

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1報, 触覚マウスの試作と性能評価実験法の確立)

大岡 昌博^{*1}, 古賀 宏嗣^{*2}
宮岡 徹^{*3}, 三矢 保永^{*4}Virtual Lattice Texture Presentation Using a Tactile Mouse
Featuring a Fine Pin Array

(1st Report, Experimental Tactile Mouse and Evaluation Experiment)

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

To obtain specifications for an effective tactile display in virtual reality and tele-existence systems, we developed a matrix type experimental tactile display. It has an 8 by 8 stimulus pin array of 0.3 mm in diameter and with a 1 or 1.8 mm pin pitch. Operators can feel various combinations of pins protruding according to concave and convex portions of virtual textures composed of crossed-axis patterns. We evaluated the matrix type tactile display with two psychophysical experimental methods. In the adjustment method, human subjects adjusted the crossing angle of a comparison texture to bring it as close as possible to a standard texture fixed during the experiment to obtain crossed-axis angle thresholds from the difference between the crossed-axis angles of comparison and standard textures. In the constant stimuli method, many random pairs of comparison and standard textures were presented, and human subjects judged whether the crossed-axis angle of the standard texture coincided with the comparison texture to obtain thresholds with the statistical procedure of the judgments. After seven human subjects performed the abovementioned adjustment and constant stimuli methods, we found that the threshold of the adjustment method was almost the same as that of the constant stimuli method; but the total time consumption of the constant stimuli was about four times larger than the adjustment method.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Human Interface, Human Engineering, Virtual Reality, Psychophysics, Tactile Mouse, Fine Pin Array, Distributed Pressure, Presentation System

1. 緒 言

触覚ディスプレイは, オブジェクトハンドリングに有用であるために, 例えば, 表面テクスチャ・凹凸図形呈示^{(1)~(5)}, 空気噴流を用いた触覚ディスプレイ⁽⁶⁾, 弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイ⁽⁷⁾, 力覚呈示装置(ハプティック・インタフェース)⁽⁸⁾, ICPF (Ionic Conducting Polymer Gel Film)を用いた触覚ディスプレイ⁽⁹⁾, MEMS (Micro Electronic Mechanical Systems)応用アクチュエータ・アレイ⁽¹⁰⁾, 二次元リニアアクチュエータを用いた触覚マウス⁽¹¹⁾ など数多くの研究事例がある。

これらのディスプレイの分類法として, 面呈示と点呈示のほかにスタティック形とダイナミック形に分類する方法がある⁽¹²⁾。スタティック形とは, 大規模なアクチュエータ・アレイにより仮想形状を生成しそれを

ヒトが手で回す方式であり, ダイナミック形とは, アクチュエータ・アレイに指を押し当てた状態でそれを空間内で移動させる方式である。それらにおける触知モードは, それぞれ能動的触知および受動的触知であるとされている。特にダイナミック形では, 少ないアクチュエータで呈示可能であることから, ヒューマン・インタフェースとして実現しやすいため, 本研究で開発する触覚ディスプレイ装置もダイナミック形を採用することにする。

触覚を司る機械受容器は, 皮膚に分布して存在しているのでこれに刺激を与えるためには, 小形アクチュエータをいかに高密度に配列するかが開発の鍵となっている。前報⁽⁹⁾では, ピンアレイの規模が6×4の分布圧覚呈示形触覚マウスについて, 触知ピン間隔を種々変更することによって, どの程度まで高密度化が要求されるのか調査した。その結果, 仮想図形呈示に対しては二点弁別いき(閾)よりピン間隔を広くする必要がないという設計指針を得た。

本研究では, 仮想図形に対して検討を進めてきた前報の研究をさらに仮想テクスチャへと発展させることを目的としている。テクスチャは細かい模様から構成されるために, 前報よりさらに高密度で大面積の触覚

* 原稿受付 2005年1月12日。

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院情報科学研究科(☎464-8601 名古屋市中千種区不老町)。^{*2} (株)マクニカ(☎222-8561 横浜市港北区新横浜1-6-3)。^{*3} 静岡理科大学理工学部(☎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(☎464-8603 名古屋市中千種区不老町)。

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

ディスプレイを開発する。またディスプレイ装置の呈示性能の効果的な評価のために心理物理実験法に基づく評価法を新しく開発する。

2. 触覚ディスプレイ・システム

2.1 システムの構成 本研究で利用した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、マウス搭載形分布圧覚ディスプレイ(触覚マウス)、触覚マウス駆動制御回路、DIOボード(PCI-2466 C, Interface社)、コンピュータ(GP 7-600, Gateway社、OS: WINDOWS 2000)で構成されている。8×8 pixelsのマウスカーソルと仮想テクスチャを呈示するプログラムをVisual Basicを用いて作成した。このプログラムによって、マウスカーソルの下に位置するビットマップのRGB値が読み取られ、その値から計算された信号がDIOボード、触覚マウス駆動制御回路を経て、触覚マウスに送信され、触知ピンのストロークが制御される。

本システムでは、RGB値から計算される輝度値が小さいほど、すなわち黒に近いほど高い凸部を表すとする。このため、図2に示す触覚マウスの呈示部に指を乗せてマウスを任意に動かせば、濃淡で表された画

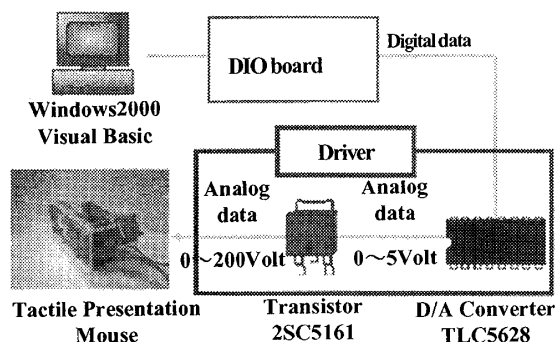


Fig. 1 Tactile display system

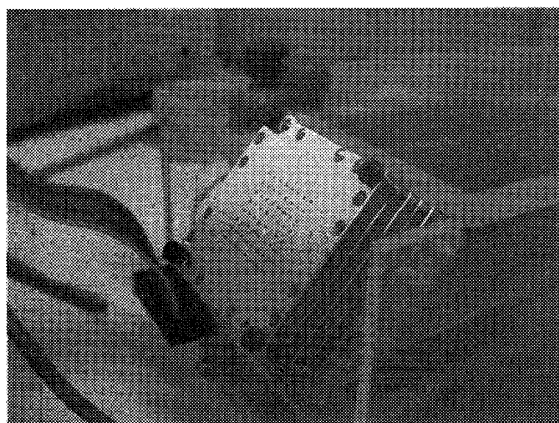


Fig. 2 Tactile display pad details

面上の仮想テクスチャの濃淡に対応してピンアレイが凹凸を形成するのでテクスチャを触察できる。

2.2 触知ピンアレイ 表面情報を的確に表現するためには、機械受容単位⁽¹³⁾の中で特にFA I (Fast Adaptive Unit Type I:速順応単位I形)とSA I (Slowly Adaptive Unit Type I:遅順応単位I形)に刺激を与える必要がある。FA Iは約1μm~数十μmの微小な凹凸を識別し、SA Iは1mm程度の比較的大きな凹凸を識別しているとされている⁽¹⁴⁾。これらの機械受容器に刺激を与えるためには、1mm程度の触知ピンのストロークを持ち、なおかつ1μm程度の微小な変位も発生できる触覚ディスプレイが必要になる。

バイモルフ形 piezo アクチュエータは、機構部品がないために1mm近い変位をガタ・遊びなく発生できるため、上述の仕様に適していると思われる。本研究では、アクチュエータとしてバイモルフ形 piezo アクチュエータを採用した点字セル(SC-5, KGS社)を分布圧覚呈示部に採用した。この装置では、触知ピン1本1本がバイモルフ形 piezo アクチュエータで駆動され、そのピンのストロークは最大約1mm(カタログ値)である。これらを8×8のマトリックス状に配置することにより、ある程度の広さの触覚呈示面積を作り出している。SC-5の触知ピンの直径とピン間隔はそれぞれ1.3mmと3.0mmである。

本研究を端緒とする後続の研究において、テクスチャ認識における触知ピン間隔の最適値や触知ピンのストロークの最小値などを調べるために、触知ピン間隔変換器を新たに設計製作した。1.0mmと1.8mmの触知ピン間隔を持つ触知ピン間隔変換器を図3に示す。触知ピンの直径も元のSC5のピン径1.3mmから0.3mmへと小さくした。触覚呈示面積は、触知ピン間隔1.0mmと1.8mmのもので、それぞれ54.8mm²(7.4mm×7.4mm)、1.8mmと164.0mm²(12.8mm×12.8mm)である。

上述の1mmのピン間隔を達成するために、設計し

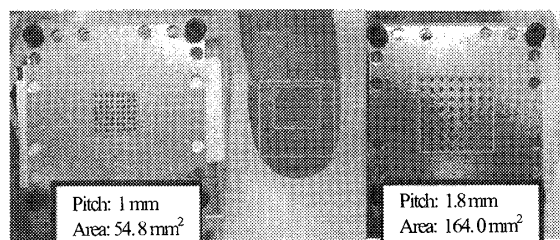


Fig. 3 Tactile display pads (left: 1 mm type, middle: a finger for comparison, right: 1.8 mm type)

たピン間隔変換器を図4に示す。この変換器では、図4(c)からわかるように、レバーどうしが接触しないようにするためにレバーの幅を1 mm以下とする必要がある。そこで、図4(d)に示すようにレバーの幅を0.6 mm とするために、厚さ0.6 mm のアルミニウム合金の板をワイヤ放電加工機にて裁断して厚み方向から直径0.3 mm の穴を開けるといった加工法を採用した。また、3 mm のピン間隔から1 mm へと大幅にピン間隔を狭めるためには、図4(d)のB部分が長い部品も必要となる。これにより指先へ力を伝達するとB部を腕の長さとするモーメントが増加するため

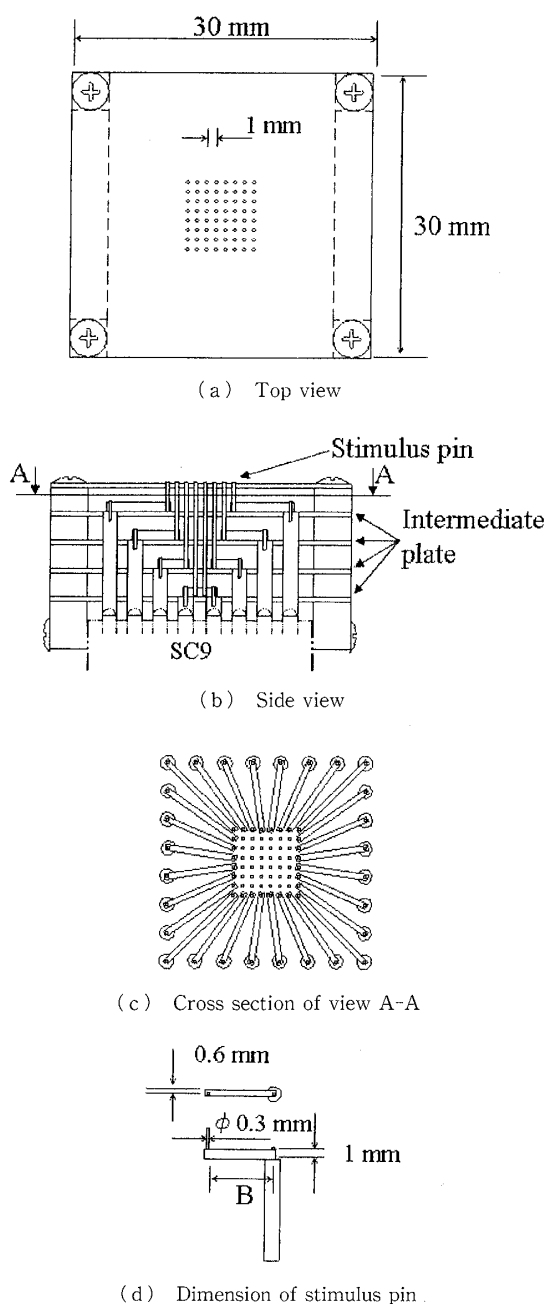


Fig. 4 Transducer for the array of stimulus pins

にこれを支える必要がある。そこで、図4(b)に示すように呈示面とオリジナルの点字セルSC5の間に4枚の中間板を設置した。

なお、直径0.3 mm の触知ピンの材質にタングステン線を採用していることと、バイモルフアクチュエータの発生力が10 gf と小さいことから、ピンを皮膚に接触させることによって生じる痛みや、ピンのたわみ変形による問題はない。

2.3 駆動回路 元のSC-5では、触知ピンは出るか出ないかの二通りの制御しかできないため、階調的に触知ピンストロークを制御することができない。そこで、前述の図1中に示すように、DIO ボードから出力されたデジタル信号をDA コンバータ(TLC 5628 CN, Texas Instruments 社)に送信し、0~5 V のアナログ信号に変換した後に、その信号を高耐圧 NPN 形トランジスタ(2 SC 5161, ROHM 社)により0~200 V 電圧に変換してバイモルフ形ピエゾアクチュエータを駆動した。

3. 触覚呈示装置の評価法

3.1 心理物理実験法 心理物理学⁽¹⁵⁾とは、心理世界の感覚 ψ と物理世界の刺激 ϕ との関係を調べる学問である。「心的事象は、それが意識されるためにはある臨界値を超える必要がある」という考えに基づいている。心理物理学では、感覚を引き起こすに必要な刺激エネルギーの最小量である絶対いきや、感覚の変化の自覚に必要な最小の刺激の変化量 $\Delta\phi$ である弁別いきなどを計測するための実験方法をいくつか議論している。このような心理物理実験法を用いれば、 ϕ の計測により ψ を知ることができるので、呈示装置を使用している被験者の感じ方を評価できると期待できる。以下では、代表的な心理物理実験法として本研究で採用した恒常法と調整法について紹介する。

3.2 恒常法 絶対いきを求めるための実験と弁別いきを求めるための実験では、被験者への刺激の呈示の仕方が若干異なる。前者の場合には、ランダムに生成した刺激を被験者に呈示してその存在をYes/Noで答えさせる。後者の場合には、刺激の強弱の組合せを一組の刺激として同時にランダムに呈示して被験者にどちらが強い刺激か回答させる。その結果、前者の場合には、横軸に刺激強度をとり縦軸にYesで答えた確率をとるとロジスティック曲線形の分布となる。後者の場合には、一対の刺激のうちどちらか一方を実験中に刺激の大きさを変えない標準刺激として、標準刺激でないほうの刺激(比較刺激)のほうを大きいと答える確率を縦軸に、比較刺激を横軸にとると、これにつ

いてもロジスティック曲線形の分布となる。これらの分布曲線は正規分布を積分して得られる累積確率分布 (ogive 曲線) と類似な傾向を有する。そこで、これらを線形化するために、縦軸の値を z 得点 (z -score: 標準得点) に変換して最小二乗近似を行う。絶対いきを求める場合であれば、 $z=0$ のときの刺激値を絶対いきとする。また弁別いきの場合であれば、 $z=0.67$ (累積確率 $p=0.75$ に相当), $z=0$ ($p=0.5$) および $z=-0.67$ ($p=0.25$) のときの標準刺激の値を求めることになる。

3.3 調整法 調整法で絶対いきを測定する場合の一般的な方法は、刺激の強度レベルをしきい値の十分下もしくは上に設定し、刺激がちょうど知覚できるまで被験者に強度レベルを増加させる、もしくは感覚がちょうど消失するまで減少させるというものである。このときの刺激の強さの変更は、連続的でも離散的でもよい。上昇系列と下降系列の試行を多数回行い、それらの調整値の平均をとって絶対いきを求める。この方法の利点は、被験者の実験への積極参加であり、被験者の退屈感を防止し、結果として良いデータが得られる。また、調整法により弁別いきを求めるためには、二つの刺激を同時に呈示し、片方を固定して、両者が一致するようにもう一方の刺激を被験者に調整させる。最終的に得られた二つの刺激の差が弁別いきとなる。このほか、被験者の回答の正答率を計算してその推移に基づいて比較刺激の大きさを変更する PEST (Parameter Estimation Sequential Testing)⁽¹⁶⁾ という方法もよく用いられる。

4. 実験方法

恒常法、調整法および限界法といった代表的な心理物理実験法のうち、限界法は、他の2種類の方法と比べて精度の点で劣るので、ここでは恒常法と調整法のどちらが触覚呈示装置の評価法に適するか実験によって確かめる。以下では、本実験の方法について述べる。

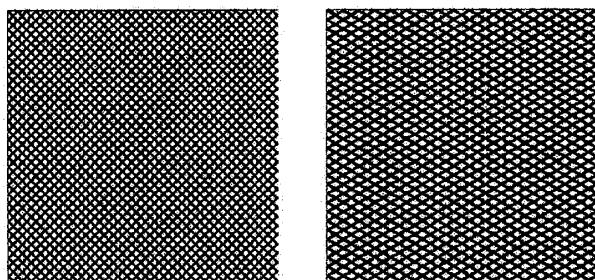


Fig. 5 Virtual textures, left: $\theta=90^\circ$, right: $\theta=120^\circ$

4.1 仮想テクスチャ 図5に示す格子状テクスチャ畝数 $N=30$, 畝高さ $\delta=1\text{ mm}$ を刺激として選定した。ここで、この格子状テクスチャのしま部分の断面形状は矩形である。テクスチャの変数、すなわち被験者に与える刺激変数として、図6で定義する交差角 θ の値を選定した。呈示装置の性能評価に対して、前述の恒常法と調整法のどちらが優れているか検討するために恒常法と調整法の手続きに基づいて以下の実験を計画した。

4.2 恒常法の実験条件 $\theta=90^\circ$ のテクスチャを標準刺激とし、 $\theta=30^\circ\sim150^\circ$ (20° 間隔) のテクスチャを比較刺激とした。被験者は比較刺激と標準刺激を交互に触察し、標準刺激と比較刺激が等しいかどうかを回答する。同じ標準刺激に対して比較刺激を計40回呈示した。この試行を被験者1人につき、2回ずつ行った。実験中に回答の正誤を被験者に伝えなかった。

4.3 調整法の実験条件 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 ($\theta=90^\circ$)、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この操作を続ける。同じ標準刺激に対して、 $10^\circ\sim170^\circ$ の間で 10° 間隔でランダムに選択した交差角を比較刺激の初期値として触察させた。被験者1人につき、これを10回ずつ行った。

以上の実験の被験者は、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。

5. 実験結果と考察

5.1 実験結果の整理法 3章で解説したように、通常の恒常法では標準刺激と比較刺激のうち、強いあるいは大きいと感じたほうの刺激を選択する確率を縦軸に、比較刺激の大きさを横軸にとって結果を整理する。これに対して本実験では、呈示装置が標準テクス

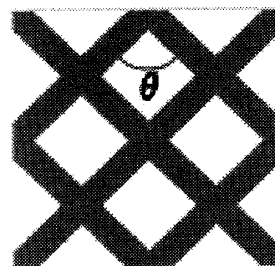


Fig. 6 Crossed-axis angle

チャと比較テクスチャの交差角の一致度を被験者がどの程度の正確さで弁別できるのかを調べることを目的として、恒常法では比較刺激テクスチャが標準テクスチャに一致していると判断する確率を求めた。そこで、本研究では弁別いきや主観的等価値を求めるために、恒常法から得られた判断確率から累積確率分布を求めてからそれを z 得点に変換するといったデータ変換方式を採用した。また、調整法では比較刺激テクスチャが標準テクスチャに一致するように調整した。恒常法と調整法を比較するために、調整法についても調整後の比較刺激の交差角が出現する確率から累積確率分布を求めてそれを z 得点に変換するといったデ

ータ変換方式を採用した。

5.2 恒常法と調整法の比較 触知ピン間隔 1.8 mm のディスプレイを用い、 $N=30$, $\theta=90^\circ$, $\delta=1$ mm の仮想テクスチャを標準刺激として使用して恒常法と調整法に従って実験を行った。被験者が仮想テクスチャと標準テクスチャが一致すると判断した累積確率分布を図 7 に示す。図 7 には 7 人の被験者の結果を重ねて示す。図 7 から、被験者 F 以外の結果は ogive 曲線に類似の曲線を描くことがわかる。このように、安定して判定できない被験者が 7 人の集団の中に含まれているが、後述の図 9 から明らかなように平均値をとると比較的滑らかな ogive 曲線が得られる。

次に、調整法の結果を図 8 に示す。図 8 からわかるように、7 人の被験者の結果はおおむね ogive 曲線に従っている。

以上の恒常法と調整法を比較するため、図 7 と図 8 の結果について被験者間で平均値をとった関係を図 9 に示す。図 9 からわかるように、平均値で評価するといずれの場合も滑らかな ogive 曲線となる。

弁別いき (DT : differential threshold) および主観的等価値 (PSE : point of subjective equality) を求めるために、これらの実験結果を標準得点に置換えた結果を図 10 に示す。図 10 を用いて、 $Z=-0.6745$, 0 , 0.6745 の点における刺激強度を読み取り、主観的等価値と弁別いきを計算した。同様に触知ピン間隔 1 mm の結果についても主観的等価値と弁別いきを求めた。さらに、7 人の被験者が実験に費やした時間も以上の結果と併せて表 1 に示す。

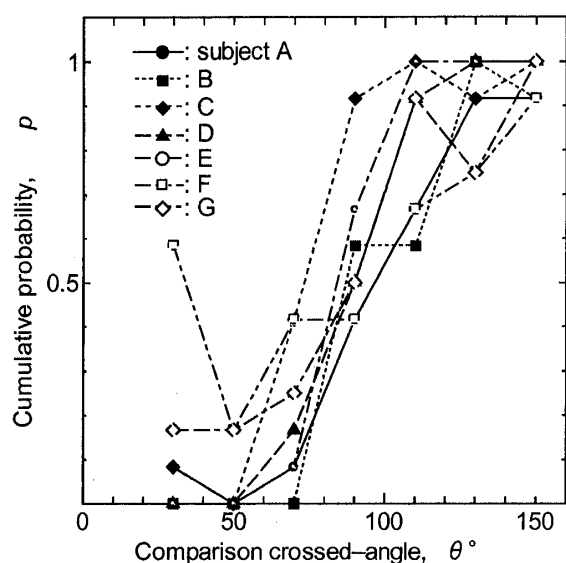


Fig. 7 Difference between human subjects on constant stimuli method

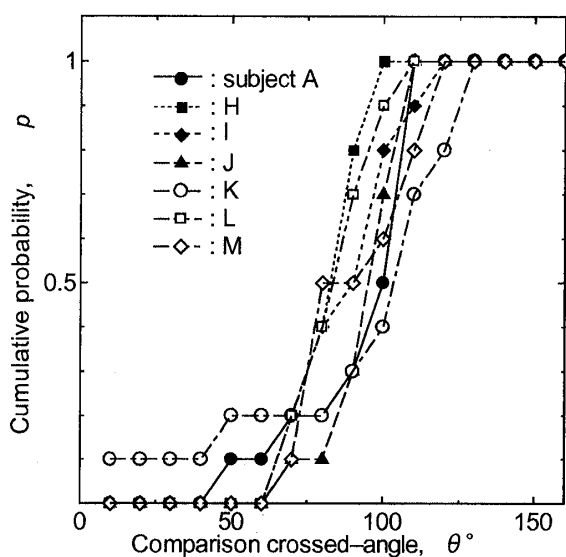


Fig. 8 Difference between human subjects on adjustment method

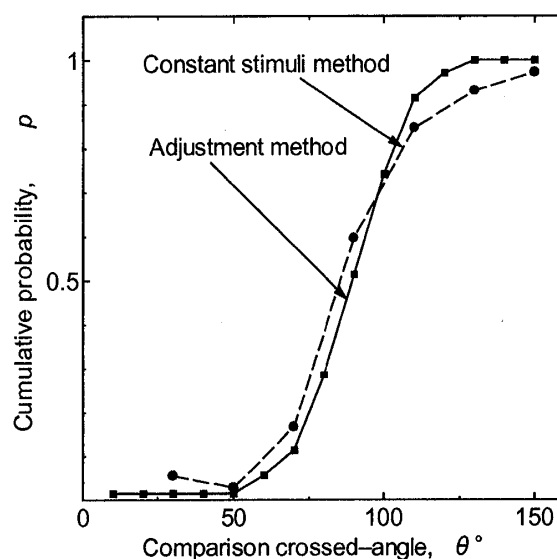


Fig. 9 Comparison between constant stimuli and adaptive methods due to cumulative distribution variations

表1に示すように、触知ピン間隔1.8 mmのディスプレイを用いて恒常法で行った実験では、主観的等価値が 90.5° であり、その値は標準パターンの交差角 90° とほぼ一致している。また、弁別いきの値が 15.3° であることもわかる。したがって、被験者は 90.5° を中心に誤差 15.3° で交差角を調整可能である。

同じディスプレイを用いて調整法で実験を行うと、主観的等価値と弁別いきは、それぞれ 87.1° と 13.0° であり上述の恒常法の場合の値とほぼ一致している。同様な比較は触知ピン間隔1 mmのディスプレイについても行うことができ、恒常法と調整法で得られた実験結果はほぼ一致している。

一方、7人の被験者に対して実験に費やした総時間を触知ピン間隔1 mmのディスプレイについて調べると、恒常法と調整法についてそれぞれ522分および126分であった。また触知ピン間隔1.8 mmのディスプレイについては、それぞれ443分と104分であった。

このように、恒常法と調整法で得られる主観的等価値と弁別いきがほぼ一致したが、調整法のほうが顕著に短時間で結果が得られるため、評価に費やされる時間の短縮化が重視される場合には、呈示装置の評価法として調整法のほうが適している。

なお、触知ピン間隔1 mmと1.8 mmのディスプレイ主観的等価値と弁別いきがほぼ一致しており、仮想図形に関する前報において2 mm弱の二点弁別いきと同程度の触知ピン間隔で十分であるという結果⁽⁹⁾

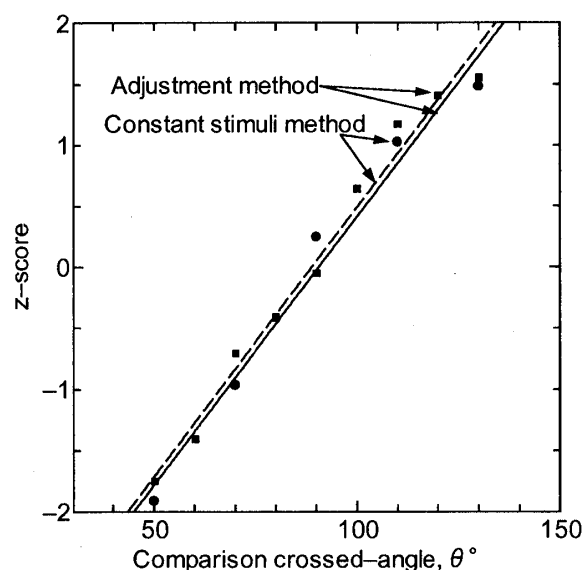


Fig. 10 Comparison between constant stimuli and adaptive method due to z-score variations

を考え合わせると、仮想テクスチャの呈示において呈示性能を低下させることなく広げうる触知ピン間隔の最大値は1.8 mmであると予想できる。しかし、呈示性能は呈示面積に依存し、触知ピン間隔1 mmと1.8 mmのディスプレイの呈示面積は大きく異なるので、詳細な検討には、1.8 mmのディスプレイの触知ピンをいくつか固定して1 mmのディスプレイ呈示面積を等しくして比較した実験結果が必要となり、これについては次報で検討する。

6. 結 論

触知ピンアレイ形の触覚ディスプレイの設計データを得る目的から、仮想図形呈示に対する検討を行った前報に引き続き、本報では仮想テクスチャ呈示実験のための装置の試作と実験方法の検討を行った。

得られた結果を以下に要約する。

(1) 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分布圧覚ディスプレイを設計製作した。テクスチャ呈示を可能とするため、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1 mmを触知ピン間隔とする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。

(2) 物理刺激の与え方と被験者の応答から心的事象を計測できる心理物理実験法がディスプレイ装置の評価に適していると考え、格子状の標準テクスチャと比較テクスチャを被験者が随意に触察できるシステムを開発した。また、このシステムでは、恒常法あるいは調整法の実験手順に従って比較テクスチャを変更できるようにした。

(3) 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いきを求める実験を行っ

Table 1 Comparison between constant stimuli and adjustment methods (DT: differential threshold, PSE: point of subjective equality)

	Display type	Constant stimuli method	Adjustment method
DT	1 mm	16.9°	13.0°
	1.8 mm	15.3°	13.0°
PSE	1 mm	88.42°	84.3°
	1.8 mm	90.51°	87.1°
Time consumption	1 mm	522 min	126 min
	1.8 mm	443 min	104 min

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1/4の時間で実験が完了した。したがって, 呈示装置を格子状テクスチャ呈示によって評価する場合に, 調整法を用いると実験時間を顕著に短縮できることがわかった。

本研究の一部に平成16年度文部科学省科学研究費基盤研究B(16300183), 同特定領域研究(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課修士課程の学生諸氏に謝意を表する。

文 献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Iwata, H., Yano, H., Nakaizumi, F. and Kawamura, R., Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics, *Proc. ACM SIGGRAPH 2001*, (2000), 469-475.
- (5) Shinohara, M., Shimizu, Y. and Mochizuki, A., Three-Dimensional Tactile Display for the Blind, *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, **3** (1998), 249-256.
- (6) 田中豊・雨宮賢一, 力触覚提示に利用される空気アクチュエータ, 日本油空圧学会誌, **1-4** (2000), 35-42.
- (7) Takasaki, M., Nara, T., Tachi, S. and Higuchi, T., A Tactile Display Using Surface Acoustic Wave, *Proc. 2000 IEEE Int Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, (2000), 364-367.
- (8) 並木隆生, ハプティック・バーチャルリアリティ PHANTOM 実演, 日本機械学会講習会—IT 革命を支えるセンサ・アクチュエータ技術, No. 01-34 (2000), 35-42.
- (9) 昆陽雅司・田所諭・高森年・小黒啓介・徳田献一, 高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **6-4** (2001), 323-328.
- (10) Fukushima, T., Hata, S. and Shimokohbe, A., A MEMS Conical Spring Actuator Array, *IEEE/ASME J. Microelectromech. Syst.*, **14-2** (2005), 243-253.
- (11) 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・インターフェイス学会研究報告集, **1-5** (1999), 83-86.
- (12) 清水豊, インターネットによる情報公開「触覚伝達機器の設計支援情報」, <http://www.tsukuba-tech.ac.jp/info/kenkyu/kaken/home.html>
- (13) Vallbo, Å.B. and Johansson, R.S., Properties of Cutaneous Mechanoreceptors in the Human Hand Related to Touch Sensation, *Human Neurobiol.*, **3** (1984), 3-14.
- (14) 宮岡徹, 触覚のモジュール機構, 静岡理科大学紀要, **3** (1994), 85-98.
- (15) Gescheider, G. A., *Psychophysics: The Fundamentals*, 3rd ed., (1997), 1-71, Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Publishers.
- (16) Taylor, M. M. and Creelman, C. D., PEST: Efficient Estimates on Probability Functions, *J. Acoust. Soc. Am.*, **41** (1967), 782-787.