A Tactile Display Used Phantom Sensation with Apparent Movement Together

Shintaro Ueda Non-member (The University of Electro-Communications, taro@zidane.ee.uec.ac.jp)

Masafumi Uchida Member (The University of Electro-Communications, uchi@ee.uec.ac.jp)

Akio Nozawa Member (Meisei University, akio@ee.meisei-u.ac.jp)

Hideto Ide Member (Aoyama Gakuin University, ide@ee.aoyama.ac.jp)

Keywords: tactile display, phantom sensation, apparent movement, information presentation

When more than one stimulus are arranged spatially, an illusion such as the phantom sensation (P.S.) and the apparent movement (A.M.) appear in the sense of touch. The former is the sense it can feel that there is just one stimulus in the gap of two stimuli. On the other hand, the latter is the sense it can feel one stimulus just to be moved between the stimulus and the stimulus and to be here. The foundation research which made the tactile display of presenting two-dimensional information by making the P.S. and the A.M. appear at the same time a goal is done by this research. When the A.M. is used, information in the direction can be expressed between 2 elements of tactile stimulus in two-dimensional vector information. In this report, we propose the technique of information expression in 3 elements of tactile stimulus that the apparent movement is used with the phantom sensation together. By this technique, two-dimensional vector information can be expressed by 3 elements of tactile stimulus.

The experiment setup is shown in Fig.1. A tactile stimulus element is the circle PZT vibrator of about a diameter 21mm. Three PZT vibrators are shown with v_a , v_b and v_c . v_a , v_b and v_c are attached to each of the fingertips of the index finger, a thumb and the little finger, and it is fixed so that each fingertip may be located in the apex of the equilateral triangle $\Delta v_a v_b v_c$ of 1 side 10cm. The drive voltage w_a , w_b and w_c of v_a , v_b and v_c is shown with Eq.(1), Eq.(2) and Eq.(3) by the rectangle wave respectively.

$$w_a(t) = A_a \cdot u\left(\frac{t}{T_a}\right) \cdot u\left(\frac{t}{T_o} - \tau_a\right) \dots\dots\dots (1)$$

$$w_b(t) = A_b \cdot u\left(\frac{t}{T_b}\right) \cdot u\left(\frac{t}{T_o} - \tau_b\right) \dots\dots\dots (2)$$

$$w_c(t) = A_c \cdot u\left(\frac{t}{T_c}\right) \cdot u\left(\frac{t}{T_o} - \tau_c\right) \dots\dots\dots (3)$$

But, t is time. A_a , A_b and A_c are amplitude. T_o is a period. T_a , T_b and T_c are periods under $T_o/2$. τ_a , τ_b and τ_c are time delay from $u(t/T_o)$. $u(t)$ is made $u(t) = u(t + m)$, ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) by the periodic function of periodic 1, and is made Eq.(4) in time section $0 \leq t \leq 1$.

$$u(t) = \begin{cases} 1, & \left(0 \leq t < \frac{1}{2}\right) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

The A.M. and the P.S. appear between PZT vibrators by adjusting the parameter amplitude, periods and delay time of Eq.(1), Eq.(2) and Eq.(3). It thinks that parameters in Eq.(1), Eq.(2) and Eq.(3) are set up as follows. $T_o = 1000\text{ms}$, $T_a = T_b = T_c = 4\text{ms}$, $\tau_b = \tau_c = 0 < \tau_a$, $A_b + A_c = kA_a$ and $A_b : A_c = \beta : 1$. The P.S. appears in the position of $1 : \beta$ between v_b and v_c , because a difference in v_b and v_c is only amplitude. This is shown with $p_{bc}(\beta)$. But, β and k are

Fig. 1. Experimental setup

Fig. 2. Relations between presented angle and read angle

optional constants. At the same time, because there is a difference in time delay between $p_{bc}(\beta)$ and v_a , the A.M. to v_a from $p_{bc}(\beta)$ appears between $p_{bc}(\beta)$ and v_a . Therefore, when this A.M. is used, the expression of vector $\overrightarrow{p_{bc}(\beta)v_a}$ to the open interval $(\pi/3, 2\pi/3)\text{rad}$ in starting point $p_{bc}(\beta)$ and the vector $\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$ to the interval $(-\pi/3, -\pi/3)\text{rad}$ in starting point v_a becomes possible. By the same method, the expression of vector $\overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}$ to the open interval $(2\pi/3, \pi)\text{rad}$ in starting point v_c , $\overrightarrow{p_{ab}(\alpha)v_c}$ to $(-\pi/3, 0)\text{rad}$ in starting point $p_{ab}(\alpha)$, $\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ to $(0, \pi/3)\text{rad}$ in starting point v_b and $\overrightarrow{p_{ca}(\gamma)v_b}$ to $(-\pi, -2\pi/3)\text{rad}$ in starting point p_{bc} becomes possible. When v_a , v_b , v_c , $p_{ab}(\alpha)$, $p_{bc}(\beta)$ and $p_{ca}(\gamma)$ are used, the vector expression from $-\pi$ rad to π rad becomes possible with only 3 vibrators. α and γ are optional constants.

The experiment of presenting angle information was done to verify the validity of the proposal technique. The result of the experiment is shown in Fig.2. This experiment was done with 4 subjects. As a result of the experiment, it was found out that a vector expression which made $\pi/10$ rad an angle unit was possible.

Phantom sensation と仮現運動を併用した触覚ディスプレイ

非会員 上田 真太郎* 正員 内田 雅文*
正員 野澤 昭雄** 正員 井出 英人***

A Tactile Display Used Phantom Sensation with Apparent Movement Together

Shintaro Ueda*, Non-member, Masafumi Uchida*, Member, Akio Nozawa**, Member, Hideto Ide***, Member

When two and more stimuli are arranged in the space, an illusion such as the phantom sensation and the apparent movement appear in the sense of touch. The foundation research to build a system of presenting two-dimensional information by using the phantom sensation and the apparent movement is done by this research. When the apparent movement is used, information in the direction can be expressed between 2 elements of tactile stimulus in two-dimensional vector information. In this report, we propose the technique of information expression in 3 elements of tactile stimulus that the apparent movement is used with the phantom sensation together. By this technique, two-dimensional vector information can be expressed by 3 elements of tactile stimulus.

キーワード：触覚ディスプレイ，ファントムセンセーション，仮現運動，情報提示

Keywords: tactile display, phantom sensation, apparent movement, information presentation

1. まえがき

触覚は痛覚，温覚と共に身体のいたるところに散在する感覚系，皮膚感覚であり，ヒトが生活する上で欠かすことの出来ない感覚である。身体のいたるところに散在するという特徴から，感覚の一部に何らかの障害を生じても，触覚が完全に消失してしまうことは稀で，残余感覚として感覚代行に有効な感覚器でもある。視覚，聴覚の感覚代行器として開発されてきた触覚ディスプレイは，従来，その多くが，多数の触刺激素子をアレイ状に配置する構造を前提としており，その高密度実装化が主要な研究テーマとなってきた^{(1)~(3)}。しかしながら，もし伝えたい情報が少数の触刺激素子で十分に伝達できるのであれば，触刺激素子を

高密度に配置する必要性はなくなる^{(5)~(7)}。加えて，情報提示装置としての携帯性・利便性・保守性・低コスト性において性能向上が期待でき，触覚ディスプレイが新しい情報提示のツールとして発展する可能性もある。

触覚には，Phantom Sensation(以後，P.S. と記す)と仮現運動という錯覚が知られている。前者は，身体部位 2 地点にそれぞれ触刺激を継時的に提示するとき，2 つの触刺激が類似し，かつ同時に提示されると，2 地点の中間位置に刺激像(以後，P.S. 像と記す)が感じられる現象である。また，P.S. 像は，2 つの触刺激の刺激強度に差があると，刺激強度の大きい触刺激の方向へずれて生じる特性がある。この特性は，触刺激素子が置かれていない，2 つの触刺激素子間の任意の部位に P.S. 像が生起できることを示している。一方，後者は，身体部位 2 地点にそれぞれ触刺激を継時的に提示するとき，一方の刺激提示ともう一方の刺激提示との間に適切な時間差があると，1 つの刺激像が 2 地点間を連続的に移動しているかのごとく感じられる現象である。触覚における P.S. や仮現運動に関する先行研究では，仮現運動の周波数特性や P.S. 像の配位特性など，現象の基礎的な特性が調べられている^{(8)~(13)}。特に 3 つの触刺激素子による 3 点 P.S. に関しては，機械振動刺激による報告のほか，電気パルス刺激を用いた P.S. 像の配位特性，位置弁別特性が詳細に報告され，伝達情報量の観点での検討も行われている^{(14) (15)}。情報提示への応用としては，把持時の擬似力覚の提示に P.S. を利用する報告がある⁽¹⁶⁾。

* 電気通信大学電子工学科

〒182-8585 調布市調布ヶ丘 1-5-1

Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications

1-5-1, Chofu-ga-oka, Chofu 182-8585

** 明星大学電気電子システム工学科

〒191-8506 日野市程久保 2-1-1

Department of Electronics and Electrical System Engineering, Meisei University

2-1-1, Hodokubo, Hino 191-8506

*** 青山学院大学電気電子工学科

〒229-8558 相模原市淵野辺 5-10-1

Department of Electronics and Electrical Engineering, Aoyama Gakuin University

5-10-1, Fuchinobe, Sagami-hara 229-8558

本研究では、P.S. と仮現運動を併用し、伝達したい2次元情報をコーディングせず、トポロジカルな性質を保ったまま提示する2次元触覚ディスプレイの開発を行っている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。この2次元触覚ディスプレイを3つの触刺激素子で構成し、ベクトル情報を提示するとき、2触刺激素子間の仮現運動を用いるのであれば、方向に関しては6方向まで表現できる。本稿では、一般的な2触刺激素子間の仮現運動に加えて、新たに触刺激素子とP.S.像を組み合わせた刺激を構成してベクトル情報を表現する、3触刺激素子による情報の提示手法を提案する。また、提案手法による情報提示に関する実験結果として、 $-\pi \sim \pi$ radの角度情報は最大 $\pi/10$ radを1単位として伝達できることを示す。

方向に関する情報を触覚を介して伝える試みとしては、複数の振動子を並べたベルト型ウェアラブル・インタフェースを用いて2次元空間内の方位を想起させる研究や、方位センサやGPSを付加してナビゲーションシステムを構築する研究などがある^{(19)~(21)}。また、3触刺激素子によるP.S.を用いた情報提示については前述の通りであるが、本稿で提案する情報提示手法は、P.S.と仮現運動を併用して情報を伝える点に特徴がある。

2. P.S. と仮現運動による情報提示

本研究では、触覚ディスプレイに用いる触刺激に変調振動を採用している。本稿で想定する3つの触刺激素子からなる触覚ディスプレイは、触刺激素子を正三角形 $\Delta v_a v_b v_c$ の各頂点に配置し、 v_a, v_b, v_c が接触する身体各部位、例えば図1のように手のひらの3部位へ、それぞれ独立に変調振動刺激を提示できる装置である。

時刻 t において、 v_a, v_b, v_c にある各触刺激素子より提示される刺激強度 $w_a(t), w_b(t), w_c(t)$ はそれぞれ

$$w_a(t) = A_a \cdot u\left(\frac{t}{T_a}\right) \cdot u\left(\frac{t}{T_o} - \tau_a\right) \dots\dots\dots(1)$$

$$w_b(t) = A_b \cdot u\left(\frac{t}{T_b}\right) \cdot u\left(\frac{t}{T_o} - \tau_b\right) \dots\dots\dots(2)$$

$$w_c(t) = A_c \cdot u\left(\frac{t}{T_c}\right) \cdot u\left(\frac{t}{T_o} - \tau_c\right) \dots\dots\dots(3)$$

とする。ただし、 A_a, A_b, A_c は振幅、 T_o は周期、 T_a, T_b, T_c は $\frac{T_o}{2}$ 未満の周期、 τ_a, τ_b, τ_c は $u(t/T_o)$ からの時間遅れである。 $u(t)$ は周期1の周期関数

$$u(t) = u(t+m), \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \dots\dots(4)$$

とし、 $0 \leq t \leq 1$ において(5)式とする矩形波である。

$$u(t) = \begin{cases} 1, & \left(0 \leq t < \frac{1}{2}\right) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

各触刺激素子から提示される刺激の一例として、(1)式が表す波形の模式図を図2に示す。

(2),(3)式において、 $T_b = T_c$ かつ $\tau_b = \tau_c = 0$ とし、

図1 3触刺激素子の配置

Fig. 1. The arrangement of 3 elements of tactile stimulus.

図2 刺激強度波形の一例

Fig. 2. An example of stimulus waveform.

A_b, A_c の関係を

$$A_b : A_c = \beta : 1 \dots\dots\dots(6)$$

とすると、 v_b と v_c から提示される刺激は振幅のみ異なる刺激となる。ただし、 β は $\beta > 0$ の任意の定数である。谷江らは、P.S.像の配位特性に関して、2刺激部位間の中央周辺では線形、刺激部位周辺ではマスキング現象により非線形になることを報告している⁽²²⁾。また、実際の身体は、部位ごとに刺激に対する感度が異なるものであるが、本稿ではシステム構成の単純化を考慮し、3刺激部位の感度特性は同等とし、2刺激部位間の全域においてP.S.像の配位特性は線形性を仮定する。すなわち、P.S.像は線分 $v_b v_c$ を $1 : \beta$ に内分する位置 $p_{bc}(\beta)$ に生起するものとする。仮に、 $p_{bc}(\beta)$ と実際のP.S.像の配位位置との間にズレが生じているのであれば、このズレは触覚ディスプレイとしてのシステム性能、例えば、情報の伝達精度に反映されるはずである。

ここで A_a, A_b, A_c の関係を

$$A_b + A_c = k A_a \dots\dots\dots(7)$$

とし、任意の定数 $k, (k > 0)$ を v_a と $p_{bc}(\beta)$ の刺激の触覚が同程度になるよう調整する。その上で τ_a を $\tau_a > 0$ で調整すると、 v_a の刺激は $p_{bc}(\beta)$ の刺激に対して τ_a だけ時

図3 3触刺激素子によるベクトル表現

Fig.3. The expression of vector by using 3 elements of tactile stimulus.

間遅れが生じているので、 $p_{bc}(\beta)$ と v_a の間で図3実線矢印のような $p_{bc}(\beta)$ から v_a へ向かう大きさ $|p_{bc}(\beta)v_a|$ のベクトル $\overrightarrow{p_{bc}(\beta)v_a}$ が仮定できる。ここで τ_a, τ_b, τ_c の関係を $\tau_b = \tau_c > \tau_a = 0$ に変更し、 τ_b を調整すると、 $p_{bc}(\beta)$ の刺激は v_a の刺激に対して τ_b だけ時間遅れが生じるので、 v_a と $p_{bc}(\beta)$ の間で図3点線矢印のような v_a から $p_{bc}(\beta)$ へ向かう大きさ $|v_a p_{bc}(\beta)|$ のベクトル $\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$ が仮定できる。 $\overrightarrow{p_{bc}(\beta)v_a}$ と $\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$ は

$$\overrightarrow{p_{bc}(\beta)v_a} = -\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

の関係にあるので、 β を調整することによりベクトルの方向は、 $\pm\pi/3 \sim \pm2\pi/3$ rad の間で調整できることになる。ただし、(6) 式より $p_{bc}(\beta)|_{\beta \rightarrow 0} = v_c$, $p_{bc}(\beta)|_{\beta \rightarrow \infty} = v_b$ なので、P.S. 像は触刺激素子の刺激で代用し、

$$\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)} \Big|_{\beta \rightarrow 0} = -\overrightarrow{v_c v_a} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)} \Big|_{\beta \rightarrow \infty} = \overrightarrow{v_a v_b} \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。すなわち $\pm\pi/3, \pm2\pi/3$ rad の4方向については、 $\pm\overrightarrow{v_a v_b}, \pm\overrightarrow{v_c v_a}$ で置換し、2触刺激素子間の仮現運動によって表現する。

以下、同様にして、線分 $v_a v_b$ および線分 $v_c v_a$ をそれぞれ $1:\alpha, 1:\gamma$ に内分する $p_{ab}(\alpha), p_{ca}(\gamma)$ にP.S. 像を仮定すると、4種類のベクトル $\pm\overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}, \pm\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ が表現でき、ベクトルの方向はそれぞれ、 $0 \sim \pm\pi/3$ rad, $\pm2\pi/3 \sim \pm\pi$ rad の間で調整できることになる。ただし、 α, γ は $\alpha > 0, \gamma > 0$ の任意の定数である。結果として $-\pi \sim \pi$ rad の角度情報は、 $\Delta v_a v_b v_c$ の頂点に配置した3触刺激素子上で仮定する2種類のベクトル、すなわち触刺激素子とP.S. 像からなるベクトルと2触刺激素子間の仮現運動によるベクトルによって表現され、3触刺激素子を通して情報提示されることになる。

3. 実験方法

提案した3触刺激素子による情報提示の有効性を心理物

図4 実験装置

Fig.4. Experimental setup.

理実験により検証する。

〈3・1〉 実験システム 3触刺激素子で構成される実験装置は図4の通りである。触刺激素子には直径2.1cm, 円盤形のPZT振動子(村田製作所製77B-21-19R7DM-4A0)を用いる。PZT振動子は、被験者の左手親指、示指、小指の先端部腹側に市販の伸縮性包帯にて装着する。 v_a は示指、 v_b は親指、 v_c は小指とし、それぞれが一辺10cmの $\Delta v_a v_b v_c$ の頂点に位置するよう手を若干、窄ませて固定、保持する。PZT振動子から提示される刺激強度とPZT振動子への印加電圧との関係を線形と仮定し、 $w_a(t) \sim w_c(t)$ をPZT振動子への印加電圧とする。 $w_a(t) \sim w_c(t)$ の諸パラメータは、パーソナルコンピュータに搭載したD/A変換ボード(Interface製PCI-3310)によって制御する。PZT振動子の振動音が実験へ与える影響を考慮し、実験中、被験者には市販の耳栓と遮音ヘッドフォン(PELTOR社製H10A)を装着させる。

予備実験において $A_a = A_b = A_c = 10V$, $T_a = T_b = T_c = 4ms$, $T_o = 1000ms$ のとき、2触刺激素子間の仮現運動およびP.S. は生起することを確認している。ただし、このときの仮現運動は2触刺激素子間の時間遅れ幅が250msである。

〈3・2〉 角度情報伝達実験 提案する3触刺激素子による情報提示方法を用いて、 $-\pi \sim \pi$ rad の角度情報を提示し、情報伝達の可否の確認、および伝達精度を評価するための実験である。

実験者が被験者に知覚されることを期待する情報は、6種類のベクトル $\pm\overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}, \pm\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}, \pm\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ である。ここで β を(11)式とすると、 $\pm7\pi/20 \sim \pm13\pi/20$ rad の角度情報は、38種類のベクトル $\pm\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$ によって $\pi/60$ rad 刻みで提示されることになる。

$$\beta = \frac{19-n}{1+n}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots, 17, 18) \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、 $\pm\overrightarrow{v_a v_b}, \pm\overrightarrow{v_c v_a}$ は2触刺激素子間の仮現運動として、 $\pm\pi/3, \pm2\pi/3$ rad を表現するので、 $\pm\pi/3 \sim \pm2\pi/3$ rad の角度情報は、 $\pm\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}, \pm\overrightarrow{v_a v_b}, \pm\overrightarrow{v_c v_a}$ 合わせて42種類のベクトルによって $\pi/60$ rad 刻みで提示されることにな

図5 ベクトルと角度の関係

Fig. 5. Relations between vector and angle.

る。 α, γ についても(11)式と同様に定めると、 $-\pi \sim \pi$ radの角度情報は、 $\pm v_a p_{ab}(\alpha)$, $\pm v_b p_{bc}(\beta)$, $\pm v_c p_{ca}(\gamma)$, $\pm \bar{v}_a \bar{v}_b$, $\pm \bar{v}_b \bar{v}_c$, $\pm \bar{v}_c \bar{v}_a$ 合わせて120種類のベクトルによって $\pi/60$ rad刻みで提示されることになる。以上、定められた120種類のベクトルと各ベクトルが指示する角度との関係は、図5のようになっている。図はベクトルの始点を共通にして描いた模式図である。

被験者は、パーソナルコンピュータのモニター正面に座し、モニターと向かい合う形で位置する。モニター画面に表示される図6のようなGUIと左手が形成する $\Delta v_a v_b v_c$ の位置関係を、GUIの水平方向(0 rad, $\pm\pi$ rad)が底辺 $v_b v_c$ 、およびGUIの垂直方向($\pm\pi/2$ rad)が点 v_a から底辺 $v_b v_c$ へ下ろした垂線になるよう保持しながら、以下の手順に従って実験を行う。

[Step 1] 120種類のベクトルの中から任意に1ベクトルを選択し、被験者へ3触刺激素子を通して提示する。提示されたベクトルが表す角度を以後、提示角度と呼称する。

[Step 2] 被験者は、提示される刺激から角度情報を読み取り(以後、読取角度と記す)、図6のGUIをマウスによって操作し、 $\pi/180$ rad単位で読取角度を回答する。実験開始前には図中左のGUIが表示されており、被験者が“Start”ボタンをクリックすると、図中右のようなGUIに切り替わって実験開始となる。この図の中では $\pi/4$ rad付近を指示している線分が、スクロールバー操作に連動して原点を中心に回転する指示針である。図中右はスクロールバー操作中の図であり、図中左の“Start”ボタンクリック直後は、指示針は0 radを指している。被験者は、指示針が読取角度を指示するようにスクロールバーを調整して“OK”ボタンをクリックする。3触刺激素子からの刺激は、“OK”ボタンクリックと同時に停止する。

図6 実験前のGUIと実験中のGUI

Fig. 6. GUI before experiment and GUI during experiment.

[Step 3] パーソナルコンピュータには、提示角度、読取角度、および刺激提示開始から“OK”ボタンをクリックするまでの所要時間(以後、回答時間と記す)が記録される。

以上、Step 1~3を6回繰り返して1試行とする。試行と試行の間には十分な休憩が取られるよう留意しながら、合計12試行を行う。

実験開始前、被験者には実験の主旨、実験手順を文書で伝えと共に、実験装置を用いた1時間程度のトレーニングを行う。引続いて、図6のGUIにおけるスクロールバーの操作開始から指示針を所望の角度へ調整して“OK”ボタンをクリックするまでの所要時間(以後、操作時間と記す)を測定する。この測定は試行と試行の間の休憩時、および実験終了後も行い、平均的な操作時間を算出する。読取角度の意思決定からスクロールバーの操作開始までの所要時間は、読取時間に比べて極めて短く、また、提示角度への依存性はないものと仮定すると、回答時間から操作時間を差し引いた値は、刺激提示開始から読取角度の意思決定までの所要時間と見なすことができ、以後、この値を読取時間と呼称する。

4. 実験結果および考察

被験者は、21~24歳の健常男性4名(A,B,C,D)である。本実験は(7)式中のパラメータを $k=1$ として行ったものである。

表1は、各被験者における操作時間の平均値・標準偏差値、および操作角度と操作時間の間の相関係数である。ただし相関係数は、スクロールバーの操作量が操作角度0 radを中心に左右対象であることを考慮し、操作角度の絶対値と操作時間の間で算出した値になっている。相関係数は4被験者共に高々0.26程度となり、また、個々の測定値も概ね操作時間の平均値を中心に標準偏差値1.05~1.60sの程度で分布していた。そこで操作時間は、操作角度に依らず一定と仮定し、読取時間は、操作時間の平均値を回答時間

表 1 操作角度と操作時間の間の相関係数と
操作時間の平均値・標準偏差値

Table 1. Correlation coefficient between operation angle and operation time, average of operation time and that standard deviation.

subject	A	B	C	D
correlation coefficient	0.26	0.26	0.22	0.24
average of operation time (s)	3.63	3.69	3.57	2.93
standard deviation of operation time (s)	1.26	1.42	1.60	1.05

図 7 提示角度と読取角度の関係

Fig. 7. Relations between presented angle and read angle.

図 8 提示角度と読取時間の関係

Fig. 8. Relations between presented angle and read time.

から差し引くことにより求めることにする。

角度情報伝達実験より得られた提示角度と読取角度の関係、および提示角度と読取時間の関係を図 7、図 8 に示す。横軸は提示角度、×, +, ○, □印のプロット点はそれぞれ、被験者 A, B, C, D からの測定値である。図 7 の縦軸は読取角度、図 8 の縦軸は読取時間を log スケールで表している。提示角度と読取角度の間の相関係数および提示角度に対する読取角度の偏差の平均値・標準偏差値、提示角度と読取時間の間の相関係数および読取時間の平均値・標準偏差値を表 2 に示す。提示角度と読取角度には強い相関があり、提示角度に対する読取角度の偏差の平均値は、若干、提示角度よりも負の方向へ偏ってはいるものの、ほぼ提示角度を

表 2 読取角度の標準偏差値と読取時間の平均値

Table 2. A standard deviation of read angle and an average of read time.

subject	A(de)	B(na)	C(ni)	D(ta)
correlation coefficient of read angle	0.86	0.99	0.79	0.91
average of read angle $\times \pi$ (rad)	-0.01	-0.02	-0.02	-0.02
standard deviation of read angle $\times \pi$ (rad)	0.11	0.09	0.10	0.07
correlation coefficient of read time	-0.19	-0.12	-0.23	-0.24
average of read time (s)	19.1	14.6	5.61	4.53
standard deviation of read time (s)	7.94	10.3	3.73	3.38

中心にその周辺、標準偏差値にして $0.07\pi \sim 0.11\pi$ rad の程度で提示角度は読み取られる結果となった。提示角度に対する読取角度の偏差の標準偏差値は、 $0.07\pi \sim 0.11\pi$ rad と若干の個人差はあるものの、 $\pi/10$ rad を 1 単位とすれば、十分に情報伝達が可能であることを示唆している。(11) 式で示した通り、本実験では $\Delta v_a v_b v_c$ の頂点間で 19 個の P.S. 像を仮定したが、 $\pi/10$ rad 単位で角度情報を伝えるには、19 個のうち少なくとも 3 個の P.S. 像が独立した刺激像として知覚されなければ実現し得ない。したがって本実験結果は、直径 2.1cm の PZT 振動子の間隔 10cm、すなわち $\Delta v_a v_b v_c$ の一辺 10cm の間で 3 個以上、P.S. 像を生起させ、情報伝達していたことになる。触刺激素子サイズに対して高々 5 倍程度の触刺激素子間隔の間で P.S. 像を 3 個以上、弁別できた要因として、触刺激素子と P.S. 像からなるベクトル表現の効果を考えているが、この点に関しては今後、より詳細に調査していく予定である。

提示角度と読取角度の間に非常に強い相関が見られる一方で、提示角度と読取時間の間にはほとんど相関が見られなかった。読取時間の平均値は $4.53 \sim 19.1$ s と、個人差が非常に大きく、また、その標準偏差値も大きな値を示したことから、本実験方法が読取時間の個人差を評価するには適当ではなかったことを窺わせる結果となった。

図 5 が示すように、触刺激素子と P.S. 像からなるベクトル $\pm \vec{v}_{cpab}(\alpha)$, $\pm \vec{v}_{apbc}(\beta)$, $\pm \vec{v}_{bpca}(\gamma)$ は、角度幅 $\pi/3$ rad の 6 つの開区間 $(-\pi, -2\pi/3)$, $(-2\pi/3, -\pi/3)$, $(-\pi/3, 0)$, $(0, \pi/3)$, $(\pi/3, 2\pi/3)$, $(2\pi/3, \pi)$ を分担して情報を伝えている。 $\pm \vec{v}_{cpab}(\alpha)$, $\pm \vec{v}_{apbc}(\beta)$, $\pm \vec{v}_{bpca}(\gamma)$ がそれぞれ担う各区間において、提示角度に対する読取角度の偏差の平均値・標準偏差値を求めると、図 9 のようになる。また、図 10 は、各区間における読取時間の平均値・標準偏差値である。両図とも横軸は各区間で、左から順に $-\vec{v}_{bpca}(\gamma)$, $\vec{v}_{apbc}(\beta)$, $-\vec{v}_{cpab}(\alpha)$, $\vec{v}_{bpca}(\gamma)$, $-\vec{v}_{apbc}(\beta)$, $\vec{v}_{cpab}(\alpha)$ が情報を担っている。図 9 の縦軸は提示角度に対する読取角度の偏差である。×, +, ○, □印のプロット点はそれぞれ、被験者 A, B, C, D の提示角度に対する読取角度の偏差の平均値、各プロット点に付したエラーバーはその標準偏差値を表している。図 10 の縦軸は読取時間を log スケールで表している。×, +, ○, □印のプロット点はそれぞれ、被験者 A, B, C, D の読取時間の平均値、各プロット点に付したエ

図9 角度区間と読取偏差角度の関係

Fig. 9. Relations between angle interval and read deviation angle.

図10 角度区間と読取時間の関係

Fig. 10. Relations between angle interval and read time.

ラーバーはその標準偏差値である。

最も安定して精度よく情報伝達できた区間は、 $\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ によって情報伝達された $(0, \pi/3)$ である。 $\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ とは土の関係にある $-\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ の $(-\pi, -2\pi/3)$ には個人差が生じた。ベクトルの土、すなわち図3で示したベクトルの始点がP.S. 像か触刺激素子かによって情報の伝達性能に差が出る傾向は、 $\pm \overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}$ の $(-\pi/3, 0)$, $(2\pi/3, \pi)$, $\pm \overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$ の $(-2\pi/3, -\pi/3)$, $(\pi/3, 2\pi/3)$ にも見られた。概ね、触刺激素子を始点とするベクトルにおいて標準偏差値、個人差共に小さく、良好な傾向を示した。1個の触刺激素子から提示される触刺激に比べ、P.S. 像は明らかに鮮明さを欠いた刺激であり、刺激像としてははやけて知覚される。ベクトルの始点、すなわち最初に到来する刺激が鮮明に知覚されることが、伝達性能を決める要素の1つになっている可能性がある。

表2で示した読取角度の負の方向への偏りは、特に $(-\pi, -2\pi/3)$, $(-2\pi/3, -\pi/3)$, $(0, \pi/3)$, $(\pi/3, 2\pi/3)$ の4区間、ベクトルにして $\pm \overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$, $\pm \overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ で顕著であ

る。一方、 $(-\pi/3, 0)$, $(2\pi/3, \pi)$ の2区間、ベクトルにして $\pm \overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}$ では、4被験者共に正の方向へ偏る結果となった。測定値を前者4区間と後者2区間の2群に分け、それぞれの母平均に関して有意水準5%で t 検定したところ、4被験者共に有意差が認められた。(6)式および(11)式が示す通り、本提案手法は3刺激部位の感度特性を同等として設計しているが、実際には親指、示指、小指の間で刺激に対する感度は異なり、示指が最も良く、小指が悪い。したがって、 $p_{ab}(\alpha)$, $p_{bc}(\beta)$, $p_{ca}(\gamma)$ はそれぞれ、示指-親指間、親指-小指間、小指-示指間のP.S. 像であるが、実際に生起するP.S. 像は、本提案手法が想定している配位位置よりも $p_{ab}(\alpha)$ では示指寄り、 $p_{bc}(\beta)$ では親指寄り、 $p_{ca}(\gamma)$ では示指寄りに配位しているはずである。この結果として、 $\pm \overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}$, $\pm \overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$ は負の方向に、一方 $\pm \overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ は正の方向に偏ったものと解釈できる。刺激に対する感度特性は、1被験者の刺激部位間で異なるほか、当然、被験者間でも異なるものであるが、この点については、装置自体のキャリブレーションによって容易に対応できるものと考えている。

読取時間の平均値は4被験者共に若干ではあるが、右下がりの傾向を示し、表2中の読取時間の相関係数が4被験者とも負になっていたことと対応している。 $0 \sim \pi$ rad の3区間の読取時間に比して $-\pi \sim 0$ rad の3区間の読取時間が長かった原因の1つとして、前述した最初に到来する刺激の鮮明さとの関連を挙げることができる。前述の通り、触刺激素子を始点とするベクトルよりもP.S. 像を始点とするベクトルは、情報の伝達性能が劣位にあるとすれば、この優劣が情報を読み取る際の難易度に反映され、読取時間に影響した可能性がある。 $-\pi \sim 0$ rad の3区間、すなわち $-\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$, $\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$, $-\overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}$ のうち、 $-\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$ と $-\overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}$ の2のベクトルは情報の伝達性能が劣位で読み取り難い、P.S. 像を始点とするベクトルである。一方、 $0 \sim \pi$ rad の3区間、すなわち $\overrightarrow{v_b p_{ca}(\gamma)}$, $-\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$, $\overrightarrow{v_c p_{ab}(\alpha)}$ では、P.S. 像を始点とするベクトルは $-\overrightarrow{v_a p_{bc}(\beta)}$ だけである。したがって本実験方法では、 $-\pi \sim 0$ rad は、 $0 \sim \pi$ rad に比してP.S. 像を始点とするベクトルが情報伝達を担っている区間が広く、結果として提示情報を読み取り難くして読取時間を延長させたものと解釈できる。

伝達情報量の観点において今回の実験結果を考察する。角度情報が $\pi/10$ rad を1単位として伝達できるという結果は、 $-\pi \sim \pi$ という数値にコーディングされた情報の伝達という観点では、高々5bit 足らずの情報を伝えたに過ぎない。しかしながら、実験前のトレーニングを含む今回の実験過程全体を通して、被験者に正解である提示角度を知らせることはなかった。加えて、提示される触刺激の振動パターンは120種類もあって、小一時間程度のトレーニングで全ての振動パターンを記憶することはほとんど困難であった。当然、被験者は正解を知らないのも、振動パターンと角度情報とのコーディングも叶わない。にも関わらず、 $\pi/10$ rad 程度の精度で情報伝達できたことは、本実験結果が、被験

者自身が提示された触刺激から感じ取った触刺激の方向性に関する回答であって、3 触刺激素子が 2 次元ベクトルのトポロジカルな性質を、何らかの形で被験者へ伝えていたことを示唆するものである。この観点において伝達情報量は 5bit 以上、備えているものと考ええる。一方、本稿では P.S. 像の配位特性を線形と見なして情報提示のシステムを設計したが、文献 (22) が指摘する刺激部位周辺での非線形性を考慮すれば、伝達情報量の更なる向上は十分に可能と考えている。

5. ま と め

従来より 2 次元触覚ディスプレイは、触刺激素子アレイ上で情報表現するものが一般的である。一方、本研究は、3 つの触刺激素子上で生起する P.S. や仮現運動を利用して 2 次元情報を表現しようと試みている。本稿では、P.S. と仮現運動を併用したベクトル情報の提示方法を提案し、その有効性を角度情報伝達実験を通して検証した。4 名の被験者から得られた結果として、角度情報は最大 $\pi/10$ rad を 1 単位として伝達できることを確認した。

触刺激素子を少数に抑えることは、そのこと自体、多くのメリットを派生させるが、2 次元触覚ディスプレイとしての要件を満たすだけの伝達情報量は確保しなくてはならない。本稿で示した実験結果は、3 触刺激素子で 5bit 程度の伝達情報量を確保したに過ぎないが、P.S. 像の生起する位置には 3 つの触刺激素子を頂点とする三角形エリア内において自由度があるので、この点において可能性を残している。また、本稿では振幅と時間遅れを情報提示のパラメータとして採用したが、刺激強度波形のパラメータには周期も利用可能である。これらのパラメータがそれぞれ独立に機能することを考慮すれば、伝達情報量は更に向上する可能性がある。

(平成 17 年 6 月 13 日受付, 平成 18 年 10 月 23 日再受付)

文 献

- (1) C. Domenici and D. Derossi: "A stress-component-selective tactile sensor array", *Sensors Actuators*, Vol.13, pp.97-100 (1992)
- (2) B.L. Gray and R.S. Fearing: "A surface-micromachined micro-tactile sensor array", *IEEE Int. Conf. Rob. and Auto.*, Vol.1, pp.1-6 (1996)
- (3) D. Pawluk, C. Buskirk, J. Killebrew, S. Hsiao, and K. Johnson: "Control and pattern specification for a high density tactile array", *IMECE Proc. of the ASME Dyn. Sys. and Control Div.*, Vol.64, pp.97-102 (1998)
- (4) H. Tan and D.J. Reebe: "A Microfabricated Electrostatic Haptics Display for persons with Visual Impairments", *IEEE Trans. Rehabilitation Engineering*, Vol.6, No.3, pp.241-247 (1998)
- (5) M. Uchida, H. Tanaka, H. Ide, and S. Yokoyama: "A Tactile Display by 16 kinds of modulated wave vibration Used Only One PZT Vibrator", *T. IEE Japan*, Vol.120-C, No.6, pp.825-830 (2000-6) (in Japanese)
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」, 電学論 C, **120**, 6, pp.825-830 (2000-6)
- (6) T. Shiozaki, M. Uchida, H. Tanaka, A. Nozawa, and H. Ide: "The Evaluation of Cognition to the Modulated Vibration Stimulus by ERP", *T. IEE Japan*, Vol.122-C, No.9, pp.1567-1572 (2002-9) (in Japanese)
塩崎哲也・内田雅文・田中久弥・野澤昭雄・井出英人:「事象関連脳電位による変調振動刺激に対する認知評価」, 電学論 C, **122**, 9, pp.1567-1572 (2002-9)
- (7) M. Uchida, A. Nozawa, and H. Ide: "Difference Evaluation to Modulated Vibration Stimuli by Using Single Trial Waveform of ERP", *IEEJ Trans. EIS*, Vol.124, No.1, pp.73-78 (2004-1) (in Japanese)
内田雅文・野澤昭雄・井出英人:「ERP の単一試行波形を用いた変調振動刺激に対する弁別評価」, 電学論 C, **124**, 1, pp.73-78 (2004-1)
- (8) J.H. Kirman: "Tactile apparent movement: The effects of interstimulus onset interval and stimulus duration", *Perception & Psychophysics*, Vol.15, pp.1-6 (1974)
- (9) J.H. Kirman: "Tactile apparent movement: The effects of number of stimulators", *J. Experimental Psychology*, Vol.103, pp.1175-1180 (1974)
- (10) J.H. Kirman: "Tactile apparent movement: The effects of shape and type of motion", *Perception & Psychophysics*, Vol.34, No.1, pp.96-102 (1983)
- (11) G. von Békésy: "Neural Funnelling along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.31, No.2, pp.1236-1249 (1959)
- (12) D.S. Alles: "Information Transmission by Phantom Sensation", *IEEE Trans. Man Machine Systems*, MMS-11-1, pp.85-91 (1970)
- (13) K. Tanie, S. Tachi, K. Komoriya, and M. Abe: "Basic Study on Discriminability of Mental Location of Electrocutaneous Phantom Sensation", *Trans. Soc. ICE*, Vol.15, No.4, pp.505-512 (1979) (in Japanese)
谷江和雄・館 暲・小森谷清・阿部 稔:「電気パルス刺激における強度差ファントムセンセーション像の位置弁別特性」, 計測自動制御学論, **15**, 4, pp.505-512 (1979)
- (14) K. Tanie, S. Tachi, K. Komoriya, M. Abe, K. Asaba, and Y. Tomita: "Information Transmission Characteristics of Two-Dimensional Electrocutaneous Phantom Sensation", *Trans. Soc. ICE*, Vol.16, No.5, pp.732-739 (1980) (in Japanese)
谷江和雄・館 暲・小森谷清・阿部 稔・浅羽樹一郎・富田良幸:「電気刺激 3 点ファントムセンセーション像の情報伝達特性」, 計測自動制御学論, **16**, 5, pp.732-739 (1980)
- (15) R.W. Mann: "Force and Position Proprioception for Prostheses", *The Control of Upper-Extremity Prostheses and Orthoses*, pp.201-219, Charles C Thomas Publisher (1974)
- (16) A. Shirai, Y. Kume, M. Tsuda, and T. Hatada: "Haptic Phantom Sensation for Interacting with 3D Images", *Technical Report of IEICE*, IE96-119, pp.77-84 (1997) (in Japanese)
白井暁彦・久米祐一郎・津田元久・畑田豊彦:「皮膚感覚のファントムセンセーションを用いた 3 次元画像との対話システム」, 信学技報, IE96-119, pp.77-84 (1997-2)
- (17) S. Kezuka, M. Uchida, H. Tanaka, A. Nozawa, and H. Ide: "A Consideration about Figure Presentation of Tactile Display Using the Modulated Vibration", *The Papers of Technical Meeting on Instrumentation and Measurement, IEE Japan*, IM-03-82~97, pp.71-74 (2003-12) (in Japanese)
毛塚修一・内田雅文・田中久弥・野澤昭雄・井出英人:「変調振動を用いた触覚ディスプレイの図形情報提示に関する一考察」, 電気学会計測研資, IM-03-82~97, pp.71-74 (2003-12)
- (18) S. Ueda and M. Uchida: "A Basic Characteristic for a Tactile Display by Using Apparent Movement", *The Papers of Technical Meeting on Instrumentation and Measurement, IEE Japan*, IM-03-82~97, pp.75-78 (2003-12) (in Japanese)
上田真太郎・内田雅文:「仮現運動を利用した触覚ディスプレイのための基礎特性」, 電気学会計測研資, IM-03-82~97, pp.75-78 (2003-12)
- (19) A. Yamamoto, T. Izumi, S. Shirogane, S. Kojima, T. Tanaka, S. Ino, and T. Ifukube: "Two-dimensional Directional Perception Using Vibro-tactile Sense", *Human Interface Symposium 2002*, pp.21-24 (2002) (in Japanese)
山本哲正・泉隆 白銀 暁・小島 悟・田中敏明・井野秀一・伊福部達:「振動触覚刺激による二次元方位知覚特性」, ヒューマンインターフェースシンポジウム 2002, pp.21-24 (2002-9)
- (20) T. Izumi, A. Yamamoto, S. Shirogane, T. Tanaka, H. Kuroki, S. Ino, and T. Ifukube: "Directional Information Interface Using Vibro-tactile Sense", *Proc. of 8th VRSJ Annual Conference*, pp.257-260 (2003-9) (in Japanese)

泉 隆・山本哲正・白銀 暁・田中敏明・黒木速人・井野秀一・伊福部達：「振動触覚を利用した方位情報提示インターフェースの設計」，日本バーチャルリアリティ学会第 8 回大会論文集，pp.257-260 (2003-9)

- (21) K. Tukada and T. Yasumura: "Active Belt: Belt-type Wearable Tactile Display for Directional Navigation", *IPSJ Trans.*, Vol.44, No.11, pp.2649-2658 (2003) (in Japanese)
塚田浩二・安村通晃：「Active Belt:触覚情報を用いたベルト型ナビゲーション機構」，情報処理学論，**44**，11，pp.2649-2658(2003)
- (22) K. Tanie and S. Tachi: Report of Mechanical Engineering Laboratory, No.106, pp.52-85 (1980-3) (in Japanese)
谷江和雄・館 暲：機械技術研究所報告，No.106，pp.52-85 (1980-3)

上 田 真太郎 (非会員) 電気通信大学大学院 EC 科博士前期課程 (電気工学専攻) 修了。現在，トヨタ自動車 (株) 勤務。

内 田 雅 文 (正員) 1990 年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (電気工学専攻)。青山学院大学理工学部電気電子工学科助手，和歌山大学教育学部助教授を経て現在，電気通信大学電気通信学部電子工学科助教授。主に移動ロボット，生体計測，感覚代行に関する研究に従事。工博。IEEE，日本ロボット学会会員。

野 澤 昭 雄 (正員) 1997 年青山学院大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。青山学院大学理工学部電気電子工学科助手を経て，現在，明星大学電気電子システム工学科講師。主にアントアルゴリズム，生体計測，感情工学の研究に従事。電子情報通信学会会員。

井 出 英 人 (正員) 1970 年工学院大学大学院工学研究科修士課程修了 (電気工学専攻)。1985 年 UCLA 応用科学科客員研究員。1986 年 UCLA 脳研究所客員教授。感覚の計測，感覚代行の研究に従事。青山学院大学理工学部講師，助教授を経て，現在，同教授。工博。日本ロボット学会，電子情報通信学会，計測自動制御学会会員。