

# 微小振動子を用いた触覚ディスプレイと 駆動信号の発生確率密度制御による触覚感覚の呈示

水上 陽介 澤田 秀之

香川大学 工学部 知能機械システム工学科  
sawada@eng.kagawa-u.ac.jp

**あらまし** 形状記憶合金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と、パルス信号によるアクチュエータの駆動手法および、パルスの発生確率密度制御による触覚感覚の呈示について述べる。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、これまでに微小振動を発生する小型アクチュエータと、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、複数個のアクチュエータを面状に配置することにより、触覚呈示デバイスの構築を進めている。本アクチュエータは、パルス信号を与えることにより、パルス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わかった。さらに、ランダム信号の発生確率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 micro-vibrators and its presentation of tactile sensation by the control of signal probability density

Yohsuke Mizukami and Hideyuki Sawada

Faculty of Engineering, Kagawa University

**Abstract** The paper introduces the development of a compact tactile display using the characteristics of micro-vibrations, and describes the tactile information transmission by the control of signal probability density given to vibration actuators for the generation of touch feelings such as texture information of objects and a rubbing sensation. The authors have paid attention to the characteristics of a shape-memory alloy formed into a thread, and have so far developed a thin tactile display by driving each actuator with pulse current for generating vibrations. In this study, we found noble tactile sensations appeared by driving actuators with randomly generated pulse signals. This paper describes the presentation of stroking sensations 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、視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も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幾つか存在する<sup>[1]-[6]</sup>が、良好な成果が得られているとは言い難い。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、未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元に知覚される。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未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<sup>[7]</sup>。例えば、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達を行なうものや、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、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じら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に成功した<sup>[8]</sup>。

本稿では、まず微少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、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の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なぞり感覚の呈示をおこなう手法について述べ

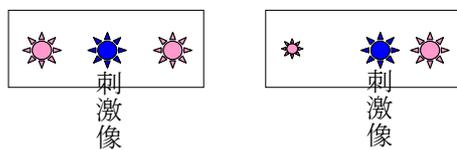


図1 ファントムセンセーション

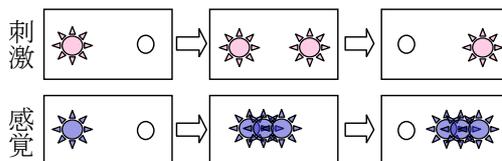


図2 仮現運動

る。触覚ディスプレイの各チャンネルの素子をランダム発生パルスにより駆動させたところ、定常的なパルス信号による駆動では得ることのできない、新しい触覚感覚が生起されることを発見した。さらに、ランダム信号の生起確率密度をチャンネル毎に時間的に変化させることにより、なぞり感覚の方向を任意に制御できることを明らかにした。本刺激呈示手法により、より複雑な触覚感覚および触覚情報の呈示や、人間の触覚知覚機構の調査にも応用できると考えている。

## 2. 微少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)<sup>[9]</sup>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)<sup>[10]</sup>は、皮膚上の2点を、立上り位相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、これを呈示部に応用した小型振動アクチュエータを製作した<sup>[8]</sup>。本アクチュエータの構造と寸法を図3に示すが、直径  $50\mu\text{m}$ 、長さ  $3\text{mm}$ の糸状形状記憶合金を用いている。本アクチュエータは電流によって加熱され、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<sup>[11]</sup>。また、放熱により温度が下がると元の長

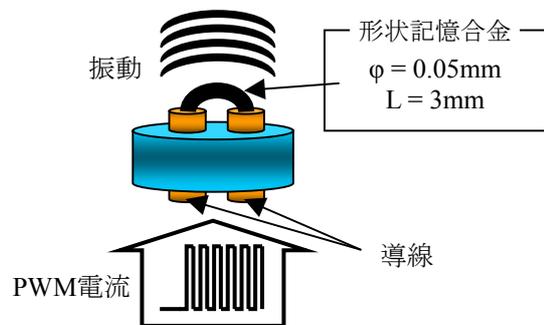


図3 振動アクチュエータの構造

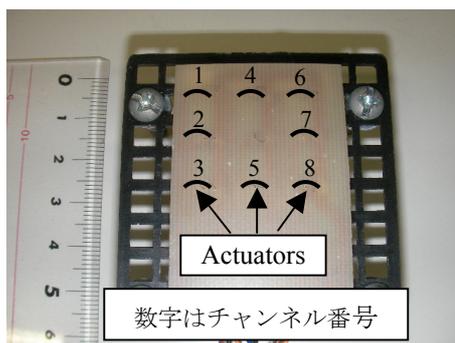


図4 触覚ディスプレイ

さに戻る。筆者らはこの性質に着目し、パルス電流を入力することによって、微少な振動を起こすアクチュエータとして利用することに成功した。

このアクチュエータを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、書き順付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<sup>[12]</sup>。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、触覚感覚の呈示をおこなう。

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、反転増幅アンプ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。触覚ディスプレイの各アクチュエータ素子が、パルス周波数に同期して微少振動を起こし、触覚情報の呈示が可能となる。その際、形状記憶合金の発熱が考えられるが、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短時間であることを考慮すると、使用者が熱さを感じることはない。

## 3. 触覚情報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、素子間で線状のなぞり感覚の呈示や、書き順付き文字の呈示をおこなうことが可能であることを示した。次に我々は、各アクチュエータの駆動パルス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少振動させるための電流パルスの Duty 比を 1:20 で固定し、8000[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おこなった。

まず、各アクチュエータのパルス発生回数として、任意の  $2n$  個の数値を、0 から 8000 の範囲で乱数によって発生させる。発生した数値を小さいものから 2 個ずつの組としてまとめ、パルス信号の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おこない、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る。本手法によって生成されたランダムパルス信号の例を図5に示すが、図中の太線がパルス ON 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6に示すとおり、掌の中央部とした。被験者の感想から、以下のことがわかった。

- ・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。

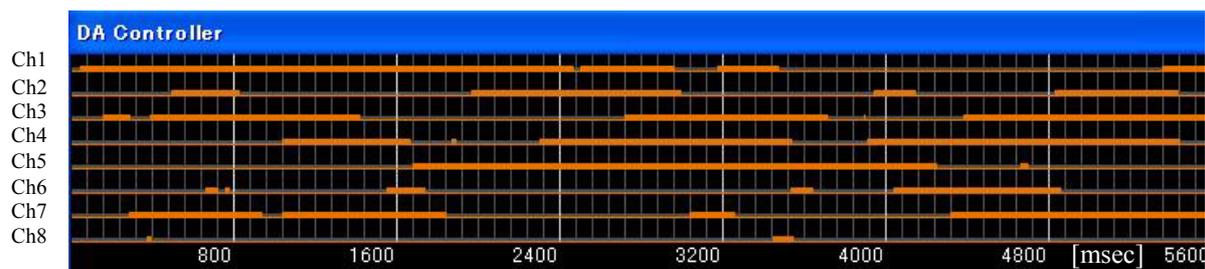


図5 ランダムパルス発生信号の例



図6 刺激呈示部位

- 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、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、凹凸感を感じる。

このように、様々な触覚感覚が呈示されることが明らかになったが、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、複数の AM や PS が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。

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、 $\sigma$  は分散、 $\alpha$  はオフセットを、 $\beta$  はゲインを表す。各チャンネルのパルス発生確率密度は図7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8(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、チャンネル間を渡って図中の左から右へと変化していることがわかる。例えば、図8(b)および(c)に示すように、 $\beta$  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。

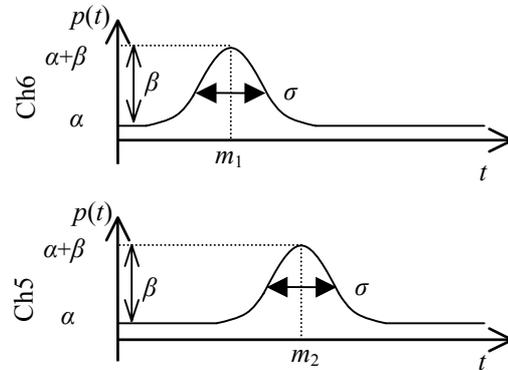
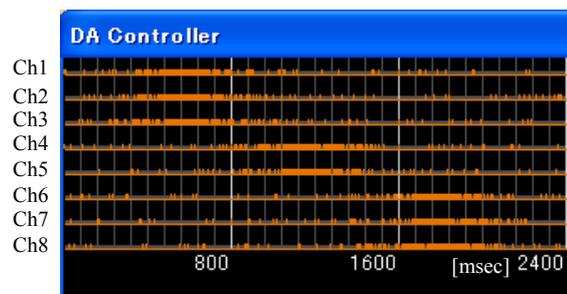
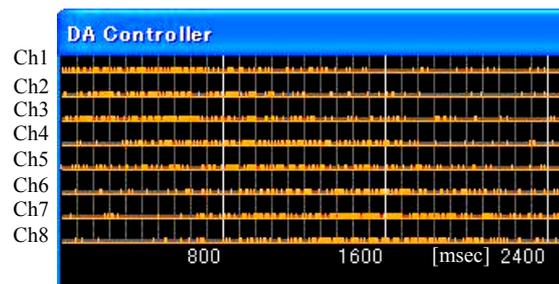


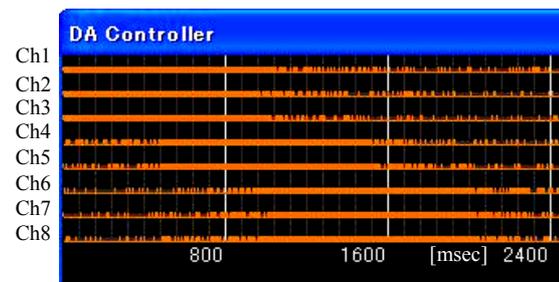
図7 パルス発生確率密度分布



(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8 確率密度関数による駆動信号生成の例

複数の被験者への呈示実験のための予備実験として、(1)式中の $\alpha$ を0.1で固定し、 $m$ 、 $\sigma$ 、 $\beta$ 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。例えば $m=300$ 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。

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、×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あらわしている。

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、これまでにない新しい触覚情報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×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わかる。一方100[Hz]および142[Hz]では、○や×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。ただしこれは、本条件下で与えたパラメータによる振動刺激強度が不十分であったため、皮膚深部に分布し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を、十分に刺激できていなかったためと考えている。

表1 発生確率密度分布にもとづいた刺激呈示実験結果

(a) パルス周波数 20[Hz]

$\beta$		0.4			0.6			0.9		
$\sigma$	$m$	300	500	800	300	500	800	300	500	800
300	300	□	□	□	□	□	×	×	×	□
500	300	□	□	□	□	□	□	□	×	□
800	300	□	□	□	□	□	□	×	□	□

(b) パルス周波数 50[Hz]

$\beta$		0.4			0.6			0.9		
$\sigma$	$m$	300	500	800	300	500	800	300	500	800
300	300	◎	○	△	○	○	△	×	△	□
500	300	×	△	◎	△	◎	◎	△	△	△
800	300	△	△	△	△	△	△	△	△	△

(c) パルス周波数 100[Hz]

$\beta$		0.4			0.6			0.9		
$\sigma$	$m$	300	500	800	300	500	800	300	500	800
300	300	×	○	○	○	△	□	×	×	×
500	300	×	○	○	○	△	△	○	△	×
800	300	×	×	○	○	△	◎	×	△	○

(d) パルス周波数 142[Hz]

$\beta$		0.4			0.6			0.9		
$\sigma$	$m$	300	500	800	300	500	800	300	500	800
300	300	○	○	□	○	□	□	△	□	×
500	300	○	○	○	×	×	□	△	△	×
800	300	×	×	○	×	×	○	△	△	△

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 $\beta$ 、 $m$ 、 $\sigma$ の値がそれぞれ異なることもわかった。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共に、波打つ感覚が生起されやすくなることがわかる。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

最も多様な条件でなぞり感覚の呈示が可能であると考えられるパルス周波数50[Hz]の刺激について、 $\beta$ 、 $m$ 、 $\sigma$ の値をさまざまに変化させて触覚呈示実験をおこなった。被験者は3.1節と同じ10名の成人男性とし、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、凹凸感などが生起されることがわかった。

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、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⇒(Ch.4,5)⇒(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もとづく手法により、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(1)式の発生確率密度 $p(t)$ をもとに決定することとし、式中の $\beta$ 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2000[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。全ての刺激呈示

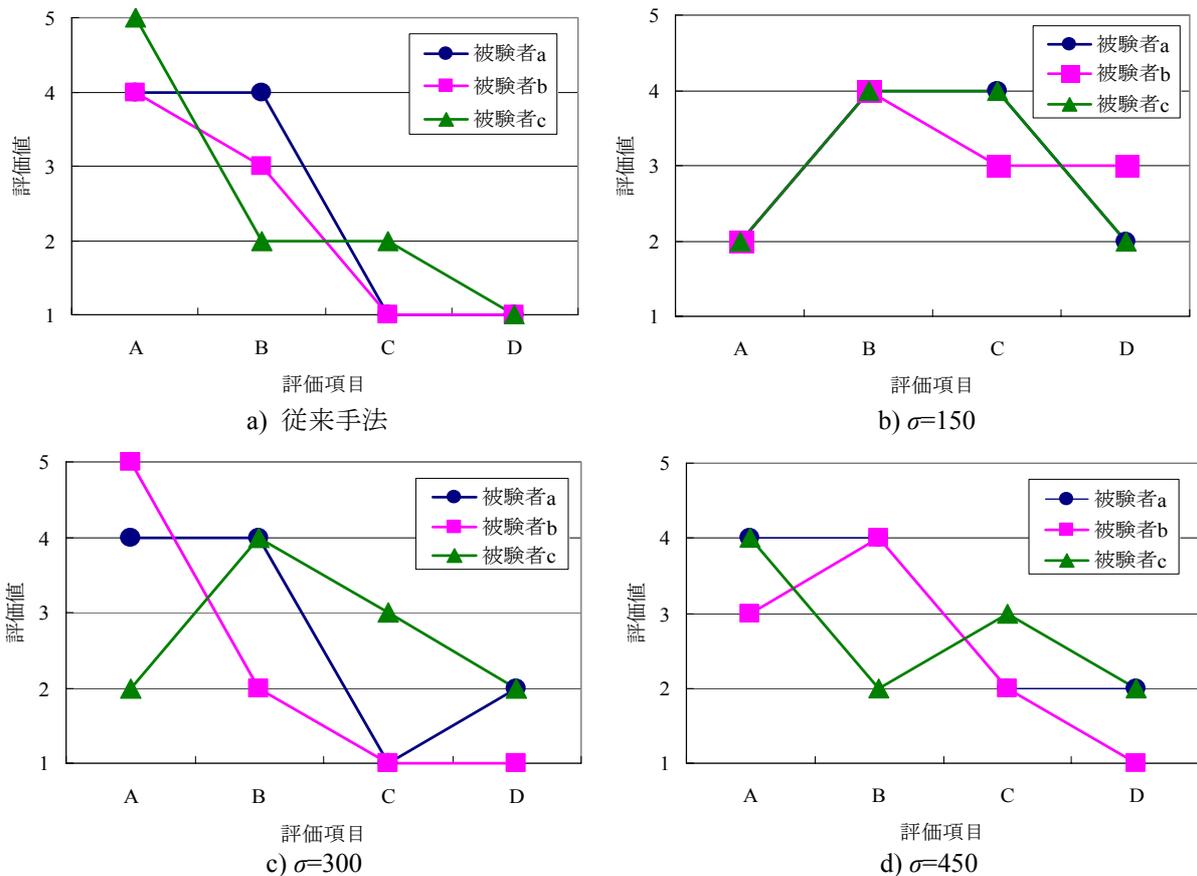


図9 発生確率密度の分散が質感に与える影響

終了後に、以下の項目についてアンケート調査を行なった。

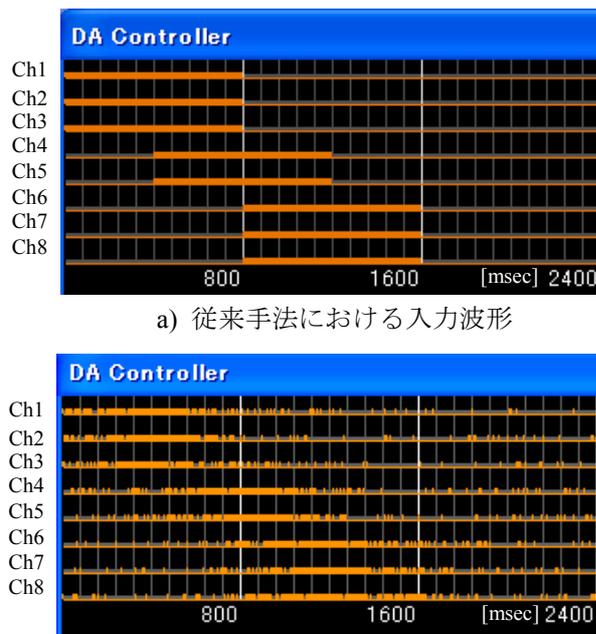
- A) 滑らかな面を感じる
- B) ザラツとした面を感じる
- C) ボコボコした面を感じる
- D) なぞりが途切れて感じる

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もとづいて選んだものである。

$m=400$  とし、 $\sigma$  を 150, 300, 450 と変化させた場合の実験結果を図 9 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わかる。特に  $\sigma=150$  では、滑らかではなくザラツとした触感が知覚されている。図 10 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同士の時間的オーバーラップの長さが似ているにも関わらず、異なった質感を呈示できる点が非常に興味深く、新たな触感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、なぞり感覚の生起に適した入力条件が明らかになったので、この入力条件において、筆者らが従来手法で実施した実験<sup>[12]</sup>と同様に、複数の被験者に対してテクスチャ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 11 に示すように、



b) 発生確率密度変化による入力波形 ( $\sigma=150$ )

図 10 各手法における入力波形の比較

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

の 4 種類とした。(1)式中の  $\beta$  の値は 0.6 で固定とし、分散  $\sigma$  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。

事前に説明を受けた 22~24 歳の健常男性 3 名に対し、4 種類の方向のなぞり感覚をランダムに呈示して、その方向を識別させる実験をおこなった。呈示部位は図 6 と同様にし、呈示回数是一人 30 回とした。

実験結果を図 12 に示す。なぞり方向別の認識率は右→左：70.6%、左→右：85.7%、上→下：73.1%、下→上：75.8%で、平均認識率は 76.3% となった。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。本実験により、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、生起さ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。

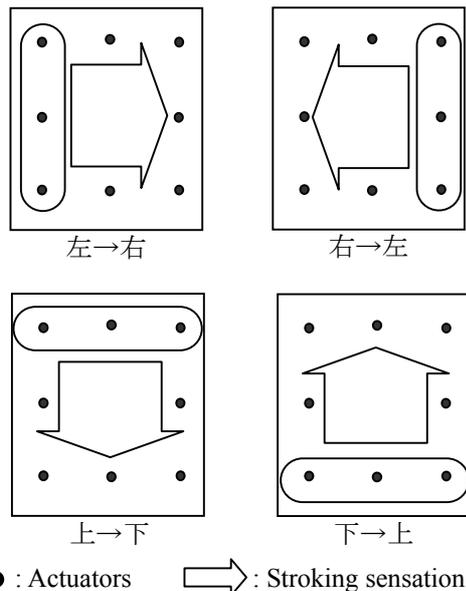


図 11 なぞり感覚の方向

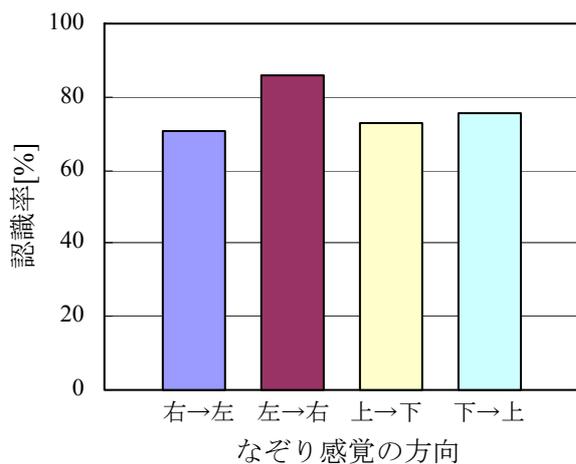


図 12 なぞり方向識別実験結果

### 5. まとめ

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起されることがわかった。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、多様な質感と共に刺激の移動方向を良好に知覚させることがわかった。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なった結果、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関わらず、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わかった。

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起され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により、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] Yasutoshi Makino, Naoya Asamura and Hiroyuki Shinoda: "A Whole Palm Tactile Display Using Suction Pressure", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1524-1529 (2004)
- [6] Yamamoto, Ishii, Higuchi: 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] D. S. Alles: "Information Transmission by Phantom Sensations", IEEE Transactions on Man-machine Systems, Vol. MMS-11, Vol. 1, pp. 85-91 (1970)
- [10] G. v. Békésy: "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: 形状記憶合金糸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] Yohsuke Mizukami, Keiji Uchida and Hideyuki Sawada: Transmission of Stroking Sensation on a Skin by Higher-psychological Perception, SICE Annual Conference, pp. 1873-1876 (2007)