

## 推薦論文

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水 上 陽 介<sup>†</sup> 内 田 啓 治<sup>††</sup> 澤 田 秀 之<sup>†</sup>

形状記憶合金を利用した薄型触覚呈示デバイスの構築と、触覚の高次知覚であるファントムセンセーション(PS)および仮現運動(AM)による触覚情報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、これを呈示部に応用した小型振動アクチュエータを作成した。本アクチュエータは、振動呈示部が2mm程度であり、これを周期信号により駆動させることにより、1~300Hzという広い周波数範囲で明確な振動刺激の呈示が可能であることが分かった。また複数個のアクチュエータを面状に配置して、触覚呈示デバイスとして利用することにより、触覚の高次知覚であるPSおよびAMの生成が可能であることを確認した。振動強度や呈示周波数の変化など、様々な条件下で触覚感度の評価を行い、2個の刺激子間の任意の位置への触覚感度の呈示や、なぞるような触覚感度の呈示が可能となることを明らかにした。また被験者による触覚情報呈示実験を行った結果、触覚感度の認識や弁別が十分に可能であり、薄型触覚呈示デバイスとして新たな情報呈示手段になりうると考えている。

Tactile Transmission by Higher-level Perception  
Using Vibration of Shape Memory Alloy ThreadYOSUKE MIZUKAMI,<sup>†</sup> KEIJI UCHIDA<sup>††</sup> and HIDEYUKI SAWADA<sup>†</sup>

The paper introduces the development of a tactile device using a shape-memory alloy, and describes the information transmission by the higher-level perception such as the phantom sensation and the apparent movement of the tactility. The authors paid attention to the characteristic of a shape-memory alloy formed into a thread, which changes its length according to its temperature, and developed a vibration-generating actuator electrically driven by periodic signals generated by current control circuits, for the tactile information transmission. By coupling the devices as a pair, an information transmission system was constructed for presenting the phantom sensation and the apparent movement of the tactility, to transmit quite novel sensation to a user. The information transmission by the device was tested by subjects, and was evaluated by questionnaires. The apparent movement was especially well perceived by users as a sensation of something running across fingers or as being tapped by something, according to the well-determined signals given to the devices. Several users reported that they perceived a novel rubbing sensation given by the apparent movement, and we further experimented the presentation of the sensation in detail to be used as a tactile display for the information transmission.

## 1. はじめに

人間同士のコミュニケーションにおいては、言語に加えて視覚、聴覚、触覚といった五感が有効に活用されている。特に対面対話においてはジェスチャやスキンシップが、また対象物を用いた会話や議論において

は、触覚や力覚などの、身体や動作をもとにしたコミュニケーション手段が大きな意味を持つことが少なくない。このようにコミュニケーションとは、身体や感覚を通じた情報のやりとりであるということができ、これを計算機を利用して支援、活性化しようとする多くの提案がなされている。

現在、視覚や聴覚情報の呈示、あるいはこれらの情

<sup>†</sup> 香川大学工学部

Faculty of Engineering, Kagawa University

<sup>††</sup> 株式会社エスシーエー

SCA

本論文の内容は2007年3月のシンポジウム「インタラクシオン2007」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。

報を実世界の対象物と融合して呈示しようとする提案が多くみられる．その一方で、触覚や力覚を直接、身体部位に感覚として呈示しようとするものもいくつかの試みがみられるが<sup>(1)~(6)</sup>、これまでに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利用する研究も進められているが、相手や対象物の存在感を、触覚や力覚として感じることができるコミュニケーションの実現には、いまだ課題も多い．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、自分自身の皮膚の変形や熱伝導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の知覚には、皮膚の変形ばかりでなく、手を能動的になぞるといった機械的運動が不可欠である．このような人間の能動的センシングに着目した触覚呈示装置の提案や、触覚感覚の情報処理機構の解明に関しては、いまだ有効な成果は得られていない．

一方、視覚障害者のための情報呈示装置では、いくつかの触覚を利用したものが実用化されている<sup>(7)</sup>．たとえば、アレイ状に並べたソレノイドや圧電素子によって振動を生成し、文字や図形パターンの伝達を行うものや、電極を使用し、電流によって情報を伝達するもの、ピンを段階的に上下することによって表面形状を形成して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、静的なパターン呈示を前提として設計されており、動的な触覚情報や「なぞり」といったような触知感覚の呈示は困難である．また、呈示部のアクチュエータおよびその駆動装置の物理的構造の制限により、小型化や、省電力化への課題が多く、携帯型の触覚情報呈示に適しているとはいえない．

本稿では、形状記憶合金を利用した触覚呈示デバイスの開発と、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による情報呈示手法について述べる．糸状に加工した形状記憶合金が温度により伸縮することを利用し、これを呈示部に応用した小型振動アクチュエータを作成した．これを複数個組み合わせることで触覚呈示デバイスとして利用することにより、従来の触覚呈示装置では困難であった、薄型省電力化が可能となる．また触覚の高次知覚を利用して、少数の刺激子による任意位置への情報呈示や、なぞる、こする、叩くといった、動的な触覚感覚の情報呈示が可能であることも実験によって明らかにし、新しい情報呈示手法の可能性について述べる．

## 2. 触覚受容器

ヒトの皮下には4種類の触覚受容器が存在し、これ

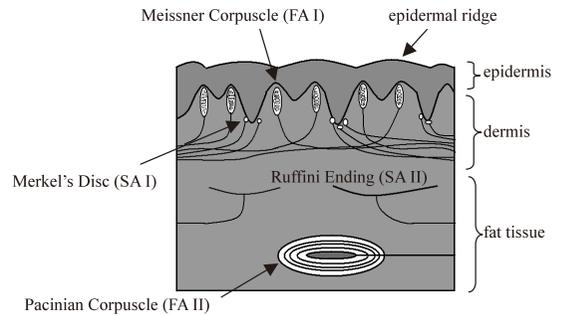


図1 無毛部の触覚受容器

Fig. 1 Tactile receptors under skin.

により“触覚”とよばれる皮膚感覚が知覚される．無毛部皮膚下の触覚受容器の分布の様子を図1に示すが、順応速度と受容野の大きさによって、順応の速いFA型、遅いSA型、受容野の狭いI型、広いII型に分類される．速順応型 (Fast Adapting: FA) は刺激の始めと終りにのみ反応し、遅順応型 (Slowly Adapting: SA) は刺激が継続している間ほぼ持続して反応する．I型は受容器の境界が鮮明であり、大きさは2~4mm程度、II型は境界が不鮮明である．また、I型ユニットは、指先において、手掌部分の数倍の分布を持つことが知られている．このことが、指先が点字や表面形状の認識に適している理由であると考えられる．受容器を上述の型で分類すると、メルケル細胞はSA I、マイスナ小体はFA I、ルフィニ終末はSA II、パチニ小体はFA IIに対応すると考えられている<sup>(8)</sup>．

以下に受容器の特徴を述べる．メルケル細胞は、末端が円盤状になっており、分化した表皮の上皮細胞に接触している．掌や足底の表皮の深層に多く見られ、圧検出を行う．マイスナ小体は、長さ約80~150 $\mu\text{m}$ 、幅約30 $\mu\text{m}$ の円柱状の受容器であり、長軸の方向が皮膚表面に直角に並んでいる．手指や足指の先に特に多く見られ、50 Hz以下の振動検出を行っており、エッジの鋭さや点字などの検出に優れている．ルフィニ終末は、長さ1~2mm、幅0.1mm程度の大きさであるが、軸索が多方向に分岐しており、明確な形を判別しにくい．真皮深層や皮下組織、関節節に多く見られ、局所的な圧迫や、皮膚の引っ張りに応答する．パチニ小体は、直径0.5~2mm、長さ1~4mmの楕円体で、扁平な細胞が同心円状に層を構成している．受容器の中では最も深部に位置し、50~300 Hz程度の振動検出を行っている．

以上の受容器の特徴を考慮し、機械的刺激を各受容器が応答しやすい条件で皮膚表面に与えることにより、様々な触覚や触覚情報を生成することが可能であると考えられる．

### 3. 振動アクチュエータと触覚呈示システム

#### 3.1 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(これを刺激像とよぶ)があるように感じる現象である(図2)。刺激像の出現位置は主に、2刺激の強度差に依存する。これまでに触覚のPSは、義手装着者への関節角度の呈示や、聴覚障害者への音源方向の呈示に利用された報告がある<sup>3)</sup>。

一方の触覚の仮現運動 (Apparent Movement: AM)<sup>10)</sup>は、皮膚上の2点を、立ち上が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3)。AMはこれまでに、特に視覚においてその機構の解明と応用が進んでおり、たとえば電光掲示板の動く文字表示などに利用されている。

これら触覚の高次知覚を利用した情報呈示手段が実現できれば、少数の刺激点により、任意の点への触覚情報の呈示や、これまで困難であった動的な触覚感覚の呈示が可能になると考えられる。

#### 3.2 小型振動アクチュエータ

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<sup>11)</sup>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>12)</sup>。本アクチュエータの構造と寸法を、図4に示す。

このアクチュエータは、2本の導線を絶縁パイプでまとめ、その先端に、直径50 $\mu$ mの糸状に加工した形状記憶合金を、アーチ状に曲げて取り付けている。先端に取り付けた形状記憶合金の長さは3mmとして

おり、身体の1~2mm程度の微小部位に、刺激の呈示が可能である。

ここで使用した形状記憶合金の熱伸縮特性を、図5に示す。長さ3mmの糸状形状記憶合金の抵抗値は2 $\Omega$ 程度であり、これに微弱電流を流すと即座に加熱される。温度が $T_2$ に達すると、全体長の7%程度の収縮をおこす。電流印可をやめると加熱が止まり、熱が拡散されて自然冷却される。温度が $T_1$ 以下になると元の長さに戻る。我々はこの性質に着目し、周期的な微弱パルス電流を用いて、振動を発生できると考えた。つまり、パルス信号の山の部分で形状記憶合金の収縮がおこり、谷の部分で冷却されて元の長さに戻ることにより、これを繰り返して振動が発生することになる。

まず形状記憶合金の振動生成実験を行った。ここで用いたパルス入力信号の概形を、図6に示す。図5に示す形状記憶合金の持つヒステリシスにより伸縮がおこるため、ここで交換される熱量を考慮してパルス信号の波高値 $H$ および、パルスのデューティ比 $W/L$ を決める必要がある。また同時に、形状記憶合金を最も効率良く伸縮させるためには、導体の温度を $T_1$ と $T_2$ の間に保つ必要がある。 $H = 0.5[V]$ 、 $W : L = 1 : 20$

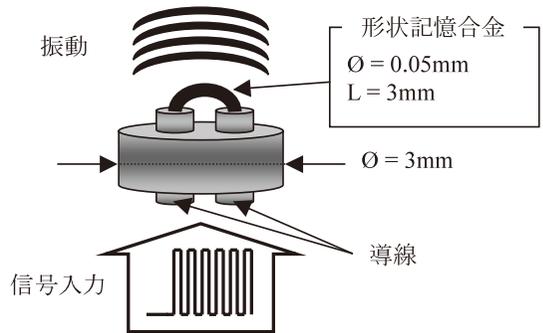


図4 振動アクチュエータの構造  
Fig.4 Structure of vibration actuator.

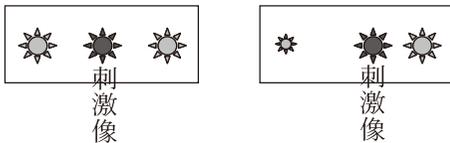


図2 PS説明図  
Fig.2 Phantom sensation (PS).

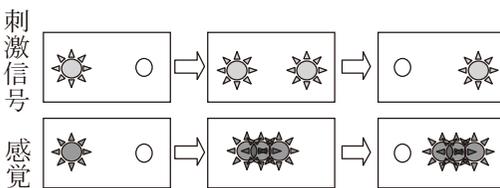


図3 AM説明図  
Fig.3 Apparent movement (AM).

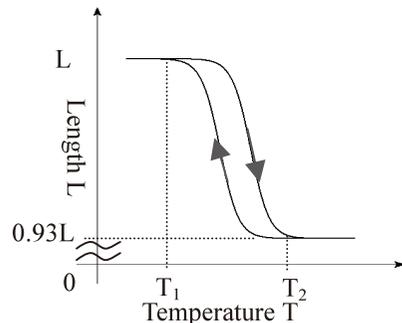


図5 形状記憶合金の熱伸縮特性  
Fig.5 Temperature characteristics of shape memory alloy thread.

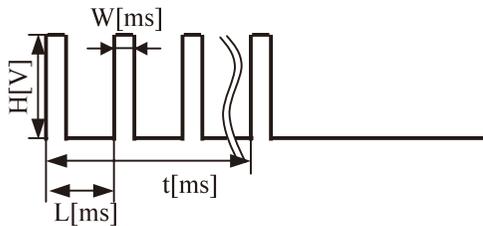


図 6 パルス入力信号  
Fig. 6 Pulse signal input.

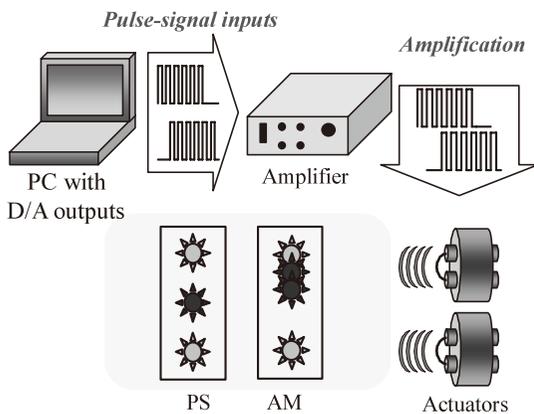


図 7 触覚情報呈示システムの構成  
Fig. 7 Tactile information transmission system.

程度のパルス信号を用いて、パルス周波数を変化させながら振動生成実験を行った結果、1~300 [Hz] の周波数範囲で触知が可能な振動が発生することが分かった。

また、上記の条件で連続駆動させる試験を行ったところ、2カ月(1,440時間)経過した時点でも同じ強度の刺激を呈示できていることを確認した。1回の情報呈示のために駆動させる時間が最長でも30秒程度であり、1日に2時間使用しても2年間の使用に耐えうると考えられる。

### 3.3 触覚呈示システム

本研究で構築した触覚情報呈示システムの構成図を図7に、実験装置の概観を図8に示す。このシステムは、形状記憶合金を用いた小型振動アクチュエータを2個用いて、PSとAMを発生させる。

まず、計算機により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。パルス周波数に同期して2つの振動アクチュエータが振動し、PSとAMを発生させて、動的な触覚情報の呈示を行う。

本研究で用いたSMAは $T_1 = 68^\circ\text{C}$ 、 $T_2 = 72^\circ\text{C}$ であるが、素子の長さが3mm、直径が $50\ \mu\text{m}$ と細く、パルス電流によって加熱される時間も短時間であるた

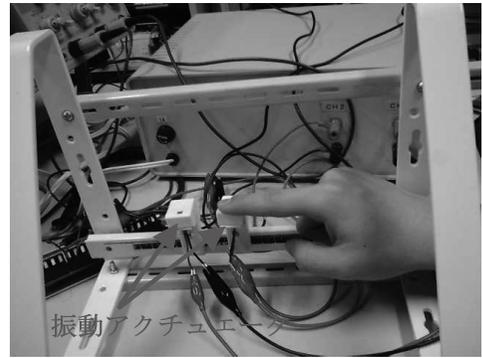


図 8 実験装置  
Fig. 8 Experimental system.

め、灼熱感が発生することはない。

## 4. 振動アクチュエータによる触覚呈示実験

### 4.1 予備実験

触覚の高次知覚であるPSとAMの認識、弁別実験を行う前に、まず呈示条件を決定するための予備実験を行った。呈示信号生成パラメータと触覚感度の関係を調べるため、以下の3つの項目について感度評価実験を行った。

- 身体の呈示部位と周波数、振動強度
- PSにおける呈示部位と周波数、振動強度
- AMにおける呈示部位と立ち上がり位相差

人の触覚受容ユニットは4種類存在し、そのうちマイスナ小体とパチニ小体が振動刺激に応答する。マイスナ小体は50Hz程度までの比較的低い周波数に、またパチニ小体は50~300Hz程度までの高い周波数の振動に反応することが知られている<sup>1)</sup>。また皮下の受容器分布も異なっているため、同一の振動刺激でも身体の呈示部位によって感覚として知覚される強度が異なる。逆にまったく違う刺激信号を与えても、異なる部位において似たような感覚として感知される場合もある。さらに、同一刺激を与えても、被験者によって違った触覚感覚として感知される場合があることも分かっている。

これらの違いを統一的に扱うため、本研究では、標準的な触覚感覚を持つ1名の被験者において、感覚強度を1~10の10段階で数値化して表すこととした。最も強く感じる強度を10、刺激を感じることで最も小さな強度を1とする、絶対評価とした。

予備実験a)では、1つのアクチュエータを振動させ、利き手の各指と掌、合計23カ所の部位(図9参照)に刺激を呈示した。パルス周波数1, 3, 5, 10, 30, 50, 100, 200, 300 [Hz] に対し、波高値を各周波

表 1 呈示部位，周波数，波高値の違いによる触覚感度の評価

Table 1 Results of tactile sensation by the difference of location, frequency and voltage.

周波数[Hz]		5			50			200		
		0.39	0.46	0.61	0.55	0.61	0.70	0.65	0.70	0.82
親指	(1)	2	3	7	3	3	4	0	1	2
	(2)	1	3	5	2	2	3	0	2	4
人差し指	(1)	4	5	8	4	5	7	1	2	2
	(2)	1	3	5	2	2	4	0	1	3
	(3)	2	4	7	2	3	5	1	3	4
中指	(1)	3	4	8	2	3	4	0	0	1
	(2)	1	2	6	2	1	3	1	2	2
	(3)	2	3	7	1	2	4	1	1	1
薬指	(1)	2	3	6	2	3	3	1	2	3
	(2)	0	2	4	1	1	1	0	1	1
	(3)	1	3	5	0	2	2	1	2	2
小指	(1)	2	3	7	3	4	5	1	2	3
	(2)	1	2	6	1	1	2	1	1	2
	(3)	2	2	6	1	2	4	1	2	2
指の付け根	(1)	0	2	5	1	2	2	1	2	2
	(2)	2	3	4	1	5	4	1	2	2
	(3)	3	4	5	3	3	4	2	3	3
	(4)	1	1	6	2	2	1	1	1	2
	(5)	2	3	7	3	4	3	2	2	3
掌	(1)	2	3	3	1	2	5	1	1	1
	(2)	3	4	6	1	3	6	2	2	3
	(3)	2	5	7	3	5	7	3	3	3
	(4)	0	1	2	0	2	1	1	0	1

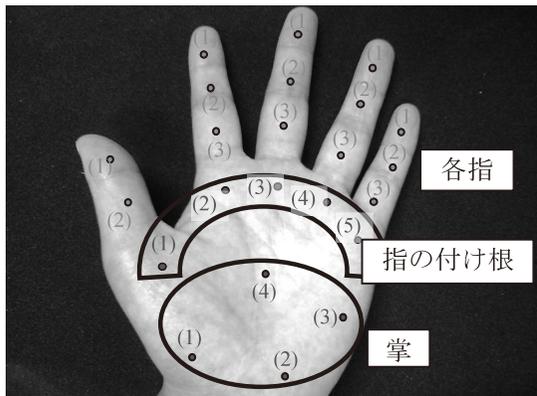


図 9 感度評価実験部位

Fig. 9 Locations on palm for stimuli presentation.

数につき 3 段階で変化させて刺激を呈示し，その感覚強度を評価した。

結果の一部として，表 1 に 5, 50, 200 Hz について示す。同じ数値は，同一の触覚感覚強度で知覚されたことを表している。呈示部位についてみると，人差し指が最も感度が高く，親指，中指，小指が同程度の感度で，薬指が最も感度が低いことが明らかになった。指以外の呈示部では，指の付け根はどれも同程度の感度で，掌の中央部分が特に感度が悪いという結果が得られた。これは，前章で述べたとおり，各周波数に対応した触覚受容器の分布が部位によって大きく異なる

ていることに起因していると考えられる。

呈示周波数の違いに対しては，触覚として知覚される感覚が大きく異なることが分かった。数 Hz 程度までの低い周波数では脈のような鼓動を感じ，数十 Hz 程度の周波数域では，機械的な振動，あるいは何かに叩かれている感覚が得られ，また 50 Hz 以上 300 Hz までの高い周波数では，高周波の振動あるいは，軽く触れられている感覚が得られることが分かった。

以上のことから，高次知覚を認識するためには，実際の振動刺激そのものを感じてしまうと考えられる低周波数の強い刺激よりも，刺激強度の弱い高周波域での刺激呈示が適していることが分かった。

予備実験 b) では，2 つのアクチュエータを用いて PS 刺激を生成した。人差し指，掌，手首を呈示部位として選び，それぞれ 3 種類の距離を隔ててアクチュエータを配置した。パルス周波数は 5, 50, 200 [Hz] の 3 種類とし，波高値は各周波数ごとに 3 段階で変化させて PS の感度評価を行った。呈示部位の大まかな位置を図 10 に示すが，人差し指と掌の場合は，円で囲んだ範囲の両端 ((1)-(3))，中央と爪側の端 ((1)-(2))，中央と手首側の端 ((2)-(3)) の 3 種類とした。手首の場合は，掌の終端から 120 [mm] 離れた点を基準点とし，それを中点とする線分の両端を刺激点とした。刺激点間の距離は，30, 60, 120 [mm] とした。

実験結果を，表 2 に示す。なお，PS の刺激像の知

表 2 PS の呈示部位, 周波数, 波高値による感度変化  
Table 2 PS perception by the difference of location, frequency and voltage.

周波数[Hz]		5			50			200		
		0.39	0.46	0.61	0.55	0.61	0.70	0.65	0.70	0.82
人差し指	(1)-(2)	1	2	2	1	2	2	1	2	2
	(2)-(3)	0	2	2	1	3	3	2	3	3
	(1)-(3)	1	2	3	2	1	3	2	2	3
掌	(1)-(2)	1	1	2	2	2	2	0.5	1	2
	(2)-(3)	1	2	2	1	2	1	0.5	1	2
	(1)-(3)	1	1	3	2	2	2	0.5	2	2
手首	30	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	60	0	0	2	1	1	0	1	1	2
	120	0	0	1	0.5	1	1	0	0.5	0.5

表 3 AM の呈示部位, 立ち上がり位相差, 波高値による感度変化  
Table 3 AM perception by the difference of location, voltage and time delay.

立ち上がり位相差[ms]		50			500			1000		
		0.70	0.75	0.82	0.70	0.75	0.82	0.70	0.75	0.82
人差し指	(1)-(2)	0	0	1	2	2	3	1	3	2
	(2)-(3)	0	1	1	2	3	3	2	3	2
	(1)-(3)	1	1	0	2	3	4	1	1	1
掌	(1)-(2)	2	2	2	2	2	2	0	1	0
	(2)-(3)	1	2	1	1	1	2	0	1	1
	(1)-(3)	1	1	1	1	2	1	1	2	1
手首	30	1	1	0	1	1	1	1	1	1
	60	1	1	0	1	1	2	2	2	3
	120	0	0	0	0	2	1	1	1	1

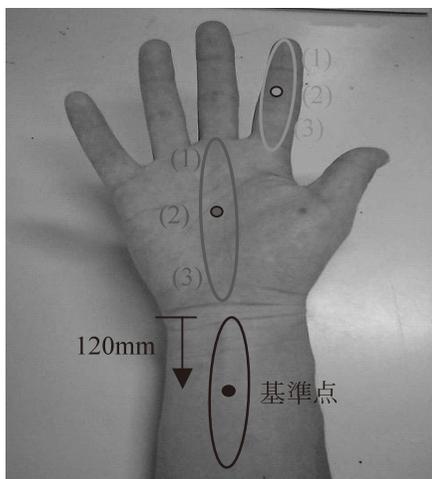


図 10 PS, AM 感度評価実験部位

Fig.10 Presentation points in PS and AM evaluation.

覚が弱い部位があったため, 感度評価 0 と 1 の間に, 0.5 という評価値も新たに加えた. この結果から, PS の刺激像の強度は, 知覚はできるが実際の刺激と比べて弱いものとなるのが分かった. また, 手首以外の呈示部位においては, 周波数や波高値が異なっても, 感度にはそれほど影響しないという結果が得られた. 手首の感度が特に弱いことが分かったが, 実刺激と比

較して, 刺激像は高い周波数の方が触覚として知覚しやすいことも分かった.

c) は, 2つのアクチュエータを用いて, AM 刺激呈示の実験を行った. 呈示部位は b) と同様の箇所とし, 立ち上がり位相差を 50, 500, 1,000 [ms] とした. 波高値は, あらかじめ実験で調べておいた, AM に適している 0.70, 0.75, 0.82 [V] の 3 種類で変化させて, AM の感度評価を行った. なお, 周波数は 50 [Hz] で固定とした.

表 3 に実験結果を示すが, AM の刺激像も PS と同様に, 実際の刺激と比べて強度が弱いということが分かった. また, b) の結果同様, 手首の感度が低いという結果が得られた. 立ち上がり位相差 500 [ms] が, 最も良好に AM を知覚できることが分かった. 波高値は感度にほとんど影響せず, 呈示部位に関しては, 人差し指では中央と先端, 中央と根元側の端の組合せが, 掌では指の付け根側の点と中央の組合せで感度が良好であった.

以上のことから, 以降で述べる PS, AM の認識, 弁別実験に用いる入力信号は, 周波数 50 [Hz], 波高値は PS で 0.61 [V], AM で 0.75 [V] を基準とすることとした. 呈示部位は, 人差し指と中指および掌とし, 人差し指と中指では先端と中央, 根元側と中央の 2 種

表 4 PS 弁別実験結果 (5 回呈示中の正解数)

Table 4 Results of PS presentation experiment (Number of correct answers out of five trials).

被験者	部位		人差し指		中指		掌	
	(1)-(2)	(1)-(3)	(1)-(2)	(1)-(3)	(1)-(3)	half		
A	2	3	4	4	3	3		
B	5	3	2	3	5	5		
C	0	0	2	4	4	3		
D	5	2	5	—	4	5		
E	3	2	3	4	2	4		
F	5	3	4	4	4	4		
G	4	4	4	5	5	5		
H	—	—	—	5	5	2		
I	—	—	1	2	3	3		
J	4	1	4	2	4	4		

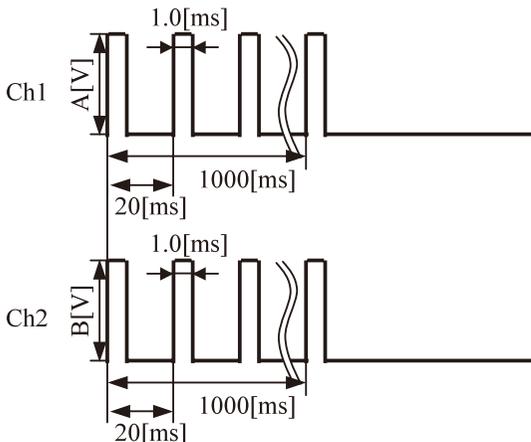


図 11 PS 発生入力信号波形 (50 Hz)

Fig. 11 Signal for PS generation (50 Hz).

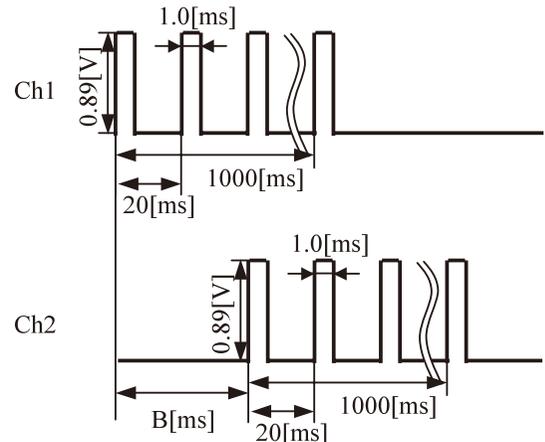


図 12 AM 発生入力信号波形 (50 Hz)

Fig. 12 Signal for AM generation (50 Hz).

類の組合せ、掌では指の根元側と手首側の組合せと、その半分の距離の 2 種類とすることとした。

#### 4.2 PS および AM の認識弁別実験

予備実験で得られた結果をもとに、PS と AM の認識弁別実験を行った。10 名の被験者にそれぞれの刺激を呈示し、刺激感知の有無と、刺激像の位置および移動について聞き取り調査を行った。

PS 呈示実験で、デバイスに入力した信号の概形を図 11 に示す。2 つのチャンネルへの入力信号の波高値 A, B を、予備実験で決定した基準値をもとに変化させることにより、刺激像を爪側寄り、中央、手首側寄りの 3 種類呈示する。被験者には、あらかじめ PS について簡単な説明を行ったうえで、実験直前に人差し指に 3 種類の刺激像をそれぞれ 1 度ずつ呈示した。実験では、ランダムに 3 種類の PS を呈示し、刺激像がどこに現れたかを答えてもらった。これを各部位 5 回ずつ繰り返し、さらに触覚感覚について聞き取り調査を行った。

結果を表 4 に示す。表中の数字は 5 回の試行のう

ち、正しく識別できた回数であり、“—” は刺激を知覚できなかったことを示している。本実験より、認識率 87.5%、識別率 67.3% が得られた。なお、認識率は、刺激像を感じた割合を、識別率は 2 刺激点間でどちら寄りに刺激像が現れたか正答した割合を意味している。

AM の実験では、図 12 に示すような波形の信号を入力した。チャンネル間の立ち上がり位相差 B は、500 [ms] で固定とした。10 名の被験者には、AM について簡単な説明をあらかじめ行っておいた。実験では、手の先端へ向かう刺激と手首側へ向かう刺激をランダムに呈示し、どちらに刺激像が移動したかを答えてもらう。この試行を各部位 5 回ずつ繰り返し、また触覚感覚について聞き取り調査を行った。

表 5 に結果を示した。表中の数字が表すものは、表 4 と同じである。刺激の認識率は 100%、移動方向の識別率は 97% が得られた。なお、認識率は、刺激像を感じた割合を、識別率はどちら向きに刺激像が移動したか正答した割合を意味している。

表 5 AM 弁別実験結果 (5 回呈示中の正解数)

Table 5 Results of AM presentation experiment (Number of correct answers out of five trials).

被験者	部位	人差し指		中指		掌	
		(1)-(2)	(1)-(3)	(1)-(2)	(1)-(3)	(1)-(3)	half
A		5	5	5	5	5	5
B		5	5	4	5	5	4
C		4	5	4	5	5	5
D		5	3	4	5	5	5
E		5	5	5	5	5	5
F		5	5	5	5	5	5
G		5	5	5	5	5	4
H		5	5	5	5	5	5
I		5	5	5	5	5	5
J		5	5	5	5	4	5

### 4.3 PS および AM 呈示に関する考察

呈示部位と波高値, 周波数を変化させて感度評価を行った実験により, 作成した呈示デバイスを用いて PS および AM の触覚刺激呈示が可能であることが分かった. 呈示部位によって大きく感度が異なるが, これは, 皮膚組織や触覚受容器の物理特性と, 人間の認知機構に起因するものであると考えられる. 五指の中では人差し指と親指が感度が高く, また掌では中央部が感度が低いという結果は, 人間が物体を摘んだり把持する場合に使う手の部位とよく一致している.

PS 弁別実験では, 人差し指, 掌, 中指の順で感度が良いことが分かる. また若干ではあるが, 人差し指では距離が短いほうが弁別しやすいようである. 刺激像の識別率としては低いが, これは PS の認識には訓練が必要であることに起因していると考えられる. また刺激像の位置がぼんやりとしていて知覚しにくいという感想もあった.

AM 弁別実験では, どの被験者についても呈示部位によらず良好に識別されていることが分かる. 今回の実験では, 2つの素子に対して, 刺激点となる手の部位を上方から接触させるという手法をとったため, 接触圧の違いで知覚しにくい場合があったことも考えられる. 今後は, 手の部位に均等な接触圧でアクチュエータを取り付けて実験を行う必要がある.

AM 呈示実験では, 何かが掌で動いた, 指をタップされた, ヌルツと動いた, 指先をなぞられた, などの感覚に関する様々な意見が得られた. これは, 2つの振動アクチュエータから生成される同一の刺激によって得られる AM が, 被験者によって違った感覚として知覚されることを示唆していると考えられる. 今後これらを, 人間の触覚認知機構と関連付けて考察していく必要がある.

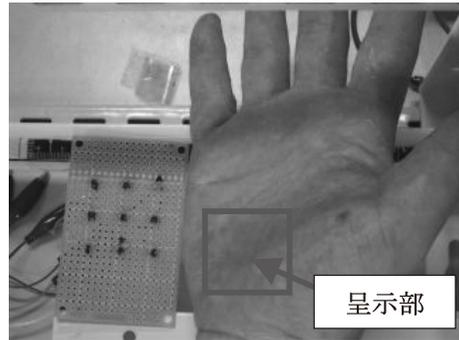


図 13 触覚情報呈示デバイスの試作  
Fig. 13 Prototype of tactile display.

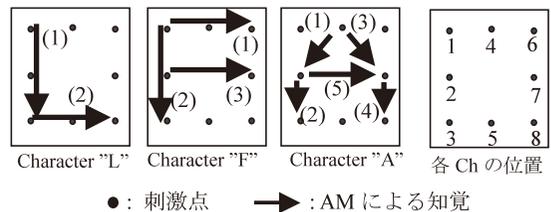


図 14 文字の書き順呈示の例  
Fig. 14 Presentation of writing motion by AM.

## 5. 文字の書き順付き呈示

### 5.1 文字呈示実験

前章までの実験をふまえ, 触覚情報呈示デバイスを試作した. 9個の振動アクチュエータを  $3 \times 3$  のマトリクス状に配置した呈示デバイスを図 13 に示す. ただし, 実験に用いた D/A ユニットの出力チャンネル数の制限のため, 実際に使用したアクチュエータは中央の点を除いた 8 点である. 任意の 2 点間に位相差付きでパルス電流を与えることにより, 仮現運動による触覚刺激の呈示が可能である. 図 14 に示すように, 各素子に順に信号を送出することにより, 文字や図形パターンを書き順付きで呈示することが可能である.

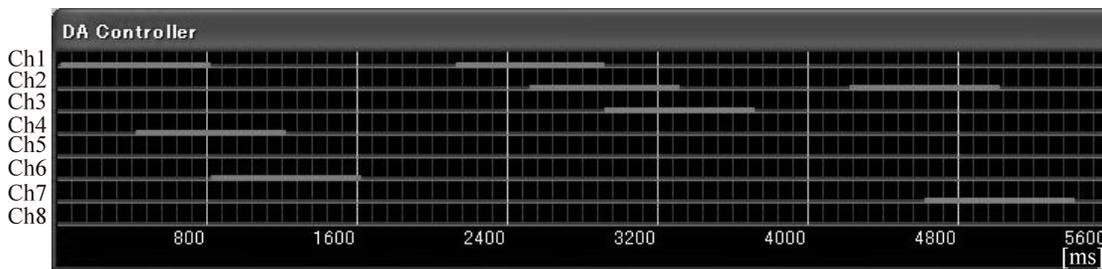


図 15 文字呈示入力パターンの例 (Character “F”)

Fig. 15 Example of input signal patterns for the presentation of “F” character.

表 6 文字呈示実験結果 (被験者による違い)

Table 6 Results of character presentations (Difference of subjects).

被験者	A	B	C	D	E	Average
認識率(%)	100	100	100	100	100	100
識別率(%)	96.7	96.7	83.3	80.0	73.3	86.0

また、送出信号を計算機上で対話的に作成するためのインターフェースを実装した。これにより、各素子に与えるパルス信号の周波数、振幅、位相差を視覚的に確認しながら入力が可能となり、また同時に触覚の呈示もできる。図 15 に、文字「F」を呈示するための送出信号パターンを示す。

本デバイスを用いて、5名の被験者に文字を書き順つきで呈示した。図 13 に示した掌の部位に“A”，“F”，“L”，“T”，“U”，“X”，“Z”，“Δ”の8文字をランダムに30回呈示し、その文字を回答させた。なお、仮現運動による書き順呈示の可能性と、文字の複雑さに対する認識の差異を調べるために、画数や、ストローク中の不連続点数の異なるこれら8文字を使用することとした。

文字呈示実験の被験者ごとの認識率および識別率を表 6 に、文字ごとの正答率を図 16 に示す。表 6 および図 16 中の「認識率」は刺激像を感じた割合を、「識別率」は呈示された文字が何であるか正答した割合を意味している。被験者によってばらつきはあるが、平均で 86%の正解が得られた。文字ごとに結果を見ると、識別率が高かったのは“T”，“U”，“Z”，次いで“L”，“X”，“Δ”，そして低かったのは、複数の不連続点を持つ“A”，“F”であった。呈示後の感想として、まったく新しい触覚呈示手法で面白い、掌に実際に文字を書かれたような感覚があった、書き順やなぞり方向から文字を識別できた、などが得られた。

5.2 文字呈示に関する考察

実験から、8個のアクチュエータで仮現運動を生起させることにより、単純な文字であれば十分に認識可能な触覚情報として呈示可能であることが確認できた。

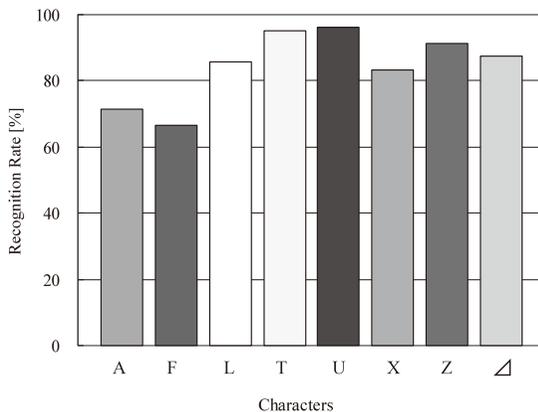


図 16 文字呈示実験結果 (呈示文字による違い)

Fig. 16 Results of character presentations (Difference of characters).

また、書き順が示されることにより、より明確に文字を知覚することができたという意見も得られた。文字によって識別率に差があるが、この原因として以下の2点が考えられる。

1 つ目は、文字の画数によるものである。“A”や“F”のように画数が多くなれば、呈示に要する時間が長くなり、それによって早期に呈示された部位の刺激の印象が薄れてしまい、正しく文字を認識できなくなることが考えられる。

2 つ目は、軌跡が連続しているか否かである。これは「一筆書きが可能か否か」、あるいは「ストロークの途中で筆を上げる回数が多いか」というようにいい換えることができる。刺激像の移動が中断すると、それまでなぞられていた位置の同定が困難となり、文字の全体像をイメージしにくくなるためと考えられる。また、筆を上げた前後の点においても仮現運動が生起し、連続になぞられたように認知されている可能性もある。“U”や“Z”は一筆書きが可能であるため識別率が高いが、逆に“A”や“F”は筆を上げる回数が多いために識別率が低下したといえる。

これらの2つの要因は、指で背中に文字を書いても

らい、それを当てるゲームにおいて、正答が難しくなる場合と類似しており、今後、人間の認知機構と記憶との関連を基に考察していくことが必要であると考えている。

## 6. ま と め

本稿では、形状記憶合金を使用した触覚呈示デバイスにより、触覚の高次知覚を発生させて、動的な触覚情報の呈示を行う手法について述べた。本触覚呈示デバイスは、1素子あたり 1mW 程度の電力で動作する糸状振動アクチュエータを用いており、高次知覚の生成により、2つの刺激点の間で、刺激子が存在していない位置へ触覚刺激像の呈示が可能であることが分かった。また被験者による仮現運動の呈示実験から、従来の触覚呈示デバイスによる文字や図形のパターン呈示とは異なった動的な感覚、つまり、なぞりや擦りといった新しい感覚の呈示が可能であることも明らかになった。さらに、実験後に行った被験者に対するアンケートから、入力条件の違いによって、被験者により様々な種類のなぞり感覚が生じることが分かった。現段階では、物理的的刺激に対する触覚知覚の生成メカニズムが未解明であるため、刺激条件を制御し、意図した種類のなぞり感覚を呈示することは困難である。今後、医学、生理学、心理学からの触覚機構の解明に向けた研究をすすめ、刺激条件と、それによって生成されるなぞり感覚との関係を明らかにし、任意の触覚感覚を呈示する手法を確立していきたい。

さらに、これらの評価を基に、8個のアクチュエータを平面上に配置した触覚情報呈示デバイスを試作した。文字を書き順つきで呈示する実験を行い、8文字のランダム呈示から平均で 86%の識別率を得ることができた。また、書き順が示されることにより、より明確に文字を知覚することができたという意見も得られた。これにより、新たな情報呈示ツールやコミュニケーションツールの提案が可能となる。具体的には、視覚を通さずに時間が分かる腕時計やサイレントアラーム、自動車のハンドルに取り付けて、音声や画面表示によらない情報呈示が可能なナビゲーションシステムなどへの応用を考えている。さらに、本システムと視覚や聴覚呈示機構を組み合わせることにより、より臨場感のある情報呈示が可能になると考えられる。

今後は、信号間の立ち上がり位相差以外の入力条件が、いかに触覚呈示に影響するのかを実験により調査していく。また、アクチュエータを空間的に密に配置することにより、様々な触覚像や動的触覚パターンの呈示が可能な触覚ディスプレイを構築していく。さら

に、刺激部位と振動周波数、振動強度などの関係を詳細に解析し、人間の触覚認知機構と関連付けて考察していく。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興機構産学共同シーズイノベーション化事業顕在化ステージにより行われたものである。

## 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) 前野隆司：ヒトの触覚受容機構—力学・アナロジー・錯覚という視点から，電気学会センサマイクロマシン部門誌，Vol.122-E, No.10, pp.469-473（2002）。
- 3) 大西 昇：生体情報処理，昭光堂（2001）。
- 4) 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）。
- 5) 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）。
- 6) 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）。
- 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) 小川和朗，溝口史郎：組織学第 2 版，文光堂（1993）。
- 9) Alles, D.S.: Information Transmission by Phantom Sensations, *IEEE Trans. Man-machine Systems*, Vol.11, 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) 本間 大，中澤文雄：機能異方形状記憶合金の開発と応用，電気製鋼，Vol.77, No.4, pp.277-283（2006）。
- 12) Mizukami, Y. and Sawada, H.: Tactile Information Transmission by Apparent Movement Phenomenon Using Shape-memory Alloy Device, *International Journal on Disability and Human Development*, Vol.5, No.3, pp.277-284（2006）。

（平成 19 年 4 月 3 日受付）

（平成 19 年 9 月 3 日採録）

## 推薦文

形状記憶合金の伸縮振動を利用することで、小型かつ省電力で触覚情報提示するデバイスはきわめて新規性が高い。詳細な実験に基づいた触覚呈示箇所の検討は、関連研究者に重要な知見を与えるであろう。シンポジウム予稿集用のカメラレディ原稿を元に47名のシンポジウムプログラム委員による審査・投票を行い、特に評価が高かったため、論文誌に推薦した。  
(インタラクション2007プログラム委員長 角 康之)



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。現在、同大学院博士前期課程在学中。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。



内田 啓治

1945年生。1970年立命館大学理工学部電気工学科卒業。理学電機工業(株)、(株)坂部制御技研を経て、1991年(株)エスシーエー設立。代表取締役。各種FA制御機器、データベース、通信、画像処理装置の設計開発。



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。