

推薦論文

形状記憶合金系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

水上 陽 介^{†1} 澤田 秀 之^{†1}

本稿では、形状記憶合金系を振動アクチュエータとして利用した新しい触覚ディスプレイを提案し、各アクチュエータを駆動するパルス信号を、その発生確率密度によって制御して触覚感覚を呈示する手法について述べる。著者らは糸状に加工した形状記憶合金が温度により伸縮する特性を利用し、数 Hz ~ 数 100 Hz のパルス信号によって微小振動を発生する小型アクチュエータを開発し、これを触覚呈示に用いる手法を提案してきた。本研究では、複数個の形状記憶合金系のアクチュエータを面状に配置した触覚ディスプレイの構築を行った。本アクチュエータは、パルス信号を与えることによってその周期に同期して微小振動を発生するが、ランダム発生パルスによって各アクチュエータを駆動することにより、様々な触覚感覚を呈示できることが分かった。さらに、パルス信号の発生確率密度を時間的に変化させることにより、面のテクスチャや、物体をなぞった感覚を生成できることを明らかにした。本稿では、まずこれらの触覚感覚の呈示手法について述べ、実験による本ディスプレイの有効性の評価について述べる。

Tactile Display Using Shape Memory Alloy Threads and the Presentation of Tactile Sensations by the Control of Pulse-signal Density

YOSUKE MIZUKAMI^{†1} and HIDEYUKI SAWADA^{†1}

The paper introduces the development of a compact tactile display employing novel micro-vibration actuators using a shape-memory alloy, and describes the presentation of various tactile sensations to a human skin by the control of pulse-signal probability density given to the vibration actuators. The authors have paid attention to the super-elasticity characteristics of a shape-memory alloy formed into a thread, and have so far developed a thin tactile device by driving each actuator with pulse current signal for generating vibrations. In this study, we found novel tactile sensations presented by driving actuators

with randomly generated pulse signals. This paper describes the generation of touch feelings such as texture information of objects and a rubbing sensation by controlling the signal probability density, which was evaluated by the users' experiments.

1. はじめに

人間は、外界からの情報を得るために、視覚、聴覚、触覚といった五感を有効に活用している。また、人間同士のコミュニケーションにおいては、五感に加えて言語が有効に利用されている。特に対面対話においてはジェスチャやスキンシップが、また、ある対象物についての議論や討論においては、触覚や力覚などの、身体動作を通じた情報のやりとりが大きな意味を持つことが少なくない。このように、人と外界、人と人のコミュニケーションとは、五感やその他の感覚を通じた情報のやりとりであるということができ、これを計算機によって再現し、コミュニケーションを支援、活性化しようとする多くの提案がなされている。

現在、視覚や聴覚を通じた情報呈示手法は、多くのものが提案され、そのうちのいくつかは広く普及しているものもある。さらに、それらの情報を現実世界の対象物と融合させる試みもみられる。その一方で、触覚情報や力覚情報を直接、身体部位に呈示しようとするものもいくつか存在する¹⁾⁻⁶⁾が、物体のテクスチャや質感、それをなぞった際に感じる動的な触覚感覚の呈示においては、いまだ良好な成果が得られているとはいえない。また、これらの成果を遠隔コミュニケーションや拡張現実感の呈示に応用する研究も進められているが、いまだ多くの課題が存在する。視覚や聴覚が、外界に存在する物理現象を視覚・聴覚受容器によって検出しているのに対し、触覚は、情報の受け手である人間自身の皮膚の変形や、熱の伝達といった物理現象をもとに知覚される。また対象物表面のテクスチャや質感の知覚には、皮膚の変形だけでなく、手を能動的に動かし、物体をなぞるといった能動的センシングが不可欠であるが、このような能動知覚に着目した触覚呈示装置の提案や、触覚の知覚機構の解明はいまだ有効な成果は得られていない。

一方、触覚ディスプレイは、視覚障害者用の情報呈示装置として普及が進んでいる⁷⁾。たとえば、ソレノイドや圧電素子をアレイ状に並べて、振動によって文字や図形パターンの伝

^{†1} 香川大学

Kagawa University

本稿の内容は 2008 年 3 月のインタラクシオン 2008 シンポジウムにて報告され、同プログラム委員長により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

達を行うものや、電極を使用し、電流によって情報を伝達するもの、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ものなどがある。しかしながら、これらの呈示装置は文字や物体の形状など、静的なパターン呈示を前提として設計されており、また刺激子の大きさや形状が制限されるために、なぞる、こする、たたくといったような動的な触覚感覚や、物体表面の質感といった、触覚受容器が個別に、もしくは複合的に刺激されることによって生起される感覚の呈示は困難である。また、従来の手法では呈示部のアクチュエータおよびその駆動装置の小型化や、省電力化が困難であるため、携帯型の情報呈示装置には応用が難しい。これらの課題が、触覚情報呈示装置が広く普及しにくい一因にもなっている。そこで筆者らはこれまでに、糸状に加工した形状記憶合金を振動アクチュエータとして用いた、小型省電力の触覚ディスプレイを構築した。また本触覚ディスプレイを用いて触覚の高次知覚を生起させ、動的な触覚情報の呈示が可能であることを示した⁸⁾。

本稿ではまず、微小振動アクチュエータをマトリクス状に配置した触覚ディスプレイの構築について述べる。次に各アクチュエータの駆動信号をランダム発生パルスにより生成して、様々な触覚感覚を呈示する手法および、パルスの発生確率密度を制御することにより、物体をなぞった際に感じる動的な感覚の呈示を行う手法について述べる。

2. 微小振動アクチュエータと触覚呈示システム

2.1 触覚の高次知覚

ファントムセンセーション (Phantom Sensation: PS)⁹⁾ とは、皮膚上の2点を同時に刺激した際に、その間のある特定の部位に、あたかも新たな刺激 (これを刺激像と呼ぶ) があるように感じる現象である (図1)。刺激像の出現位置は主に、2刺激の強度差に依存する。

一方の仮現運動 (Apparent Movement: AM)¹⁰⁾ は、皮膚上の2点を、立上り位相差付きで刺激した場合に、刺激像が一方の刺激点から他方の刺激点に連続して移動しているように感じる現象である (図2)。立上がり時間差や刺激時間の差によって、刺激像の移動速度

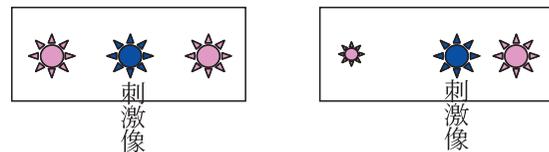


図1 ファントムセンセーション
Fig.1 Phantom sensation.

や移動形態が変化する。

2.2 触覚ディスプレイ

本研究では、糸状に加工した形状記憶合金が温度により伸縮する特性を利用し、これを触覚呈示に応用した小型振動アクチュエータを製作した⁸⁾。図3に、直径 $50\mu\text{m}$ 、長さ 3mm の糸状形状記憶合金を用いたアクチュエータの構造を示す。本アクチュエータは 3Ω 程度の電気抵抗を持つため、電流によって即座に加熱されて長さ方向に $3\mu\text{m}$ 程度の縮みを起こすことが、高速度カメラによる観測によって確認されている¹¹⁾。また、放熱および熱伝導により温度が下がると元の長さに戻る。さらに著者らは、本アクチュエータが 300Hz までの周波数を持つパルス電流によって、それに完全に同期した微小振動を生成し、明確な触覚刺激の呈示が可能であることを示した。なお刺激呈示時の身体とアクチュエータの接触面で

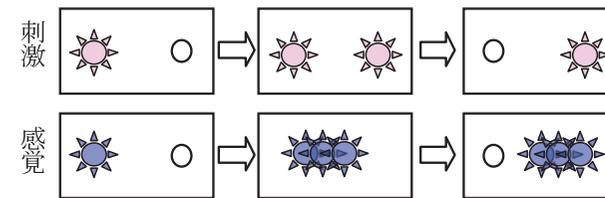


図2 仮現運動
Fig.2 Apparent movement.

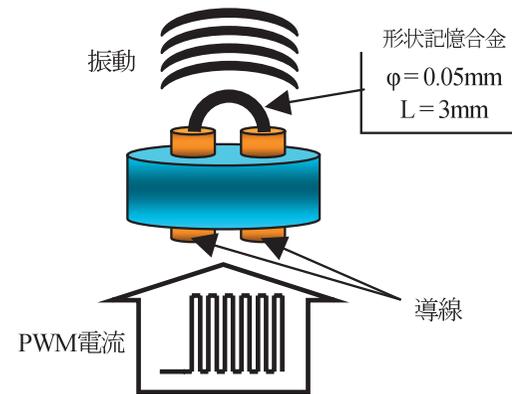


図3 微小振動アクチュエータの構造
Fig.3 Structure of micro-vibration actuator.

は、糸状の形状記憶合金の馬蹄形状はつぶれて呈示部に密着し、長さ方向に $3\mu\text{m}$ 程度のわずれ変位が起こることになる。

さらにこのアクチュエータを 3×3 素子のマトリクス状に配置し、図 4 に示す薄型触覚ディスプレイを構築した。この触覚ディスプレイを用いて、触覚の高次知覚であるファントムセンセーションおよび仮現運動を利用して、線状のなぞり感覚の呈示や、書き順つきの文字呈示といった、動的な触覚情報の呈示が可能であることをこれまでに確認した¹²⁾。本稿では、8 つの振動アクチュエータを複合的に駆動することにより、物体を掌でなぞった際に感じる表面のテクスチャや、物体表面の質感といった触覚感覚の生起について述べる。

2.3 触覚呈示システム

本研究で構築を進めている触覚情報呈示システムは、上述の触覚ディスプレイを用いて、触覚感覚の呈示を行う。

まず計算機により、触覚ディスプレイの各チャンネルに入力するパルス信号を生成し、これを D/A ボードによってアナログ信号に変換する。変換された信号は、反転増幅回路によって呈示デバイスの駆動に十分な電力に増幅される。本ディスプレイは、各アクチュエータを周期 $3\text{ [msec]} \sim 3\text{ [sec]}$ 、ゲイン $1.0 \sim 4.0\text{ [V]}$ 、Duty 比 $1:15 \sim 1:50$ のパルス電圧で独立に駆動することにより、その周期に同期して様々な強度の微小変位振動が起こり、触覚感覚の呈示が可能となる。なお、アクチュエータの駆動には、パルス波のほかに、正弦波、台形波、

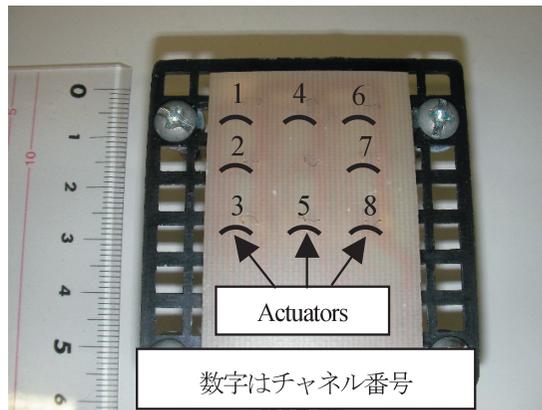


図 4 8 素子による触覚ディスプレイ

Fig. 4 Tactile display having 8 vibration actuators.

三角波なども可能であり、これまでにこれらの信号を計算機によって作成して触覚呈示実験を行ってきた。本稿で述べる実験においては、触覚感覚の評価が最も高く、また制御信号の生成が容易である点から、駆動信号としてパルス波を用いることとした。

また電気抵抗 3Ω のアクチュエータを、Duty 比 $1:20$ 、ゲイン 1.5 [V] のパルス電圧で連続駆動させた場合の平均消費電力は約 37 mW であるが、本稿で述べる触覚の呈示においては、パルスを確認的に発生させるため、数 mW 程度となる。形状記憶合金の伸縮の際には、刺激呈示部の発熱により約 70°C となるが、素子が $50\mu\text{m}$ と細く、デューティ比 $1:20$ 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、使用者が熱さを感じることはない。

3. 触覚感覚呈示のための予備実験

3.1 ランダム刺激呈示実験

筆者らはこれまでに、触覚ディスプレイ上の各アクチュエータを、適当な立上がり時間差で駆動させて AM や PS を生起させることにより、素子間での線状のなぞり感覚の呈示や、書き順付き文字の呈示を行うことが可能であることを示した。次に筆者らは、各アクチュエータの駆動パルス信号をランダムに与えることで、定常的な入力信号では得ることのできない、異なった触覚感覚が呈示できるのではないかと考えた。各アクチュエータを微小振動させるための電流パルスの Duty 比を $1:20$ で固定し、 $8,000\text{ [msec]}$ の間、周波数 50 [Hz] のパルス信号をランダムに発生させて刺激を呈示する実験を行った。

ランダムパルス信号による触覚刺激の生成手法を以下に述べる。まず、各アクチュエータの刺激発生回数を n 回として、任意の $2n$ 個の数値を、 0 から $8,000$ の範囲で乱数によって生成する。生成した数値を小さいものから 2 個ずつの組としてまとめ、パルス信号による刺激開始時刻と終了時刻に対応させる。これを 8 チャンネル各々について行い、入力パルス信号を決定する。これにより 8 秒間の間に各チャンネルにおいてランダムに n 個の刺激が生成されることになり、図 5 に示すように各触覚刺激においては周波数 50 [Hz] のパルス信号により振動が生成される。本手法によって生成された $n = 5$ の場合のランダムパルス信号の例を図 6 に示すが、図中の太線がパルス発生の状態を表している。

本ランダム信号入力による刺激を、男性 10 名 (18 歳 ~ 45 歳) の利き手 (右手) に呈示し、これを評価させた。呈示部位は図 7 に示すとおり、掌の中央部とした。被験者の感想から、以下のことが分かった。

- 何かを触った際に感じる、物体表面のテクスチャのような触感を感じる。
- ランダム信号生成の際、発生させる刺激回数 n を増やすと、滑らかな質感が感じられ、

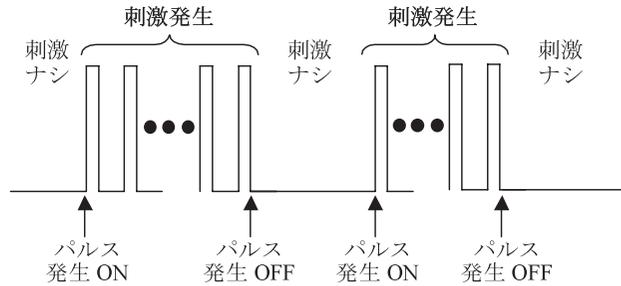


図 5 ランダム発生パルスによる触覚刺激の生成
Fig. 5 Tactile stimuli generated by random pulse signals.

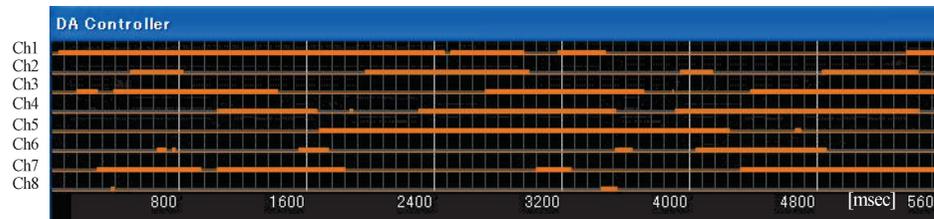


図 6 ランダムパルス発生信号の例
Fig. 6 Example of randomly generated pulse signal.

逆に刺激回数を減らすと、粗い面を触っているような感覚が得られる。

- 入力信号によっては、何かが掌でランダムに動いているような感覚や、波打っている感覚が生じる。
- 発生させるランダム個数が少ない場合、凹凸を感じる。

このように、各アクチュエータの駆動条件の違いによって、様々な触覚感覚が呈示されることが明らかになった。これは皮膚下の触覚受容器への直接的な刺激だけでなく、触覚ディスプレイ上の素子が様々な時間間隔で駆動することにより、AM や PS が複合的に生起されているためと考えられる。

3.2 パルス発生確率密度制御による触覚感覚の呈示

前節の実験により、ランダム生成信号による刺激で、物体表面のテクスチャ感覚の呈示の可能性が示された。そこで、パルス信号の生起確率密度を時間的に変化させることにより、対象物のテクスチャの方向性や対象物の移動をより明確に呈示できないかと考えた。



図 7 刺激呈示部位

Fig. 7 Location of tactile sensation presentation.

そこで、ガウス分布を利用し、次式で決定される発生確率密度 $p(t)$ に基づいて、パルス信号を生成した。

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

ただし、 $\alpha + \beta \leq 1.0$

t は時刻、 m はガウス分布の平均値、 σ は分散、 α はオフセットを、 β はゲインを表す。各チャンネルのパルス発生確率密度を、図 8 に示すように各パラメータ値を与えることによって変化させることが可能となる。

図 9 (a) は実際に生成されたパルス列の例であるが、刺激呈示密度の高い太線の部分が、チャンネル間をわたって図中の左から右へと変化していることが分かる。たとえば、図 9 (b) および (c) に示すように、 β を変化させることでパルス信号の発生確率を変化させることが可能となる。

複数の被験者への呈示実験のための予備実験として、式 (1) 中の α を 0.1 で固定し、 m 、 σ 、 β およびパルス周波数を変化させて、1 名の成人男性に左から右へ移動するなぞり感覚を呈示した。なお、なぞり感覚を呈示するために、刺激発生確率が最も高い時刻を Ch.1, 2, 3 では m 、Ch.4, 5 では $2m$ 、Ch.6, 7, 8 では $3m$ とした。たとえば $m = 300$ とした場合、Ch.1, 2, 3 では 300 [msec]、Ch.4, 5 では 600 [msec]、Ch.6, 7, 8 では 900 [msec] となる。

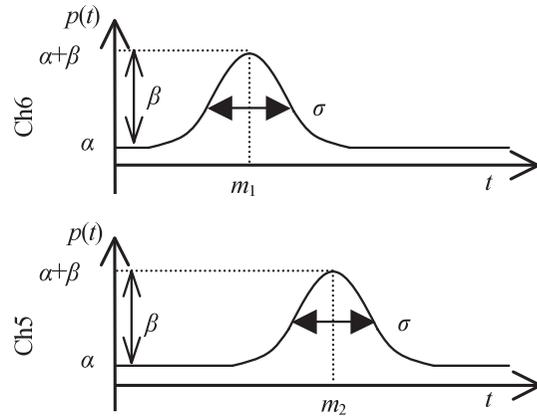
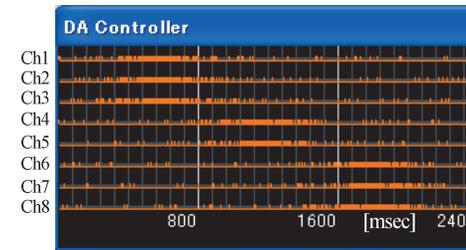


図 8 パルス発生確率密度分布
Fig. 8 Pulse signal probability density.

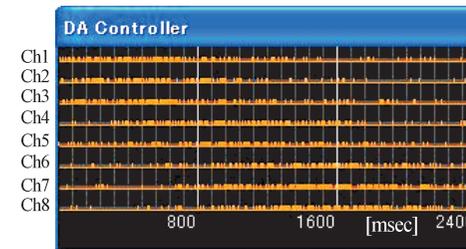
実験結果を表 1 に示す．表中の記号はそれぞれ， は明確になぞり方向を認識できる， は速度が速いもしくは遅いため，または刺激が弱いためにかろうじて認識できる， はなぞり感覚が途切れている， は凹凸感や波打っている感覚がある， x は仮現運動が生起されていないために識別できないことを表している．

入力信号のパルス周波数に注目すると，20 [Hz] ではほとんどの呈示刺激パターンにおいてなぞり感覚に途切れが生じている．50 [Hz] の場合， が多数あり，凹凸感や波打っている感覚といった，これまででない新しい触覚感覚を呈示できる可能性がある．また，他の周波数と比べて最も の数が多く，さらに x となるパラメータも少ないことから，多くの刺激条件においてなぞり感覚の安定した呈示が可能であることが分かる．

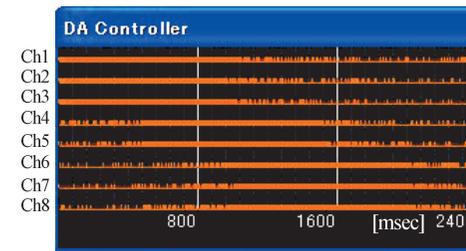
一方 100 [Hz] および 142 [Hz] では，50 [Hz] の際とは違った触覚感覚が知覚されるものの， や x が散見し，なぞり感覚の安定した呈示には不適であるといえる．これまでの著者らの実験で，パルス信号の周波数以外，すべての振動生成パラメータを同じとした刺激に対して，手握部で知覚される触覚感覚およびその強度が 100 [Hz] を境として変化することが分かっている⁸⁾．これは，100 [Hz] 以下の振動検出を行うマイスナー小体と，受容器の中では最も深部に位置して 100～300 [Hz] 程度の振動検出を行うパチニ小体で，刺激受容感度が異なることに起因していると考えている．本実験において与えたパラメータは振動刺激強度が不足し，皮膚深部に分布して 100 [Hz] 以上の振動を知覚する触覚受容器であるパチニ小体



(a) 生成されたパルス列の例
($\alpha=0.1, \beta=0.6, m=600, \sigma=200$)



(b) 信号の例 ($\alpha=0.1, \beta=0.4, m=500, \sigma=500$)



(c) 信号の例 ($\alpha=0.1, \beta=0.9, m=500, \sigma=500$)

図 9 確率密度関数による駆動信号生成の例
Fig. 9 Signals generated by probability density functions.

を，十分に刺激できていなかったことも考えられる．今後，触覚として知覚される強度を一定にするようなパラメータ設定条件を検討しながら，実験を行っていく必要があると考えている．

さらに本節の実験により，周波数によってなぞり感覚の呈示に適した β, m, σ の値がそれ

表 1 発生確率密度分布に基づいた刺激呈示実験結果
 Table 1 Experimental results of tactile stimuli presentation.
 (a) パルス周波数 20[Hz]

β		0.4			0.6			0.9		
σ	m	300	500	800	300	500	800	300	500	800
300		□	□	□	□	□	×	×	×	□
500		□	□	□	□	□	□	□	×	□
800		□	□	□	□	□	□	×	□	□

(b) パルス周波数 50[Hz]

β		0.4			0.6			0.9		
σ	m	300	500	800	300	500	800	300	500	800
300		◎	○	△	○	○	△	×	△	□
500		×	△	◎	△	◎	◎	△	△	△
800		△	△	△	△	△	△	△	△	△

(c) パルス周波数 100[Hz]

β		0.4			0.6			0.9		
σ	m	300	500	800	300	500	800	300	500	800
300		×	○	○	○	△	□	×	×	×
500		×	○	○	○	△	△	○	△	×
800		×	×	○	○	△	◎	×	△	○

(d) パルス周波数 142[Hz]

β		0.4			0.6			0.9		
σ	m	300	500	800	300	500	800	300	500	800
300		○	○	□	○	□	□	△	□	×
500		○	○	○	×	×	□	△	△	×
800		×	×	○	×	×	○	△	△	△

ぞれ異なることも分かった。このうち、最も広い範囲でなぞり感覚を呈示可能である 50 [Hz] の入力信号においては、 $\beta = 0.6$ の場合が最も識別しやすいなぞり感覚を呈示できている。また同周波数では、 m が大きくなると、凹凸感やなぞり感覚の途切れが起こるとともに、波打つ感覚が生じやすくなるのが分かる。これは、各チャンネルのパルスがオーバーラップしている時間が短くなり、AM の生起が途切れてしまうことが原因であると考えられる。

4. 触覚感覚呈示実験

4.1 発生確率密度制御による質感の呈示

最も多様な条件で安定してなぞり感覚の呈示が可能である、パルス周波数 50 [Hz] の刺激について、 β, m, σ の値を様々に変化させた際に知覚される触覚感覚を、被験者実験によって評価した。被験者は 3.1 節と同じ 10 名の男性とし、呈示した刺激についての感想を自由形式で回答させた。その結果、滑らかな質感や粘りのある質感、凹凸感などが生じられることが分かった。

そこで、文献 8) で述べた従来の刺激呈示手法、つまり発生確率密度を一定にしたもの(これを固定刺激と呼ぶ)と、本稿で提案した確率密度を変化させた刺激呈示手法を比較する実験を行った。

周波数 50 [Hz] のパルス信号によって、左から右 [(Ch.1, 2, 3) \Rightarrow (Ch.4, 5) \Rightarrow (Ch.6, 7, 8)] へ移動する刺激を、固定刺激および、3 パターンの確率密度変化に基づく手法により、3 名の成人男性に呈示した。固定刺激では、各チャンネルの刺激継続時間は 800 [msec]、各立上り位相差は 400 [msec] とした。確率密度変化に基づく手法では、刺激呈示のタイミングを前節式 (1) の発生確率密度 $p(t)$ をもとに決定することとし、式中の β の値は、前節の実験においてなぞり感覚がよく認識された $\beta = 0.6$ とした。

それぞれの項目について、5 を最大とする 1~5 の 5 段階で被験者に評価させた。刺激呈示時間は各 2,000 [msec] とし、被験者からの要望があれば、何度でも刺激を呈示可能とした。すべての刺激呈示終了後に、以下の項目についてアンケート調査を行った。

- A 滑らかな面を感じる
- B ザラツとした面を感じる
- C ポコポコした面を感じる
- D なぞりが途切れて感じる

なお、この評価項目は、前述の呈示実験で 10 名の被験者から得られた代表的な感想に基づいて選んだものである。

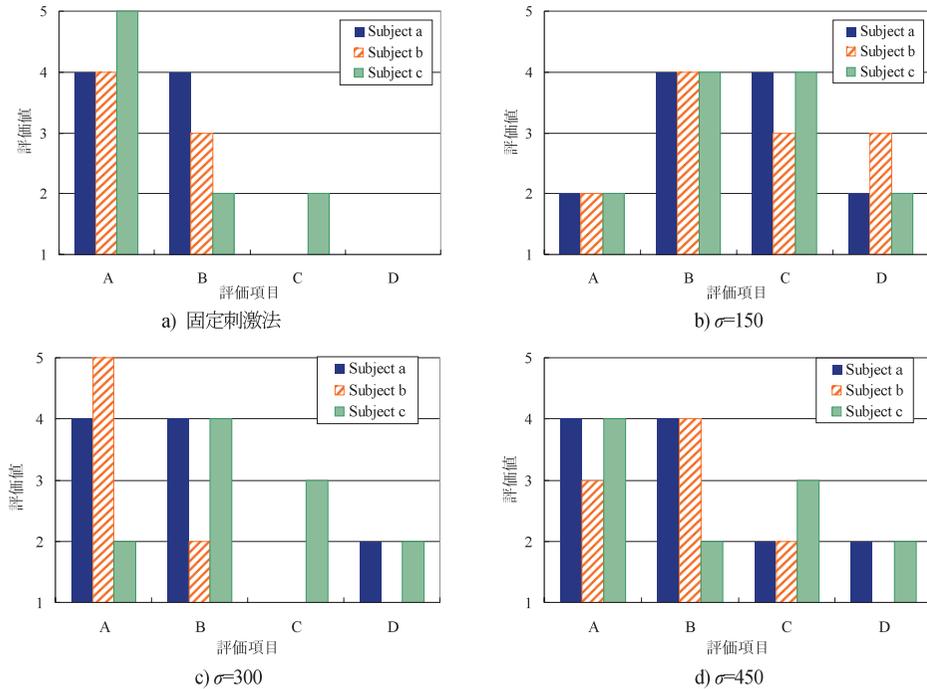
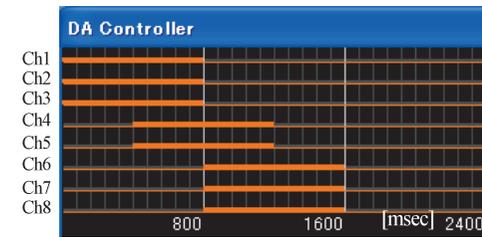


図 10 発生確率密度の分散が質感に与える影響
Fig. 10 Influence of σ in probability density on the tactile sensations.

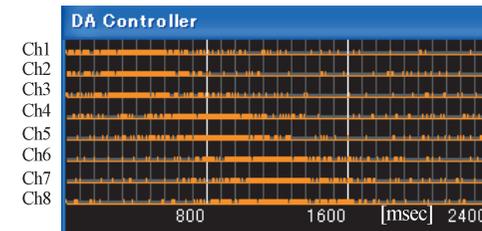
$m = 400$ とし, σ を 150, 300, 450 と変化させた場合の実験結果を図 10 に示す. $\sigma = 450$ において固定刺激手法と比較的相似した感覚が得られているが, それ以外では異なった感覚が生起されていることが分かる. 特に $\sigma = 150$ では, 滑らかではなくザラツとした触覚が知覚されている. 図 11 が示すように, 両入力信号における各チャンネルの刺激継続時間および, 立上り時間の異なる入力信号どうしの時間的オーバーラップの長さが似ているにもかかわらず, 異なった質感を呈示できる点が非常に興味深く, 新たな触覚呈示手段としての利用が期待できる.

4.2 なぞり方向識別実験

前節の実験の結果から, 物体をなぞった際に感じる触覚感覚や物体表面の質感の生起に適した入力条件が明らかになった. この入力条件において, 複数の被験者に対してテクスチャ



a) 固定刺激法における入力波形



b) 発生確率密度変化による入力波形 ($\sigma=150$)

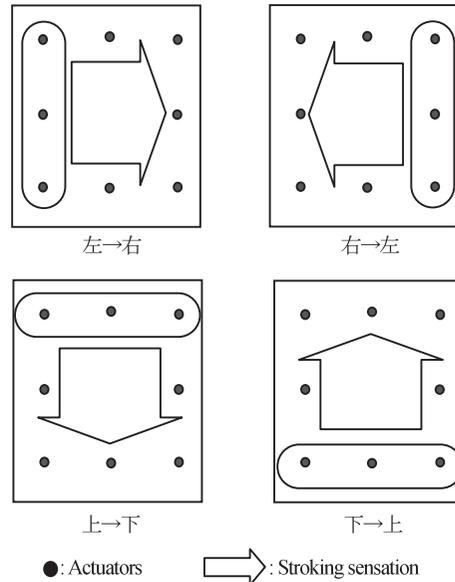
図 11 各手法における駆動波形の比較
Fig. 11 Comparison of driving signals.

のなぞり方向の識別実験を行った. 呈示するなぞり方向は図 12 に示すように,

- 左から右 [(Ch.1, 2, 3) \Rightarrow (Ch.4, 5) \Rightarrow (Ch.6, 7, 8)]
- 右から左 [(Ch.6, 7, 8) \Rightarrow (Ch.4, 5) \Rightarrow (Ch.1, 2, 3)]
- 上から下 [(Ch.1, 4, 6) \Rightarrow (Ch.2, 7) \Rightarrow (Ch.3, 5, 8)]
- 下から上 [(Ch.3, 5, 8) \Rightarrow (Ch.2, 7) \Rightarrow (Ch.1, 4, 6)]

の 4 種類とした. 式 (1) 中の β の値は 0.6 で固定とし, 分散 σ は 500 とした. なぞり感覚生成のために, 上記なぞり方向の同じ括弧内のチャンネルは同期して駆動させる必要があるため, 平均 m は同じ値を用いることになる. また, 各グループ間での m の値の差 (つまり刺激の移動を与えるための時間差) は 500 [msec] で一定とし, 初めに駆動するグループにおける m の値は 500 とした. また比較のために, 固定刺激法による方向呈示についても識別実験を行った.

事前に説明を受けた 22~24 歳の健常男性 3 名の利き手 (全員右手) に対し, 4 種類の方向のなぞり感覚をランダムに呈示して, その方向を回答させた. 呈示部位は図 7 と同様に



●: Actuators →: Stroking sensation
 図 12 なぞり感覚の方向
 Fig. 12 Directions of stroking sensation.

表 2 なぞり方向識別実験結果
 Table 2 Experimental result of direction presentation.

		右→左	左→右	上→下	下→上
認識 率[%]	固定	100	100	100	100
	確率	70.6	85.7	73.1	75.8

し、固定刺激と確率密度制御による手法それぞれについて、呈示回数は 1 名 30 回とした。実験結果を表 2 に示す。認識率は、固定刺激法ではすべてのなぞり方向呈示において 100%であったが、確率密度制御法では平均 76.3%となった。固定刺激法では明確になぞり方向を認識できる一方で、確率密度制御法の方が、より実際の物体の質感やテクスチャに近い感覚が得られるという意見がすべての被験者から得られた。またどの被験者も、右から左への移動刺激よりも、左から右への移動刺激の方が認識率が高いという、興味深い結果が得られた。この原因については、今後詳細に調べていく予定であるが、現在次のような仮説を

立てている。人が物体を右手で持ち上げる際には、親指を上側にして物体を把持する。物体が手から滑り落ちることを防ぐには、物体と掌との接触面の滑りを検出し、それに抗して把持力を調節する必要がある。つまり、親指から小指（左 → 右）に向かう方向の感度が体得的に高まったことが考えられる。この仮説に基づき、今後触覚感度の方向依存性について、詳細に調べていく予定である。

以上の実験により、アクチュエータの駆動パルス発生確率密度を各チャンネルで時間的に変化させることで、生じられるなぞり感覚の方向を制御可能であることが明らかになった。

5. おわりに

本稿では糸状に加工した形状記憶合金を利用した微小振動アクチュエータを用いて、ランダムな駆動信号による、物体のテクスチャ感覚の呈示および、触知動作感覚の呈示について述べた。

掌部の皮膚へランダムに微小振動刺激を与えることにより、粗い面の質感や凹凸感、何かが波打つような感覚といった様々な感覚が生じることが分かった。これをもとに、刺激の発生確率密度を様々に変化させて呈示したところ、多様な質感とともに刺激の移動方向を良好に知覚させられることが分かった。さらに、従来手法である固定刺激と、発生確率密度制御による刺激呈示を比較する実験を行った結果、刺激継続時間やオーバーラップ時間が類似しているにもかかわらず、確率密度の変化によって、異なった質感を呈示可能であることが明らかになった。また、チャンネルごとに刺激発生確率密度を時間的に変化させることにより、なぞり感覚の呈示と物体表面のテクスチャの方向の制御が可能であることも分かった。

以上の結果から、人間は物理刺激自体の変化ばかりでなく、「刺激の頻度」の変化も感知し、これによりなぞり感覚が生じることが示唆された。また本触覚ディスプレイで、アクチュエータの駆動信号を任意に変化させることにより、異なった質感のなぞり感覚の生起が確認されており、本デバイスをより複雑な触覚感覚や触覚情報の呈示や、人間の触覚知覚機構解明の研究にも応用できると考えられる。

今後は、刺激発生確率密度および駆動パラメータを様々に変化させることにより、どのような触覚感覚の呈示が可能かをより詳細に調べ、本触覚ディスプレイの触覚呈示能力を明らかにしていく。また、実験の結果と、触覚受容器の分布や応答特性、および認知心理学の観点と照らし合わせることで、呈示刺激と人間の触覚知覚機構の関係を調査していく。

参 考 文 献

1) 岩村吉晃：タッチ<神経心理学コレクション>，医学書院(2001).

- 2) 大西 昇：生体情報処理，昭光堂 (2001).
- 3) 内田雅文，田中久弥，井出英人，横山修一：単一の PZT 振動子を用いた 16 種類の変調波振動による触覚ディスプレイ，電気学会論文誌 C，Vol.120-C, No.6, pp.825-830 (2000).
- 4) 毛塚修一，野澤昭雄，内田雅文，井出英人：変調振動を用いた触覚ディスプレイの図形提示方法に関する基礎検討，電気学会論文誌 C，Vol.124-C, No.9, pp.1916-1917 (2004).
- 5) Makino, Y., Asamura, N. and Shinoda, H.: A Whole Palm Tactile Display Using Suction Pressure, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1524-1529 (2004).
- 6) Yamamoto, A., Ishii, T. and Higuchi, T.: Electrostatic tactile display for presenting surface roughness sensation, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2003)*, pp.680-684 (2003).
- 7) Web ページ「触覚伝達機器の設計支援情報」.
<http://www.tsukuba-tech.ac.jp/info/kenkyu/kaken/home.html>
- 8) 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).
- 9) Alles, D.S.: Information Transmission by Phantom Sensations, *IEEE Trans. Man-machine Systems*, Vol.MMS-11, Vol.1, pp.85-91 (1970).
- 10) Bekesy, G.V.: Sensation on the Skin Similar to Directional Hearing, Beats, and Harmonics of the Ear, *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol.29, No.4, pp.489-501 (1957).
- 11) 澤田秀之，水上陽介，福山恵士，内田啓治，金子 真：形状記憶合金系を利用した微小振動アクチュエータとその特性解析，第 8 回 (社)計測自動制御学会システムインテグレーション部門 SI2007 講演会論文集，pp.67-68 (2007).
- 12) Mizukami, Y., Uchida, K. and Sawada, H.: Transmission of Stroking Sensation on a Skin by Higher-psychological Perception, *SICE Annual Conference*, pp.1873-1876 (2007).

(平成 20 年 3 月 24 日受付)

(平成 20 年 9 月 10 日採録)

推薦文

形状記憶合金の糸を振動アクチュエータとして利用した新しい触覚ディスプレイを提案し，またこれをパルス密度変調信号によって駆動することにより，面のテクスチャや，物体をなぞった際の様々な触覚感覚を呈示できることを示した点で，新規性と有用性に優れている．本稿の元となったシンポジウム論文は，インタラクション 2008 シンポジウムにおいて評価が特に高く，論文誌への推薦が強く期待されたものである．

(インタラクション 2008 シンポジウムプログラム委員長 井上智雄)



水上 陽介 (学生会員)

1982 年生．2006 年香川大学工学部知能機械システム工学科卒業．2008 年同大学大学院工学研究科知能機械システム工学専攻前期課程修了．同年 4 月より本田技研工業株式会社に勤務．同 10 月より株式会社本田技術研究所に在籍．ヒューマンインタフェース，特に触覚呈示デバイスの研究，開発に従事．ヒューマンインタフェース学会，IEEE 各会員．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受賞．



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，香川大学工学部准教授．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．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．