

## 分布圧覚ディスプレイ装置による仮想形状呈示\*

大岡 昌博<sup>\*1</sup>, 毛利 行宏<sup>\*2</sup>, 杉浦 徳宏<sup>\*3</sup>  
三矢 保永<sup>\*4</sup>, 古賀 浩嗣<sup>\*5</sup>

## Virtual Figure Presentation Using a Distributed Pressure Display

Masahiro OHKA<sup>\*6</sup>, Yukihiro MOURI, Tokuhiko SUGIURA,  
Yasunaga MITSUYA and Hiroshi KOGA<sup>\*6</sup> Shizuoka Institute of Science and Technology, Dept. of Mechanical Engineering,  
2200-2 Toyosawa, Fukuroi-shi, Shizuoka, 437-8555 Japan

A tactile display device is effective in the virtual reality and remote control systems. In the present paper, a matrix-type tactile display device is mounted on a computer mouse so that a human subject can feel virtual textures and defects by manipulating the mouse and keeping his finger on the tactile display. In order to establish a design method for the tactile display device, the authors developed a matrix-type experimental tactile display device having a 4×6 array of stimulus pins using bimorph piezoelectric actuators. In the tactile display device, 1.2, 1.9, 2.5 mm were utilized as the distances between adjacent stimulus pins. Using this tactile display device mounted on a mouse, we performed a series of psychophysical experiments with five male subjects in their twenties. It is found that distance between adjacent stimulus pins should be equal to the human two point threshold (1~2 mm) and that the present display device can display virtual figures which are more than double area of the mouse cursor.

**Key Words:** Robotics and Mechatronics, Human Interface, Biomechanics, Psychophysics, Tactile Sensing, Distributed Pressure, Presentation System

## 1. 緒 言

VR(人工現実感)<sup>(1)</sup>やテレプレゼンテーション(遠隔臨場感制御)<sup>(2)</sup>に用いるために、種々の感覚ディスプレイが開発されてきた。視聴覚に対しては、ヘッド・マウンテッド・ディスプレイやHI-FIステレオ・システムに代表されるように、完成度の高い感覚ディスプレイがすでに実現され成熟期を迎えている。これらに対して触覚については、研究段階である。しかし注目度は高く、例えば、表面粗さ感<sup>(3)(4)</sup>や材質感呈示<sup>(5)</sup>、空気噴流を用いた触覚ディスプレイ<sup>(6)</sup>、弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイ<sup>(7)</sup>、力覚呈示装置(ハプティック・インタフェース)<sup>(8)(9)</sup>など研究事例は多い。

触覚の感覚受容器は皮膚表面に広く高密度に分布していることから、感覚受容器を刺激するピン(触知ピン)を可能な限り多く用いることが有効と考えられる。

しかし、指示指一本で仮想物体に触れることを前提とすれば、触知ピンのアレイの規模を小さくできる。さらに、マウスによる入出力がおもに指一本で操作されていることに着目すると、触覚ディスプレイを搭載するポインティング・デバイスとしてマウスを選定すれば、呈示範囲が指示指に制限されても操作上違和感は少ない。このようなマウス搭載形の触覚ディスプレイ装置は有効と考えられ、この形式の呈示装置が2, 3提案されている<sup>(4)(10)(11)</sup>。しかし、これらの研究では、装置開発や呈示法を主たる目的としており、後続の研究者が設計する上で必要な情報、すなわち触知ピンアレイの触知ピン間隔や呈示可能な仮想物体のサイズなどについての検討は十分でない。

そこで本研究では、マウス搭載形の触覚ディスプレイ装置のヒューマン・インタフェースとしての基本特性を検討して、同ディスプレイ装置の設計データを得る。触覚ディスプレイとして種々の形式が考えられるが、ここでは触知ピンアレイをマウスに搭載し、アレイと指先の間で相対運動を生じないようにアレイに指を押し当ててマウスを操作する方式を触知ピンアレイ搭載マウスと呼び、これについての設計法を検討する。この触知ピンアレイ搭載マウスに仮想的な凹凸情報(仮想テクスチャ)を呈示するための第一段階とし

\* 原稿受付 2001年9月20日。

<sup>\*1</sup> 正員, 静岡理工科大学理工学部(☎437-8555 袋井市豊沢2200-2)。<sup>\*2</sup> トヨタ自動車(株)(☎448-8572 豊田市トヨタ町1)。<sup>\*3</sup> 三重大学情報センター(☎514-8507 津市上浜町1515)。<sup>\*4</sup> 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科(☎464-8306 名古屋市千種区不老町)。<sup>\*5</sup> 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: ohka@me.sist.ac.jp

て、ここでは仮想テクスチャの構成要素である仮想図形を呈示する場合を検討する。このため、市販の点字表示用セルを改良し、触知ピン間隔に関して、1.2 mm, 1.9 mm, 2.5 mm となる3種類の呈示装置を設計製作した。これらを用いて仮想図形を認識する心理物理実験を行い、その正答率と判断時間より最適な触知ピン間隔を求め、別途求めた指先の二点弁別閾との関係を検討した。また、マウス移動対触知ピン比<sup>(1)</sup> (以後 HMP 比 hand-movement-to-pin ratio) が、仮想図形の認識正答率へ及ぼす影響を調べ最適な HMP 比を求めた。さらに、本システムで呈示できる仮想図形の最小サイズについても検討した。

## 2. 実験装置

**2.1 マウス搭載形分布圧覚呈示システム** 本研究のマウス搭載形分布圧覚呈示システムを図1に示す。本システムは触知ピンアレイ搭載マウス、自作した制御回路、コンピュータ (Gateway 社製, OS: Windows 2000), コンピュータに内蔵されたデジタル I/O ボード (インタフェース社製, PCI-2431) などから構成されている。

**2.2 分布圧覚呈示機構** 本研究では、微小電流、軽量、無発熱の利点を重視して、バイモルフ形 piezo

アクチュエータを呈示機構のアクチュエータとして採用する。このため、点字表示装置 (KGS 社製, SC-2) を基礎として装置開発を行った。図2に示すように、この装置には、幅、長さ、厚さがそれぞれ 1.9 mm, 55 mm, 0.65 mm のバイモルフ形 piezo アクチュエータが8個配列されている。この piezo アクチュエータは、1 mm 程度の大きな湾曲変位を触知ピンへ与えることができる。

しかし、この装置は点字を呈示することが目的であるため、図3に示すように 2.4 mm と 4.0 mm の2種類の触知ピン間隔がある。さらに、2.4 mm の触知ピン間隔は、二点弁別閾 (皮膚に加えられた2箇所刺激を分離して検出できる限界値で後述するように 1.7 mm 程度) と比較して大きい値である。したがって、仮想図形を呈示するためにはこのままでは不十分である。

本研究では、図4に示すように触知ピン間隔が 1.2 mm, 1.9 mm, 2.5 mm の計3種類の分布圧覚呈示装置を作成した。このマウス搭載形分布圧覚呈示装置は縦 120 mm, 幅 60 mm, 高さ 25 mm のケースにマウス (サンワサプライ社製, MA-445 OPU) の位置計測部分と前述の分布圧覚呈示装置を納めている。本研究では、この触知ピン間隔の最適値を求めるために、24本の触知ピン間隔が等間隔の 4×6 のマトリクス状に配列した触知ピン・アレイ部 (4.5×6.9 mm, 6.6×

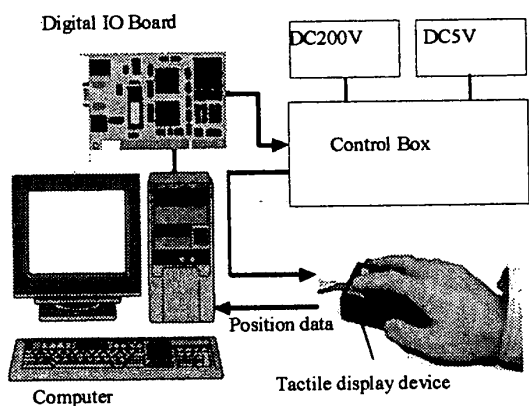


Fig. 1 Tactile presentation system

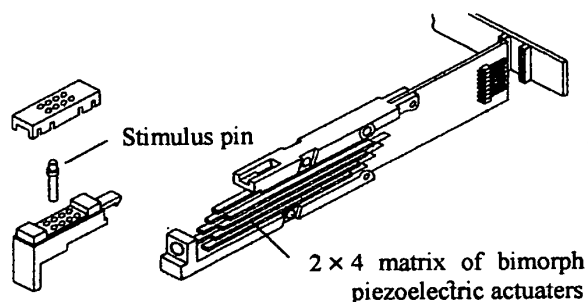


Fig. 2 Braile dots presentation device (KGS, SC2)

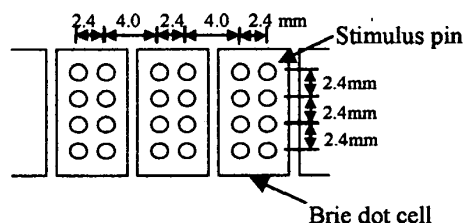


Fig. 3 Distances between two stimulus pins of the original presentation device SC 2

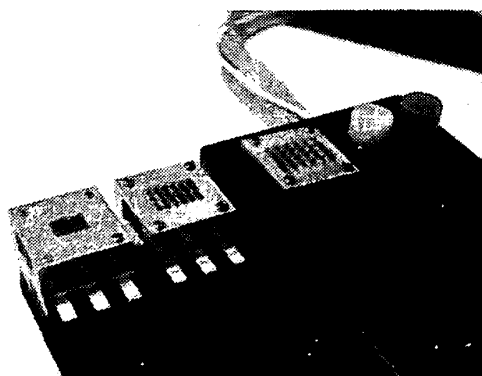


Fig. 4 The present tactile presentation devices

10.4 mm, 8.1×12.9 mm)を設計・製作した。

**2・3 仮想図形呈示ソフトウェア** 本システムは、Visual Basic(Ver. 6)で開発されたプログラムにより仮想触覚情報を作り出している。パソコンの画面上のマウスカursorを分布圧覚呈示部と同様な4×6のマトリックス状の格子に変え、マウスカursorの4×6個の格子をそれぞれ分布圧覚呈示装置の触知ピンの1ピンに対応させている。図5に示すように、4×6の格子状マウスカursorの下に位置するビットマップのRGB値を読み取り、その明度が0(黒)であれば、対応する触知ピンを押し上げる信号をDIO(Digital Input and Output)から制御回路に送るようにした。したがって、本呈示装置の触知ピン・アレイ部の上に指を接触させた状態でマウスを動かせば、図6に示すように触知ピンが押し上げられるので仮想図形のエッジ部を感じることができる。なお、触知ピンのon-off状態の更新時間は約100msである。

### 3. 実験方法

**3・1 被験者** 以下の3・2～3・5節の実験の被験者は、それぞれ晴眼者の男性5名、4名、4名、6名である。平均年齢は3・1節の実験では22歳で、それ以外では23歳であった。全被験者とも右利きで、マウスの使用歴は1年以上であった。

**3・2 二点弁別閾の測定** 本実験は、本システムの触知ピン径による刺激に対する利き手人差し指皮膚面で触覚二点弁別閾を測定することを目的とする。予備試行として極限法を用いて二点弁別閾の上限閾と下限閾を求め、上限閾以上および下限閾以下の刺激を含む等間隔の変化刺激として1.0 mm, 1.3 mm, 1.6 mm, 1.9 mm, 2.2 mmの5種類を選定した。これらの刺激を用いて本試行では恒常法によって行った。

5種類の刺激を各10回(合計50回)ランダムに呈示する。本システムで用いられている触知ピンをノギスに取付けた実験装置を用いて被験者の指を2点同時に刺激した。また刺激は四肢に沿って縦方向と横方向の

2種類行った。実験者は指先皮膚面の部位に水性インクでポイントをつけておき、先端の一方は常に同じ位置(インクのポイント)を刺激する。刺激の強さを常に一定に保ち、試行間隔は3～5秒とした。

**3・3 最適なHMP比(マウス移動対触知ピン比)の測定** HMP比とは、マウス搭載形分布圧覚呈示装置を用いて、パーソナルコンピュータ画面上にある仮想図形の触覚情報を認識する際に、画面上のマウスカursorとマウスの移動速度の比を表すものである。分布圧覚呈示装置上の触知ピンの凸凹状態を1ピン分変位させるのに要するマウスの移動量をHMP比(マウス移動対触知ピン比)と定義する。HMP比が小さいほど、わずかな手の動きで図形情報が変化するので図形情報の密度を高くできる。一方で、図形をとらえ続けるのに被験者はより巧緻なマウス操作が求められ、図形が分布圧覚呈示装置の呈示領域から逸脱する可能性が高くなる。なお触知ピン一つはパーソナルコンピュータ画面上では8×8 pixelの格子状マウスカursorで表されている。

本実験では、最適なHMP比を求めるために、16, 8, 2, 1, 0.66, 0.482, 0.323, 0.24, 0.19 mm/pinの9種類のHMP比を選定した。被験者に呈示する刺激として、円、正三角形、正四角形の3種類の図形を選定し、各図形について外接円の直径が50, 70, 90, 110, 130, 150 pixelとなる6種類の大きさを用意した。合計18種類の図形から無作為に12個を選び被験者に呈示した。被験者はパソコン画面を見ることなく、触覚情報のみで図形を判別し、図形の特徴をはっきり識別した時点で実験を終了させ、触った図形と一致する図形を強制選択させた。実験中は回答の正誤を被験者に伝えなかった。9種類のHMP比について、3種類の触知ピン間隔で計27回の実験をし、その正答率、判断

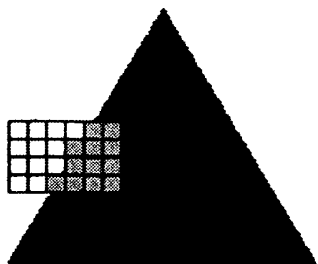


Fig. 5 Virtual triangle and a cursor of a mouse

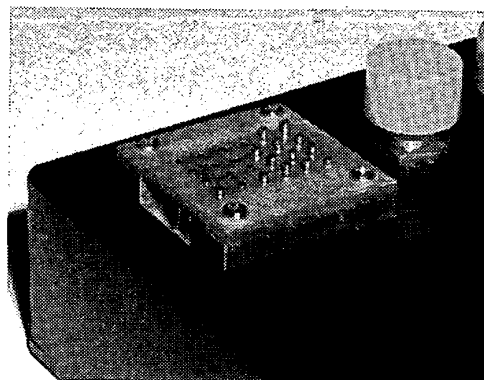


Fig. 6 Extruded stimulus pins on the tactile display panel according to the mouse cursor traveling on the virtual figure

時間を求めた。

**3・4 最適な触知ピン間隔の測定** 最適な触知ピン間隔を求めるために、触知ピンの間隔を変化させ図形の識別精度や反応時間を調べる。3種類の分布圧覚呈示装置の触知ピン数は24本と同一であるが、触知ピン間隔は1.2 mm, 1.9 mm, 2.5 mmとそれぞれ異なるため、呈示面積はそれぞれ31.1, 68.6, 104.5 mm<sup>2</sup>となっている。そこで、呈示面積が同一となる条件で、触知ピン間隔と図形の識別精度の関係を調べた。24本の触知ピン一部の一部を動作しないようにして、呈示面積を調節した。

このとき、呈示面積が31.1 mm<sup>2</sup>と小さいものを104.5 mm<sup>2</sup>の大きいものに合わせるができない。このため、31.1 mm<sup>2</sup>の呈示面積については、1.2 mm, 1.9 mm, 2.5 mmの3種類の触知ピン間隔で実験を行うことができたが、68.6 mm<sup>2</sup>の呈示面積については1.9 mmと2.5 mmの2種類の触知ピン間隔でのみの比較実験となった。

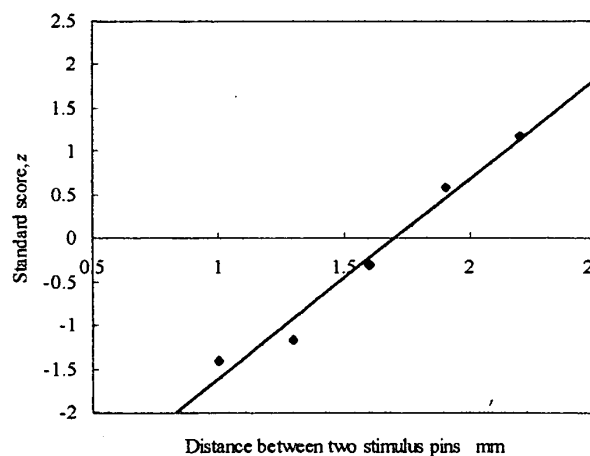
被験者に呈示する刺激として、各図形につき6種類の大きさのある円、正三角形、正方形の3種類、計18種類の仮想図形を用意した。このとき、呈示する図形のサイズについては、外接円の直径が50, 70, 90, 110, 130, 150 pixelとなるように設定した。これらをランダムに2回ずつ計36個の図形を呈示した。被験者はCRT画面を見ることなく、触覚情報のみで図形を判別し、図形の特徴をはっきり識別した時点で実験を終了させ、触った図形と一致する図形を強制選択させた。実験中は回答の正誤を被験者に伝えなかった。

**3・5 呈示できる仮想図形サイズの測定** 本システムで呈示できる最小の図形サイズを求めることを目的として、1.2 mm, 1.9 mm, 2.5 mmの3種類の触知ピン感覚について図形の判定精度を調べた。パーソナルコンピュータ画面上のマウスイカーソル(走査面積)の大きさは33×49 pixelとした。呈示する刺激として、各図形につき6種類の大きさのある円形、正三角形、正方形、正五角形、正六角形の5種類を選定し、各図形について外接円の直径が50, 70, 90, 110, 130, 150 pixelとなる6種類の大きさを用意した。これらをランダムに2回ずつ計60個の図形を被験者に呈示した。被験者はパーソナルコンピュータ画面を見ることなく、触覚情報のみで図形を判別し、図形の特徴をはっきり識別した時点で実験を終了させ、触った図形と一致する図形を強制選択させた。実験中は回答の正誤を被験者に伝えなかった。3種類の触知ピン間隔でそれぞれ3回ずつ計9回の実験をして、その正答率、判断時間を求めた。

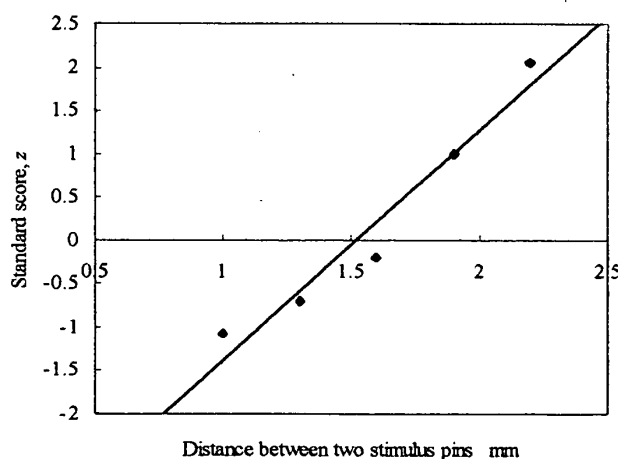
#### 4. 実験結果と考察

**4・1 二点弁別閾と最適な触知ピン間隔** 2点と感じた刺激の判断確率を求め、2点と感じた距離と標準得点 $z$ との関係を最小二乗法を用いて直線化した結果を図7に示す。図7において $z=0$ と最小二乗法による近似直線との交点から、利き手人差し指皮膚面における横方向と縦方向の二点弁別閾は、それぞれ1.5および1.7 mmであった。

二点弁別閾は、触知ピン間隔の最適値と関連があると予想される。そこで次に、呈示面積31.1 mm<sup>2</sup>の場合の各触知ピン間隔における図形認識の正答率と判断時間を図8に示す。これより触知ピンが1.2 mm間隔で配置されたモジュールと1.9 mm間隔で配置されたモジュールを比べると図形認識の正答率はそれぞれ85.4%, 86.1%であり、正答率の差はほとんど見られない。一方、2.5 mmの触知ピン間隔では図形認識



(a) longitudinal direction



(b) traverse direction

Fig. 7 Two-point threshold

の正答率は74.3%と低下するとともに、判断時間も22.8秒と上昇している。

前述の二点弁別閾は、ヒトの触覚の空間分解能に対応しており、2.5 mmの触知ピン間隔は、二点弁別閾より広いため、ヒトが有する分解能に比べて粗い触覚画像を指先に呈示したことになり、1.2および1.9 mmの場合と比較して仮想図形の判定が困難なため低正答率と高消費時間の結果になったと考えられる。しかし、2.5 mmの触知ピン間隔のモジュールを用いて、約31.1 mm<sup>2</sup>の面積で分布圧覚を呈示すると、その触知ピン数は6本しかない。このように触知ピンの密度が小さい場合に呈示面積があまりに小さいと、図形を判断する上で必要な情報量が十分でないため判定を困難にしたとも考えられる。

そこで、十分な呈示面積の場合を検討するため、呈示面積を68.6 mm<sup>2</sup>と拡大した場合の図形認識の正答率、判断時間を図9に示す。被験者の指の接触面を別途計測した結果、接触部の横幅の平均は11.2 mmであり、呈示面積68.6 mm<sup>2</sup>の場合の呈示部の横幅10.4 mmとほぼ等しく、十分な呈示面積が確保されていると考えられる。図9について1.9 mm間隔と2.5 mm間隔の結果を比べると、図形認識の正答率はそれぞれ91.0%と81.3%であり、1.9 mm間隔の正答率が10%程度高い。なお、判断時間はそれぞれ14.4、14.7秒と同程度であった。このように、十分な呈示面積の場合についても、触知ピン間隔2.5 mmでは間隔が広すぎる事がわかる。

以上の検討から、触知ピン間隔を1.9 mm以下にする必要がある。この触知ピン間隔1.9 mmは、前述の二点弁別閾1.7 mmとほぼ等しい。したがって、触知ピンアレイ形呈示装置に仮想図形を呈示する場合に、二点弁別閾よりピン間隔を狭める必要がないことがわかった。

**4.2 最適なHMP比** 本システムで図形を識別する際のHMP比(マウス移動対触知ピン比)が正答率や判断時間に与える影響を図10に示す。なお、この図の正答率と判断時間は三つの呈示装置の平均値である。図10から、正答率とHMP比の関係を調べると、正答率には極大値があることがわかる。HMP比が3種の触知ピン間隔の平均における図形認識の正答率について一元配置分散分析を行うと、HMP比の変化の有意な影響が認められた( $F_{3,2}(0.05)=3.26, p<0.05$ )。

多重比較としてテューキーの $q$ 検定(5%)を行ったところ、0.19 vs. 0.48, 0.66, 1, 2, 8 mm/pinおよび、16 vs. 0.66, 1, 2, 8 mm/pinの各水準間で有意な差が

認められた。これらの検討から、最も高いHMP比と最も低いHMP比の正答率はほかのHMP比のときの正答率との差が有意である。しかし、それ以外のHMP比0.32, 0.48, 0.66, 1, 2, 8 mm/pinでは有意な差はない。これらのHMP比では正答率はいずれも80%を上回っているので正答率だけで判断すると

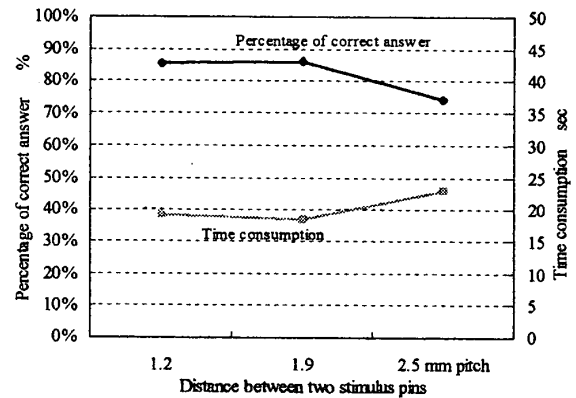


Fig. 8 Relationship between percentage of correct answer and distance of two adjacent stimulus pins (display area: 31.1 mm<sup>2</sup>)

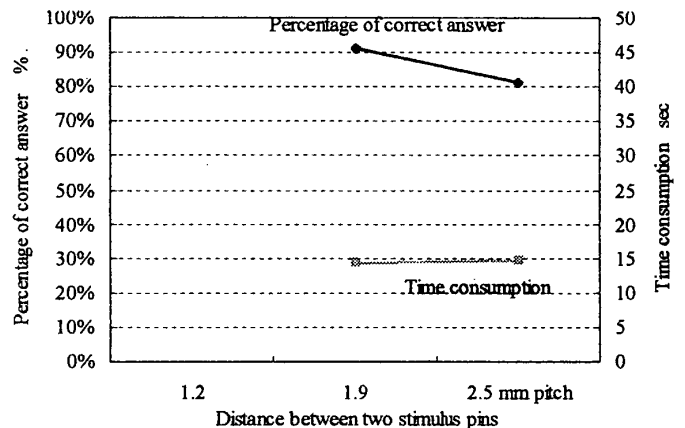


Fig. 9 Relationship between percentage of correct answer and distance of two adjacent stimulus pins (display area: 68.6 mm<sup>2</sup>)

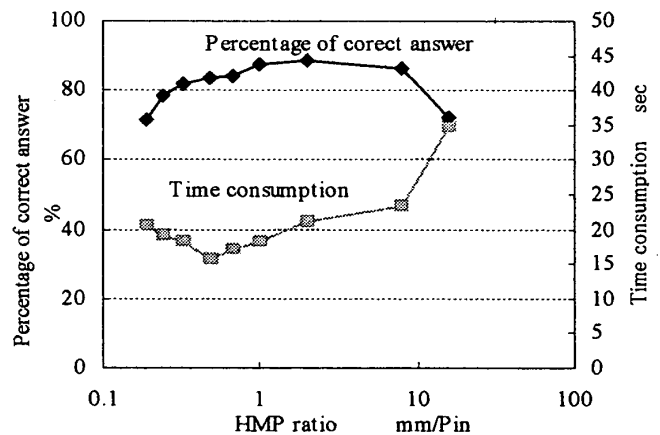


Fig. 10 Determination of an optimal HMP ratio

どの HMP 比を採用しても問題はなさそうに思われる。しかし、判断時間が長いということは、呈示された図形がわかりにくいことを意味している。そこで、判断時間が最小となる条件を調べると、図 10 からわかるように、HMP 比が 0.48 mm/pin のとき最小値 15.6 秒をとる。このため、これを本システムでの最適な HMP 比とした。なお、前述の最適なピン間隔を求めるための実験と以後の呈示できる最小の基本図形サイズの実験では、この HMP 比 0.48 mm/pin を用いて行った。

**4.3 呈示できる仮想図形サイズ** 本システムで認識できる仮想図形の正答率と判断時間を心理物理実験より求めた。仮想図形の面積とマウスカーソルの面積比(以下面積比)を横軸にとって、得られた結果を図 11 に示す。図 11 では、仮想図形 5 種類の平均値が示されている。

まず、触知ピン間隔が 1.9 mm の場合の正答率の関係を調べると、面積比 1.5 で屈曲する 2 直線で近似できる関係であることがわかる。触知ピン間隔 2.5 mm の場合もほぼ同様な関係であり、触知ピン間隔 1.9 mm と 2.5 mm の結果はほぼ一致している。これに対して、触知ピン間隔 1.2 mm の結果は、屈曲点が面積比 2 に移動している点と正答率の値が全体に低い点で上述の 2 者と異なるものの、2 直線近似が可能である傾向は一致している。正答率曲線が 2 直線で近似できることは、識別の容易度がある面積比を境に変化していることを意味しており、触知ピン間隔 1.9 mm と 2.5 mm については、面積比が 1.5 以上、1.2 mm については 2 以上で面積比の増加による正答率の増加の割合が顕著に減少している。

以上の検討と安全側を採用することを考慮して、マウスカーソルとの面積比 2 の図形が呈示可能な最小図

形であるとする。面積比が 2 以上であれば、触知ピン間隔が 1.9 および 2.5 mm のモジュールについては、80%以上の正答率、1.2 mm のモジュールについても 70%以上の正答率を確保できている。判断時間について調べてみても、面積比が 2 以上であれば、判断時間はほぼ一定であり、2 以下であれば仮想図形が小さくなるにつれて判断時間が長くなっていることからこの面積比 2 が妥当な基準であることがわかる。

## 5. 結 言

コンピュータ・マウスに分布圧覚呈示装置を搭載することによって触覚呈示システムを開発し、一連の心理物理実験によって仮想図形呈示における基本特性を調べ、仮想図形呈示に用いる場合の触知ピンレイ搭載マウスの設計データをいくつか得た。本研究の成果を以下に要約する。

(1) 触知ピンを等間隔に 4×6 マトリックス状に配置したマウス搭載型分布圧覚呈示装置を設計・製作し、本マウスの触覚呈示部に指示指を接触させた状態で動かせばパーソナルコンピュータ画面の仮想図形を触覚情報として感じることができシステムを開発した。

(2) 仮想図形認識において、二点弁別閾である 1.7 mm より触知ピン間隔を狭めても、正答率の向上が認められないことから触知ピン間隔は 1.7 mm 近傍に最適値があることが明らかとなった。

(3) 図形認識や図形をなぞる際にマウスカーソルの移動量を決定する上で重要な HMP 比について、正答率と判断時間に関してその変化を調べた。その結果、0.48 mm/pin が最適値であることがわかった。

(4) 本システムで呈示できる図形の最小サイズを調べた。その結果、マウスカーソルの面積に対して 2 倍の面積を有する仮想図形が最小であることがわかった。

本研究の一部に平成 13 年度文部科学省科学研究費基盤研究 B(13558045)、東海技術振興財団および三豊財団の研究助成金を用いたことを感謝する。なお、被験者として協力をいただいた名古屋大学大学院工学研究課修士課程学生青山慶氏、川村淳氏、伊藤伸太郎氏、山本壮俊氏に謝意を表す。

## 文 献

- (1) 館暉・伊福部達編, パーチャルリアリティの基礎 4 人工現実感の評価, (2000), 1-92, 培風館.
- (2) Tachi, S. and Yasuda, K., Experimental Evaluation of Tele-Existence Manipulation System. *Proc. 1993 JSME Int. Conf. on Advanced Mechatronics*, (1993),

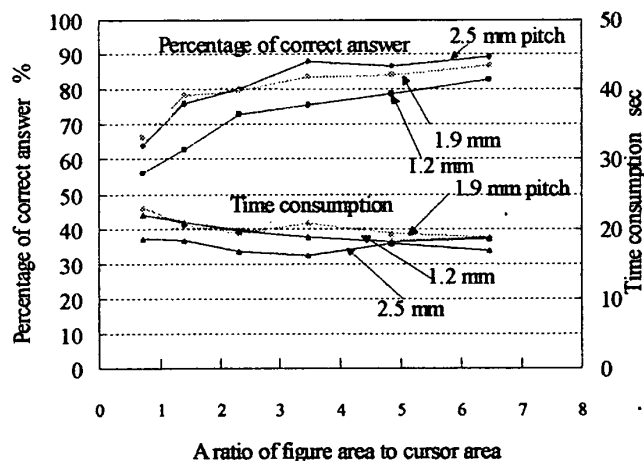


Fig. 11 Minimum size of virtual figures

- 110-115, Tokyo, Aug.
- (3) Ohka, M. and Muramatsu, Y., Fine Texture Presentation System for Tactile Virtual Reality, *Proc. of WMC1999*, (1999), 57-62.
- (4) 池井寧・福田収一, 触覚ディスプレイのための画像データ変換, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 5-4 (2000), 1-7.
- (5) 井野秀一・泉隆・高橋誠・伊福部達, 物体接触時の皮膚温度変化に着目した材質触覚ディスプレイ方式の提案 (感覚フィードバック型ハンドのための基礎研究), 計測自動制御学会論文集, 30-3 (1994), 345-351.
- (6) 雨宮賢一・篠原英一・田中豊, 空気噴流を用いた装着型触覚ディスプレイ, 日本機械学会 1999 年度年次大会講演論文集 (II), 99-1 (1999), 207-208.
- (7) Takasaki, M., Nara, T., Tachi, S. and Higuchi, T., A Tactile Display Using Surface Acoustic Wave, *Proc. 2000 IEEE Int. Workshop on Robot Human Interactive Comm.*, (2000), 364-367.
- (8) 井野秀一・泉隆・伊福部達, ヒトの感覚特性に基づいたハプティックインタフェースの開発, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 1-4 (1999), 9-17.
- (9) 並木隆生, ハプティック・バーチャルリアリティ PHAN-ToM 実演, IT 革命を支えるセンサ・アクチュエータ技術, 講習会 No. 01-34, (2001), 35-42.
- (10) 坂巻克己・塚本一之・岡村浩一郎・内田剛・小勝ゆかり, 2次元リニアアクチュエータを用いた触覚呈示システム, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, 1-5 (1999), 83-86.
- (11) 渡辺哲也・久米祐一郎・伊福部達, 触覚マウスによる図形情報の識別, 映像情報メディア学会誌, 54-6 (2000), 840-847.