

高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状仮想テクスチャ呈示* (第2報, 触知ピン間隔, テクスチャ密度および畝高さの検討)

大岡 昌博^{*1}, 古賀 浩嗣^{*2}
宮岡 徹^{*3}, 三矢 保永^{*4}

Virtual Lattice Texture Presentation Using a Tactile Mouse Featuring a Fine Pin Array

(2nd Report, Examination on Pin Pitch, Texture Density and Ridge Height)

Masahiro OHKA^{*5}, Hiroshi KOGA,

Tetsu MIYAOKA and Yasunaga MITSUYA

^{*5} Graduate School of Information Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8601 Japan

In the previous study, we developed a tactile mouse featuring a fine pin array, the purpose of which is to be effective in virtual reality and tele-existence systems. It features an 8-by-8 array of stimulus pins each measuring 0.3 mm in diameter and with a 1.0- or 1.8-mm pin pitch. Since the stimulus pins within the display's pads can be made to protrude above the pad's surface and their motions are controlled by piezoelectric actuators, the operator can feel various combinations of pins protruding according to the surface texture of the virtual object. In order to establish a design method for the tactile displays, we performed a series of psychophysical experiments using the display. By evaluating variation in threshold for discriminating crossed angles of virtual lattice textures under different pin arrays, texture density, and pin strokes, we determined suitable pin pitch, presentable density and ridge height of the virtual texture. It was found that the two-point threshold should be adopted as the pin pitch between pins in the design of the tactile display. The presentable density and ridge height of the virtual textures were $N=50$ and $\delta=0.3$ mm. Finally, we compared the discrimination precision of virtual textures with those of real textures to evaluate the present tactile display's presentation quality. Since the difference threshold for the real texture was 1/3 that of the virtual texture, the present tactile display should be improved with respect to shearing force presentation to simulate relative motion feeling between the finger surface and virtual object surfaces.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Human Interface, Human Engineering, Psychophysics, Tactile Mouse, Fine Pin Array, Lattice Texture, Distributed Pressure Presentation, Texture Density, Ridge height, Real Texture

1. 緒 言

高度な触覚呈示技術を確立することを目的として、著者らの解説⁽¹⁾⁽²⁾や前報⁽³⁾で紹介したように、種々のアクチュエータを利用した触覚ディスプレイの研究が進められている。前報では、触覚ディスプレイ装置の評価方法の確立や触覚ディスプレイ装置の設計データを得るために、8×8のピンアレイ形触覚ディスプレイを開発した⁽³⁾。このディスプレイ装置では、ピン径300 μmの触知ピンを8×8のマトリックス状に配置して、それをバイモルフ形PZTアクチュエータで駆動することによって分布圧覚を呈示できるようにしている。テクスチャ呈示を可能とするため、直径300 μmの触知ピンを用いる場合の触知ピン間隔として最小に近い触知ピン間隔1 mmの触覚ディスプレイを開発した。比較のために1.8 mmの触知ピン間隔のディ

スプレイも製作した。

次に、開発したディスプレイ装置の有効性を確認するための心理物理実験法⁽⁴⁾について検討した。そこでは恒常法と調整法について格子状テクスチャの交差角の主観的等価値と弁別閾^{いき}を求める実験を行った。その結果、これらの値について両者の手法の間に差異は認められなかったが、実験に要した時間を比較すると調整法のほうが約1/4の時間で実験が完了することから、呈示装置の性能評価には、調整法が適していることがわかった。

本研究では、前報の後続の研究として、主に調整法に基づいた実験を実施して詳細な検討を行う。まず、触覚ディスプレイの基礎データを得ることを目的に、触知ピンのストロークおよび分布密度がテクスチャ呈示能力に与える影響を調整法により調べる。また、本システムを用いて仮想テクスチャを生成するソフトウェア構築に活用する目的から、呈示可能なテクスチャ密度の限界を調べる。最後に、仮想テクスチャに相当な実テクスチャを製作して、実テクスチャを用いた心理物理実験を行い、本触覚ディスプレイのリアリティの度合いを評価する。

* 原稿受付 2005年4月20日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院情報科学研究科(☎464-8601 名古屋千種区不老町)。

^{*2} (有)ナイズ。

^{*3} 静岡理工科大学理工学部(☎437-8555 袋井市豊沢2200-2)。

^{*4} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: ohka@is.nagoya-u.ac.jp

2. 実験装置

前報で設計製作したピンアレイ形触覚ディスプレイを図1に示す。このディスプレイでは、点図セル(KGS社製、型式:SC5)を採用し、光学マウスの発光・受光部と点図セルを同一ケース内に組込んだ。触覚ピンアレイ規模は、 8×8 であり各触知ピンの上下動は、最大1mmである。この運動は、内蔵されたバイモルフ形PZTアクチュエータにより生成される。隣り合う触知ピンの間隔は、SC5では3mmである。この間隔を1mmまで狭めるために開発した間隔変換アダプタを図2に示す。図2には、最適なピン間隔を求めるために製作した1.8mmピッチに変換する変換アダプタも示されている。図2には、矩形の領域で呈示面積が示されている。

システムは、デジタルIOボード、コンピュータから構成されている。CRT上のマウスマウスカーソルが仮想テクスチャの上を通過すると、明度の値に対応した変位を触知ピンアレイ上に呈示する。操作者は、触知ピンアレイ形触覚ディスプレイ装置搭載マウスの触知ピンアレイ部に、指示指を接触させた状態で仮想テクスチャの上にマウスカーソルが位置するようにマウスを操作すれば、凹凸情報を感じ取ることができる。前報⁽⁵⁾の触覚ディスプレイ装置における触知ピンの上

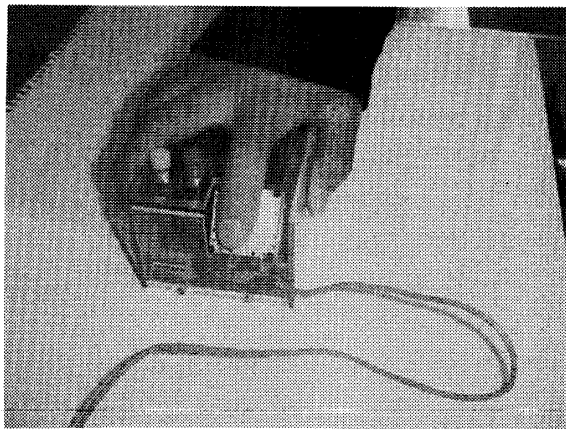


Fig. 1 Tactile display mounted on a mouse

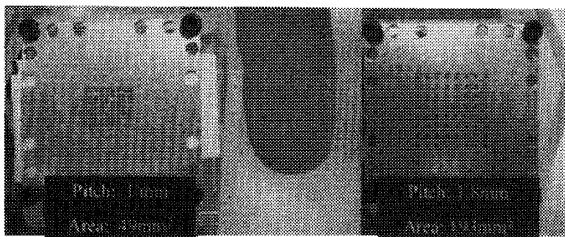


Fig. 2 Tactile display pads (left: 1-mm type, middle: a finger for comparison, right: 1.8-mm type)⁽⁵⁾

下運動は on-off 制御であったが、駆動回路を改良して中間値も呈示できるようにした。

3. 心理物理実験法

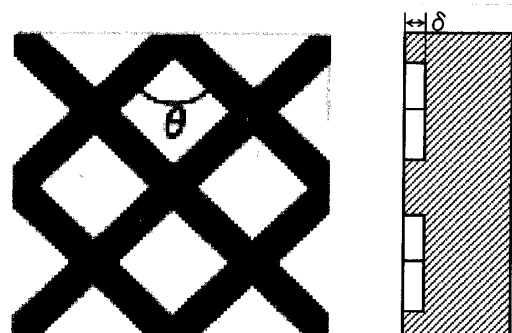
仮想テクスチャ・パターンは、図3に示すように格子状であり、黒い部分が畝となっており、畝が交差する角度を交差角 θ と呼ぶことにする。実験では、この交差角について被験者の弁別閾を測定した。

この弁別閾の計測法として、前報では、恒常法と調整法を比較検討して、その結果、両者で計測された弁別閾の間に差がほとんどなかったことがわかった。実験に必要な時間が恒常法のそれと比較して、約1/4であることを重視して本研究では一部の実験を除いて調整法を採用することにした。

調整法では、標準刺激となるテクスチャ・パターンと比較刺激となるテクスチャ・パターンを交互に触察して、両者が一致するように被験者自らが調整する。

すなわち、図4に示す自作の仮想テクスチャ呈示ソフトウェアを用いて、同時に仮想テクスチャを二つ呈示する。画面左側に標準刺激となる仮想テクスチャ、画面右側に比較刺激となる仮想テクスチャを配置した。被験者は、これら二つの仮想テクスチャを触察し、違いがあると判断するならば比較刺激を任意に調整することができ、二つの仮想テクスチャが一致したと判断できるまで1回の実験を続ける。なお、キー操作により、比較テクスチャの交差角の値を被験者は自由に変更できる。また、特別なキー操作をしない限りマウスカーソルは標準テクスチャあるいは比較テクスチャの枠内から逸脱することはなく、キー操作によりマウスカーソルは両枠の間を行き来することができる。したがって、被験者は標準テクスチャと比較テクスチャの触察を自由に切換えることができる。

以上の弁別閾測定は、触知ピン間隔、テクスチャ密



(a) Top view (b) Cross section (side view)

Fig. 3 Crossed-axis angle

度および畝の高さの条件を変更して行った。これらのうち、テクスチャ密度は $\theta=90^\circ$ の場合に畝が正方形の呈示領域を交わる数 N で表す。例えば、図4の左のテクスチャでは、 $N=30$ であり、 N が大きくなるほどテクスチャは細くなる。また、図3(b)に示すように畝高さを δ で表し、無負荷の場合のその最大値は約1 mmであった。

なお、図2中の正方形で示す呈示面を図4の仮想テクスチャ上で示すと、左の標準テクスチャ内で示された小さな正方形領域となる。図1に示すようにマウスの呈示面に指を載せた状態でマウスを動かすと、前述の小さな正方形領域もそれに伴って移動する。静的には粗い呈示であっても、被験者は呈示領域を自由に動せるので対象を細かく調べることができる。

また、本実験の被験者は、晴眼者の男性7名、平均年齢は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。また、実験はすべて触覚だけを頼りに行い、実テクスチャの場合はアイマスクを着用し、その他の条件では被験者がCRTの表示を見ることができないようにして実験を行った。

4. 触知ピン間隔と呈示能力の関係

4.1 実験方法 最適なピン間隔を求めるため、1 mmのピン間隔(以下の図・表中では、1.0 mm pitch display と呼ぶ)および1.8 mmのピン間隔(以下、1.8 mm pitch display と呼ぶ)のほかに、1.8 mmのピン間隔で呈示面積を1 mmのピン間隔変換アダプタと等しくするために、64本の触知ピンの中で39本のピンを動作させないようにしたもの(以下、S1.8 mm pitch display と呼ぶ)の3条件で実験を行った。

この実験では、 $N=30$ 、 $\theta=90^\circ$ 、 $\delta=1$ mmの標準テ

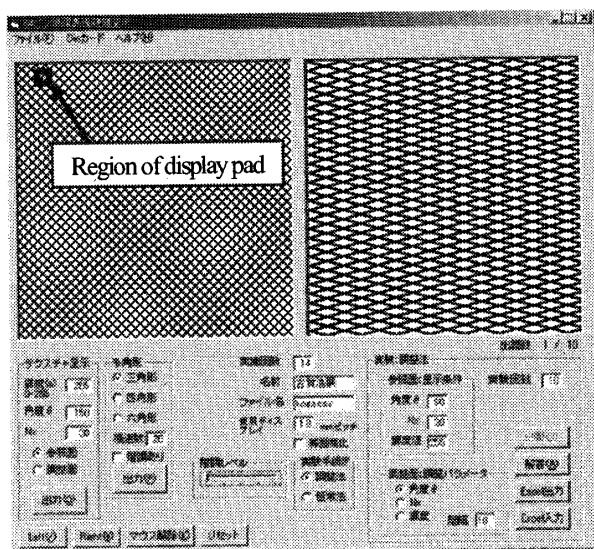


Fig. 4 Software for the presentation experiments

クスチャを用いた。比較テクスチャの初期状態は、 $10^\circ \sim 170^\circ$ の間で 10° 間隔でランダムに選択した交差角 θ で呈示される。被験者は標準テクスチャと一致するように上昇あるいは下降キーを押して θ の値を調整する。そのときの θ の変化量は 10° とした。被験者1人につき、一つの触覚ディスプレイに対して以上の実験を10回ずつ行った。

4.2 実験結果と考察 被験者により調整された比較刺激の交差角について累積確率 p を求め、それと交差角の関係を図5に示す。図5を見てわかるように、どの触覚ディスプレイの結果も典型的な ogive 曲線(正規分布を積分して得られる分布)となっている。このことから、すべての実験条件において、良好な状態で弁別閾付近での実験が行われたことが推測できる。このように累積確率が ogive 曲線と類似な傾向を有する場合に、縦軸の値を Z 得点(z -score: 標準得点)に変換すると線形化できることが知られている。

そこで、図5の結果から弁別閾などを求めるために、累積確率を標準得点 Z に変換した結果を図6に示す。図6を用いて、 $Z=-0.6745$ (累積確率 $p=0.25$ に相当)、 0 ($p=0.5$)、 0.6745 ($p=0.75$) の点における刺激強度を読み取った。以上の操作により得られた、主観的等価値(PSE: Point of subjective equality)および弁別閾(DT: Differential threshold)を含めて表1に示す。

表1からわかるように、三つの触覚ディスプレイから得られた弁別閾はそれぞれ $11^\circ \sim 13^\circ$ であり、ほぼ同じ値である。また、主観的等価値は $84^\circ \sim 88^\circ$ の範囲にあり、これについてもディスプレイ間において大

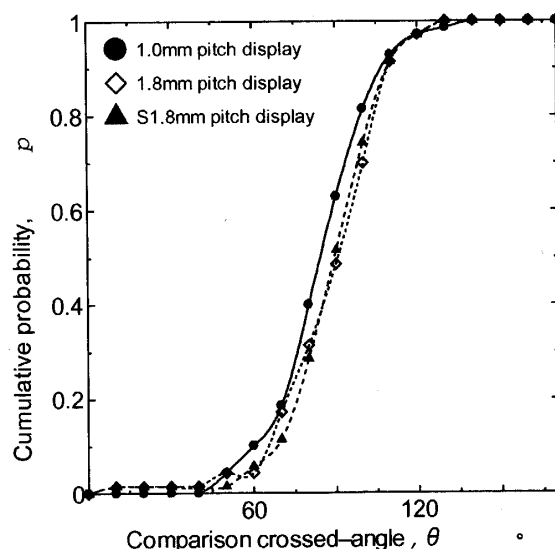


Fig. 5 Ogive curves obtained from experiments performed to evaluate optimal pitch of stimulus pins

きな差異はない。

したがって、ピン間隔が1.8 mm以下であれば、呈示精度は飽和していると考えられる。仮想図形とピン間隔の関係を調べた前報⁽⁴⁾においても1.7 mmの二点弁別閾より触知ピン間隔を狭めても呈示性能に変化がないことがわかっている。テクスチャについてもこの結論が適用でき、二点弁別閾が呈示装置の仕様の一つであるピン間隔の設計値として使用できることがわかる。

なお、本呈示装置の場合はピンアレイによる離散的な表示であるために、幾何学的関係により θ が変化しても呈示パターンがほとんど変化しない範囲がある。図4中の小さな正方形に含まれる呈示パターンとピンの配列から、 θ についていえば $\theta=90^\circ$ に対して 30° の変化しか呈示できない。しかし、被験者は静止テクスチャ上でマウスを運動させることによって生じる呈示面上での凹凸パターンの変化を感じることができ、この運動により空間分解能を向上させている。その結果、 30° の約1/3から半分の閾値を得たものと思われる。

Table 1 Difference of display capability among three display pads

	PSE (degrees)	DT (degrees)
1.0-mm pitch display	84.3	13.0
1.8-mm pitch display	87.1	13.0
S1.8-mm pitch display	88.4	11.4

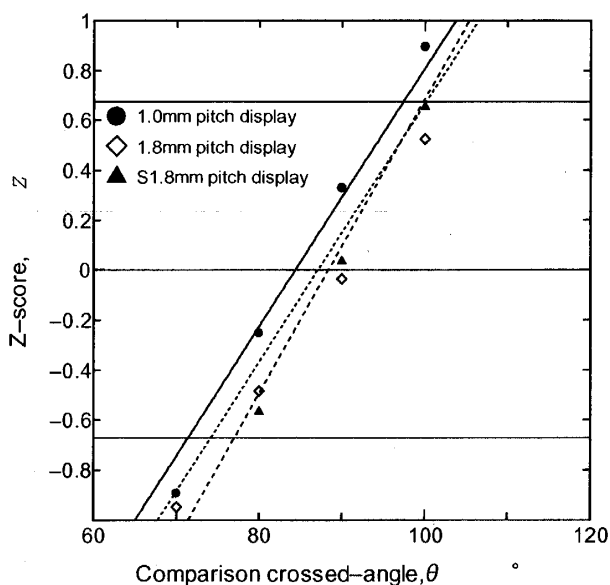


Fig. 6 Variation in z -score to estimate optimal pitch of stimulus pins

5. テクスチャ密度と呈示能力の関係

5.1 実験方法 テクスチャ認識におけるテクスチャの細かさ限界測定実験を行った。標準テクスチャとして、 $\theta=90^\circ$ および $\delta=1$ mmのパターンを選定した。テクスチャの細かさを表す N については、10, 30, 50, 70および100の五つを採用し、以上の5種類を標準テクスチャとした。標準テクスチャと比較テクスチャが同じものと感じられるように、被験者は4.1節の実験と同様に比較テクスチャの交差角を調整する。この実験では、1.8 mmピッチの触覚ディスプレイを用いた。

5.2 実験結果と考察 実験の結果得られた調整後の交差角に関する累積確率の分布を図7に示す。 N が10~70の間は、S字形のogive曲線の関係となっている。しかし、 N が100となると、上述の N が10~70の範囲での関係と一見して異なりゆるんだS字曲線となっている。このことは、 $N=100$ の実験条件では、被験者は交差角の変化を弁別しにくくなっていったものと思われる。このことを定量的に評価するため、以下では弁別閾を求めて議論する。

まず、この実験から得られた結果を Z 得点に変換して、その結果から4.1節と同様な手順で弁別閾を求めた。得られた弁別閾と N の関係を図8に示す。

図8からわかるように、 N が大きくなる、すなわちテクスチャの目が細くなるに従って、弁別閾が大きくなることから、仮想テクスチャ認識率が低下していることがわかる。この弁別閾の増大傾向は、 $N=50$ を境に不連続に変化していることがわかる。したがっ

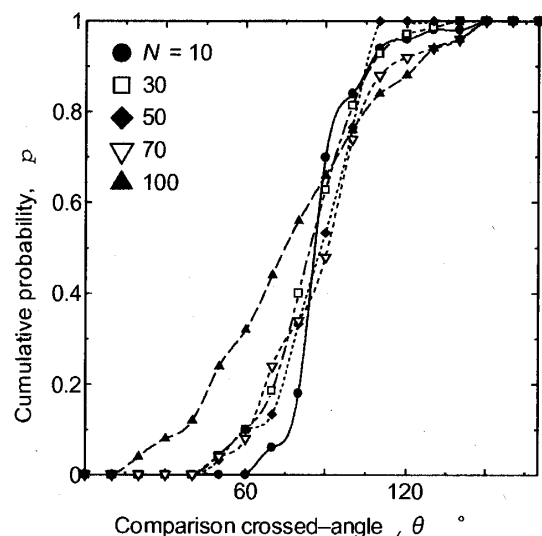


Fig. 7 Ogive curves obtained from experiments performed to evaluate presentable fineness of virtual texture

て、本装置で呈示するテクスチャの細かさとしてはおよそ $N=50$ までが適当と考えられる。

なお、前述の5章と同様に、 N についてもそれが変化しても呈示パターンがほとんど変化しない範囲を幾何学的関係から調べると約60であった。前述の $N=50$ はこの値とほぼ一致しており、テクスチャの細かさについては、呈示の限界を幾何学的関係から予測できることがわかった。

6. テクスチャの畝高さと認識精度の関係

6.1 実験方法 調整法の手続きに従い、仮想テ

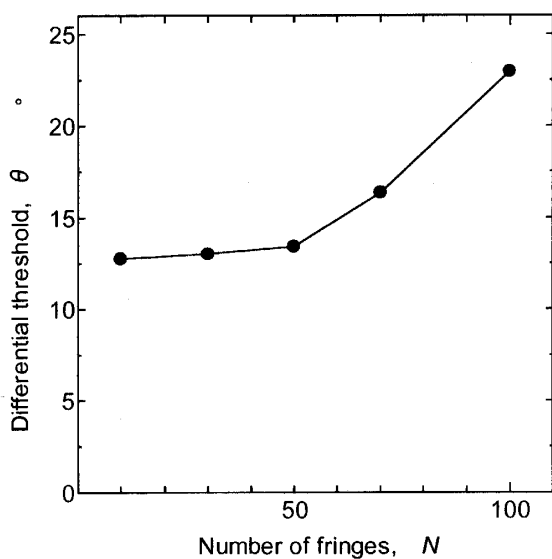


Fig. 8 Relationship between differential threshold and number of fringes

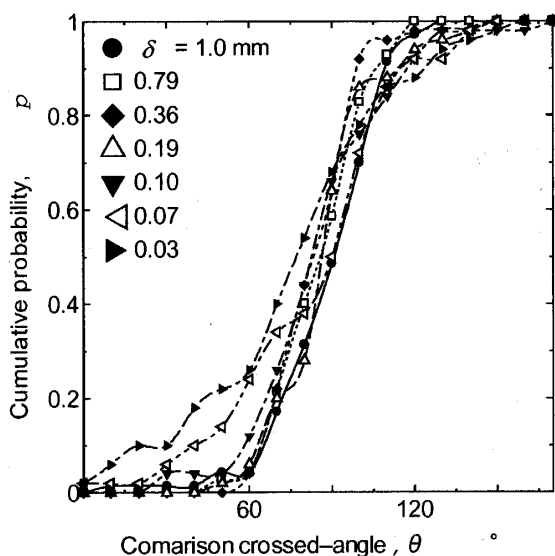


Fig. 9 Ogive curves obtained from experiments performed to evaluate presentable fringe-height of virtual texture

クスチャの畝高さと認識精度の関係を調べた。この実験では、 $N=30$ および $\theta=90^\circ$ 、また畝高さ δ については 1, 0.79, 0.36, 0.19, 0.1, 0.07 および 0.03 mm の7種類の標準テクスチャについて検討した。そのほかの実験手続きは5章の実験と同じであり、被験者は標準テクスチャと比較テクスチャが一致するように比較テクスチャの交差角を調整する。

6.2 実験結果と考察 図9を見ると、 $\delta=0.10\sim 1.0$ mmの結果が比較的理想的なS字形のogive曲線を描いているのに対して、 $\delta=0.03$ と0.07 mmの結果は形がゆがんでいる。前述の図6で議論したように、このような曲線のゆがみは被験者が交差角の変化を判定しづらくなっていることを意味している。図9をZ得点に変換して弁別閾を求めて定量的に評価する。

このようにして求めた弁別閾と畝高さの関係を示した図10を見ると、畝高さが小さくなるにつれて、弁別閾が大きくなっている。特に、畝高さが0.36 mm以下になると急激に弁別閾が大きくなり、認識率が低下している。このように、本装置は畝の高さが0.3 mm程度の凹凸のテクスチャまで呈示できる。

7. 実テクスチャ呈示と仮想テクスチャの比較

7.1 実験方法 本呈示装置で呈示するテクスチャがどの程度実物に近いかが検討するため、本研究で用いた仮想テクスチャに相当すると同じ幾何学形状を持つテクスチャを、アルミ板上に形成した試験片を製作

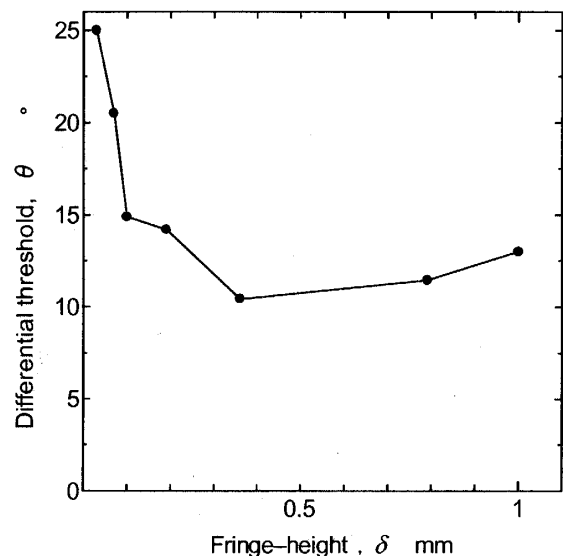


Fig. 10 Relationship between differential threshold and fringe-height

した。その写真を図11に示す。この実テクスチャは、 $N=30$, $\delta=1$ mmに相当する。交差角 θ については、 70° , 80° , 90° , 100° , 110° の5種類を用意した。

実テクスチャの場合は、仮想テクスチャの場合とは異なり交差角を連続的に調整できないため、次のような恒常法の手順で実験を行った。

すなわち $\theta=90^\circ$ の板を標準テクスチャとして、この標準テクスチャと $\theta=70^\circ$, 80° , 90° , 100° , 110° の比較テクスチャを同時に呈示して、被験者はこれらを交互に触察し、二つが等しいかどうかを回答する。比較刺激は 70° , 80° , 90° , 100° , 110° の中からランダムに選び40回呈示する。被験者1人につき、以上の試行を2回ずつ行い、比較刺激と標準刺激が一致すると答える確率分布を求めた。

実テクスチャに対する上述の実験と比較するための仮想テクスチャの実験は、前報の実験結果を流用することとした。ピン間隔が1 mmのディスプレイを用い、 $N=30$, $\delta=1$ mmの条件の仮想テクスチャを呈示した。実験は、恒常法の手順で行われ、比較テクスチャの交差角は 30° , 60° , 90° , 120° , 150° であった。

7.2 実験結果と考察 横軸に比較テクスチャの交差角をとって正答率の分布を図12に示す。図12に示すように、実物のテクスチャの場合、 $\theta=90^\circ$ の近傍で累積確率の分布が急峻になっている。この結果は、弁別閾いきまが小さいことを意味しており、高い精度で識別していることがわかる。

図12の結果をZ得点に変換して弁別閾を求めた結果、 5.4° であった。また、仮想テクスチャの場合については、前報で示したように 16.9° であった。このように実物のテクスチャを触った場合の弁別閾は、約1/3倍となる。

被験者の触察行動を観察すると、テクスチャのくぼ

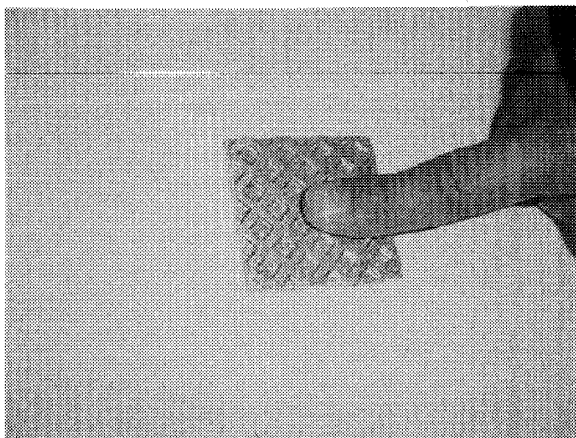


Fig.11 Real texture on an aluminum plate and an index finger

みに指を押付けて接触点を中心に回転させたりする触察行動がしばしば認められた。本呈示装置はマウスを利用しているためマウスの姿勢変化を計測できない。そのため、マウスの回転に伴う呈示パターンの変化を呈示することはできない。また、呈示面に指を密着させた状態で仮想テクスチャを触察するため、実テクスチャを触察する場合に生じる指と対象面の間の相対運動は生じない。このため、実テクスチャと指の間の相対運動時に生じるせん断方向の力の時間変化を呈示することが本呈示装置ではできない。

一方、すでに議論したように、触知ピンの上下運動による圧覚分布の呈示については、二点弁別閾以下にピン間隔を狭める必要がない。このため、ピンアレイ形の触覚マウスとして、本ディスプレイは限界に近い呈示性能があるものと思われる。したがって、呈示品位を今後向上させていくためには、ピン密度を向上するのではなく、回転に伴う呈示パターンの変化やせん断力など圧覚分布以外の刺激を生成できるような改良が必要である。

8. 結 論

本研究では、触覚ディスプレイの性能向上のための基礎データを得ることを目的として、前報で開発した触知ピンアレイ形の触覚マウスを用いて心理物理実験法を実施した。前報の検討から、触覚ディスプレイの評価には調整法が効果的であることがわかっているため、本実験では調整法を用いて実験を行った。実験結果から、触知ピン間隔の最適値、呈示可能なテクスチャ密度、仮想テクスチャの呈示可能な畝高さなどを求

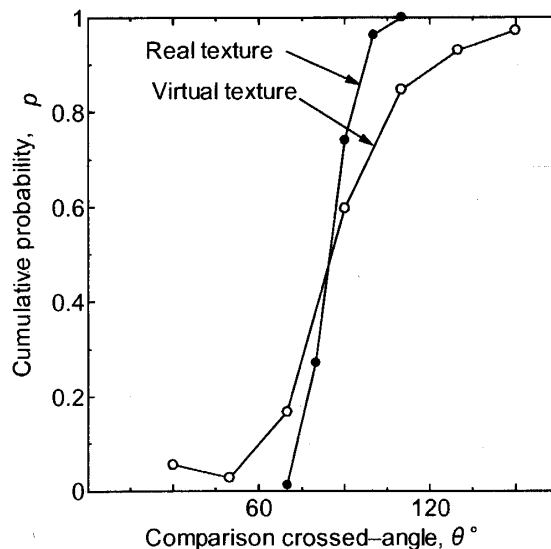


Fig.12 Comparison of detection precision between virtual texture and real texture

めた。また、実テクスチャを触察する実験を行って、呈示できる仮想テクスチャの品位を評価した。本研究の成果を以下に要約する。

(1) 触知ピン間隔が1.0 mmと1.8 mmの触覚ディスプレイの二つの条件で、仮想テクスチャ認識の特性はほぼ一致していた。したがって、テクスチャ認識の精度は、1.8 mm以下のピン間隔で飽和しており、ピン間隔を1.8 mm近傍まで拡張しても十分であることがわかった。

(2) N と弁別閾^{いき}の関係を実験データより算出し、 N が60以上になると弁別閾が急に増大した。このことから、仮想テクスチャを認識できるテクスチャ・パターン^いの細かさの限界値は $N=50$ 近傍にあることがわかった。なお、 $N=50$ の仮想テクスチャは、畝の間隔がおおよそ6 mmの波形で描かれた格子状テクスチャに相当する。

(3) 触知ピンストロークと弁別閾の関係を実験データより算出し、300 μm 以下になると弁別閾が大きくなることが明らかになった。このことから、仮想テクスチャを認識できる触知ピンストロークの最小値は300 μm 近傍にあることがわかった。

(4) 実物のテクスチャを触察するときと仮想テクスチャを触察するときの弁別閾^いの間には、約3倍の大

きな差異があることが明らかになった。一方、本実験システムで呈示できる触覚情報は、垂直方向の刺激に限られている。したがって、実物のテクスチャを触察するときでは生じる指とテクスチャ面の相対運動を模擬できるように、せん断力呈示の機能を追加すると有効であると思われる。

本研究の一部に平成16年度文部科学省科学研究費特定領域研究(16068207)および立石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科電子機械工学専攻修士課程の学生諸氏に謝意を表する。

文 献

- (1) アクチュエータシステム技術企画委員会編, アクチュエータ工学, (2004), 209-218, 養賢堂.
- (2) 大岡昌博, 触覚センサ・ディスプレイ, 機械の研究, **541-11** (2002), 1133-1140.
- (3) 大岡昌博・古賀浩嗣・宮岡徹・三矢保永, 高密度ピンアレイ形触覚マウスによる格子状テクスチャ呈示 (第1報, 触覚マウスの試作と性能評価実験法の確立), 機論, **71-711, C** (2005), 3174-3180.
- (4) Gescheider, G. A., *Psychophysics: The Fundamentals*, 3rd ed., (1997), 1-71, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers.
- (5) 大岡昌博・毛利行宏・杉浦徳宏・三矢保永・古賀浩嗣, 分布圧覚ディスプレイ装置による仮想形状呈示, 機論, **68-674, C** (2002), 2970-2976.