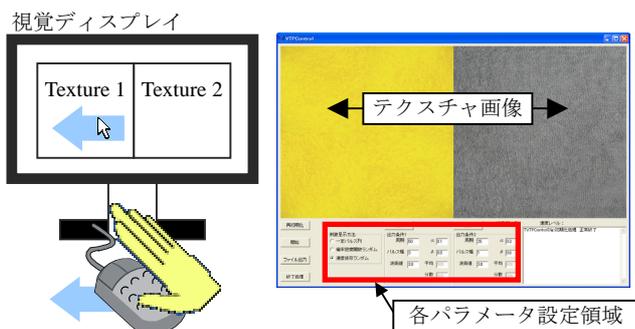
4. テクスチャ感覚呈示システム

3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装着されている。視覚ディスプレイ上には2種類のテクスチャ画像が隣接して表示され、ユーザがマウスを動かす事によっ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限り呈示され続け、異なるテクスチャ画像上に移動した場合には、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、触覚刺激呈示は停止される。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選択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常に



(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

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、触覚刺激が同様で変化しないという不自然なものとなるのがわかった。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、各テクスチャ画像毎に用意する。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覚を元に、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. 評価実験

5.1 実験1 視覚刺激の影響の調査

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、7名の被験者を対象にテクスチャ感覚呈示実験を行った。

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。被験者には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全く同じであれば7点、全く似ていなければ1点をつけさせ、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

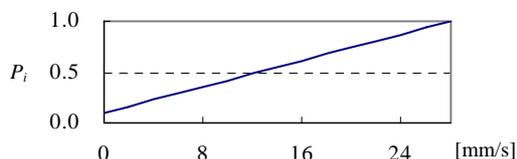


図5 マウス移動速度とパルス発生確率

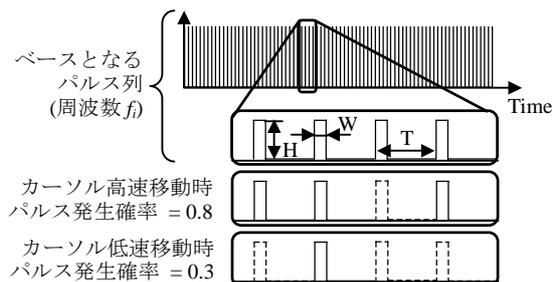


図6 触覚ディスプレイパルス列の生成例

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。

用いた実素材は、被験者がテクスチャをイメージしやすいと考えられるものとして、研磨スポンジ、綿タオル、段ボールを選択した。触覚ディスプレイから呈示する刺激は、各実素材に近い条件を7名のうちから3名を選び、予備実験によって表1のように決定した。波高値は3.2Vで固定とした。

被験者には評価対象の画像を意識的に見ながらマウスを動かすように、また評価は Texture 1 から行うよう指示した。触覚呈示条件は一切明かさず、左右をそれぞれランダムな条件で呈示するだけ伝えた。

各被験者の評価値を、表示画像別に図7にまとめた。実素材の画像を見ながら触覚を呈示した場合には、無地画像を見ながら評価した場合に比べて高い評価となっている。このことから、触覚によるテクスチャの知覚には、視覚情報が影響を及ぼしていることが示唆された。これにより、個人差の激しい触覚呈示において、本システムが良好にテクスチャ感覚の呈示が行えると考えられる。

5.2 実験2 ミスマッチ条件での評価

本実験では、触覚呈示条件を研磨スポンジに対応したものに固定し、表示する画像を無地とタオル、無地と段ボールの2組とし、触覚刺激と各表示画像との類似度を前実験の基準で評価させた。これにより、被験者は表示画像とは異なるテクスチャ感の触覚刺激を評価することになる。なお、被験者は前実験の被験者のうちの5名とした。

図8に結果を示すが、タオル画像において評価が低下しており、触覚刺激と視覚情報が食い違うことによって違和感を生じたことが示唆された。しかし段ボール画像を表示した場合では、有意な差は見られなかった。段ボール画像で高い評価値を回答した被験者に感想を聞くと、段ボール表面の波のような模様と凹凸感のある刺激がマッチしたように感じたという回答を得た。このことから、被験者によって画像から異なるイメージを持ってしまったために、評価が分かれてしまった可能性が考えられる。

以上の結果より、視覚刺激がテクスチャ認識に影響力を持つことが示されたが、今後はより多くのパラメータとテクスチャの組み合わせを用いてさらに実験をおこない、検証を続けていく必要がある。

6. まとめ

本稿では、SMA ワイヤ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情報と同期させた触覚呈示システムを構築した。評価実験の結果、視覚情報が触覚知覚に影響を与えていることが示された。今後はより詳細な評価実験を行い、触覚と他の感覚や呈示条件との関係を調査していく。

表1 入力信号条件

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

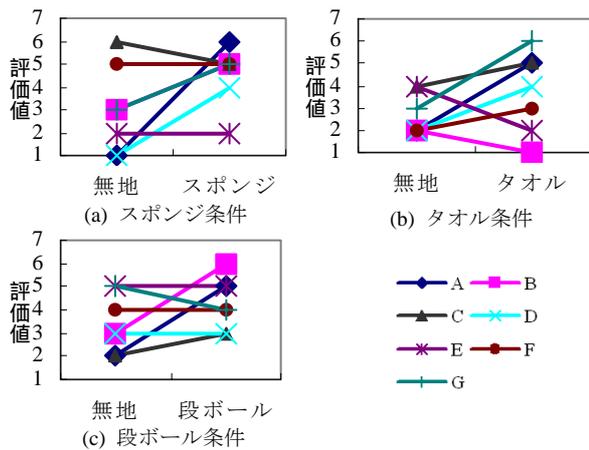


図7 触覚呈示条件別の類似度評価値の変化

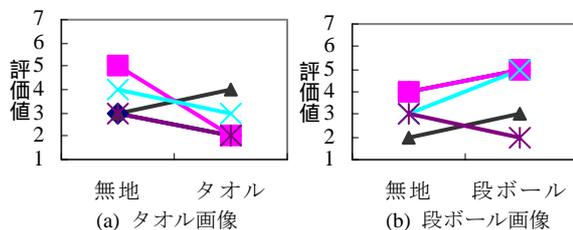


図8 ミスマッチ条件での評価値変化

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おこなわれた。

参考文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 家崎明子, 柚田明弘, 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, pp129-139 (2008)