

触覚マウスによる図形情報の識別

Shape Discrimination with a Tactile Mouse

渡辺 哲也[†], 正会員 久米 祐一郎^{**}, 伊福部 達^{***}
Tetsuya Watanabe[†], Yuichiro Kume^{**} and Tohru Ifukube^{***}

Abstract To provide visually-impaired people access to graphical information, we previously developed a device called a "tactile mouse." It consists of a computer mouse and a small tactile display. Tactile information is fed back to the fingers according to the mouse's movements, giving the user the feeling of exploring tangible drawings. Because the tactile display is small, however, users tend to deviate from the tangible graphics when they move the mouse too much. To identify conditions for reducing this deviation, we conducted two experiments: one on line following and one on shape discrimination. We found that when the parameter called "hand-movement-to-pin ratio" was too low, the chances of deviation increased, and when it was too high, discrimination failures occurred more frequently. Consequently, intermediate conditions that led to less deviation and fewer discrimination failures were found to be adequate for the efficient use of the tactile mouse.

キーワード：感覚代行，視覚障害者，触覚マウス，図形の識別，逸脱，マウス移動対触知ピン比

1. ま え が き

人間は外界からの情報の多くを視覚を通じて取得している。このため視覚に障害を受けるとこれらの情報取得が困難となり、生活の中のあらゆる活動面でハンディキャップを負うことになる。このハンディキャップの解消ないし軽減を目指して、本来視覚から伝達されるべき情報を他の感覚系から代行して伝達する感覚代行技術の研究開発が従来から進められてきた¹⁾。視覚代行を活動場面の観点から大別すると、歩行の支援、文字や図形情報の伝達支援(またはコミュニケーション支援)、これら以外の日常生活の支援となる²⁾。このうち文字情報の伝達支援については特に多くの研究開発が行われ、触覚的なパターンから文字を読み取らせる機器や³⁾、音声や点字を媒体として普通文字を読み書きできるコンピュータシステムなどがすでに実用化され⁴⁾⁵⁾、視覚障害者の間で一般的に使用されている。

一方、文字だけでは伝えることが難しい図形情報の伝達も重要な課題である。図形情報を視覚障害者に伝えるには一般には触図が用いられている。これは絵の部分背景部より浮き出ており、その浮き出た線あるいは面を触ることで認識できる図で、その作成にはレーズライタと呼ばれる用紙や立体コピー機などを使用する。しかし、触図は一度作成すると書き直しができないため、頻繁に変化する図形情報の提示を目的として、再描画が可能な触覚ディスプレイシステムの研究開発が進められてきた^{6)~8)}。触覚ディスプレイを構成する技術は数種類あるが、一般的なのは格子状に配置した複数本のピンを振動させて皮膚にパターンを伝える振動子アレイ方式と、ピンを上下に駆動して触察可能な形状を作る触知ピンアレイ方式である⁹⁾。触知ピンアレイ方式による2次元または3次元情報提示装置は、手指を自由に動かして触るアクティブタッチを可能とするが、駆動部を含めた装置の大きさ、再描画に要する時間、高価格などの問題点もあり¹⁰⁾¹¹⁾、まだ広範に普及するには至っていない。

別なアプローチとして小形の触覚ディスプレイを用いたシステムも提案された¹²⁾。特に近年コンピュータマウスが普及するとともに、マウスに振動子/触知ピンアレイを搭載した触覚マウスと呼ばれるデバイスが検討されている^{13~16)}。これはマウスの動きに応じた触覚情報をユーザの指先にフィードバックすることで、ちょうど触図の浮き出し線に沿って指先を動かすのと同じ方策で、ディスプレイ面よりも大きな図形を認識させようとするデバイスである。触覚ディスプレイ部が小形なためシステムの小形化と

1999年10月29日、映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会で発表

1999年11月30日受付、2000年3月17日再受付、2000年4月6日採録

[†] 障害者職業総合センター

(〒261-0014 千葉市美浜区若葉3-1-3, TEL 043-297-9069)

^{**} 東京工芸大学

(〒243-0297 厚木市飯山1583, TEL 046-242-9508)

^{***} 北海道大学 電子科学研究所

(〒060-0812 札幌市北区北12条西6丁目, TEL 011-706-2414)

[†] National Institute of Vocational Rehabilitation

(3-1-3, Wakaba, Mihama-ku, Chiba 261-0014, Japan)

^{**} Tokyo Institute of Polytechnics

(1583, Iiyama, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0297, Japan)

^{***} Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

(Kita-12, Nishi-6, Kita-ku, Sapporo-shi, Hokkaido 060-0812, Japan)

低コスト化も期待できる。

この触覚マウスを使って閉眼状態で触図形を認識するには、図形からマウスを逸脱させることなくなぞることが不可欠である。ところが、このなぞりと逸脱の観点から触覚マウスの操作性が検討されたことはなかった。そこで本研究では、触図形からの逸脱を抑制し正確な触図形の認識を可能とするシステム条件を実験から明らかにすることを目的とした。具体的には、触図形をなぞる際の手(によって動かされるマウス)の動きを計測できる触覚マウスシステムを開発し、逸脱の制御に影響すると考えられるパラメータのひとつであるマウス移動対触知ピン比(hand-movement-to-pin ratio, 以下 HMP 比と略す)を変化させてその影響について実験・検討を行った。

2. 触覚マウスシステム

今回開発した触覚マウスシステムの構成を図1に示す。触覚マウスは縦140 mm、幅84 mm、高さ54 mmのケースにコンピュータマウス(東京ニーズ, TN-98 PX1)と触覚ディスプレイを納めたものである。触覚ディスプレイには8本のピンを有する点字表示用セル(ケーゲーエス, SC-2)4台を使用し、ユーザが示指と中指で触る程度の広さをもったディスプレイ面(25.6 mm×21 mm)を構成する。そのディスプレイ面には32本の触知ピンが縦8列横4行のマトリクス状に並ぶ(図2)。マトリクスはほぼ正方形格子形だが、点字セルを使用しているため横方向のピン間隔は2.4 mmと4.0 mmの2種類となる。触知ピンは圧電セラミックで駆動され、製品カタログによればピンストローク0.5~0.8 mmを生じる。触覚マウスは自作制御ボードを介してパソコン(NEC, PC-9801 FA)に接続される。触覚マウスのエンコーダ部からはマウス移動のXおよびY方向成分それぞれにおいて0.0635 mmの移動量に対してパルスが1 count 出力される。出力されたパルスは制御ボードで計数され、その計数結果を周期10 msでプログラムに取り込み、これよりマウスの軌跡が求められる。

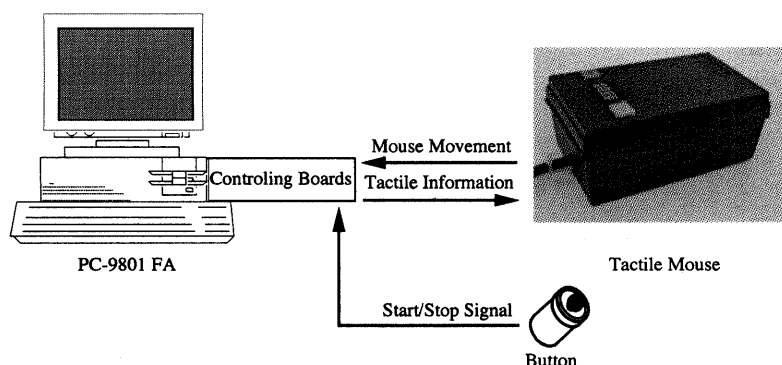


図1 触覚マウスシステム
Tactile mouse system.

る。反対に制御ボードからは触覚ディスプレイへ触覚情報を送りだし、その更新周期も10 msに設定した。制御ボードにはボタンも接続されており、被験者はこのボタンで各試行の開始と終了を制御する。

本システムでは、パソコンのグラフィック画面の1 dotを触覚ディスプレイの1 pinに対応させて、画面上で発光しているドットに対応したピンを突出させた。触覚ディスプレイに提示されるのはパソコン画面上でマウスカーソル左上の矩形領域(8×4 dot)である(図3)。例えば水平方向の線分は、図3(a)のように水平方向に並んで突出した複数本のピンで表現される。ユーザがマウスを水平方向に動かせばピンは突出したままで、この方向に線が伸びているとユーザに感じさせる。また上方向に動かせば、初期に突出したピンよりも下の列のピンが順次突出し、あたかも手を上に動かしたため線が相対的に下へ移動したかのように感じさせる。このようなマウス操作において、触覚ディスプレイ上の触知ピンの凹凸状態を1 pin分変位させるのに要するマウスの移動量をHMP比と定義する。HMP比を変化させると、マウスの移動量が同じでも、画面上のカーソルの移動量および、触覚ディスプレイ上の触知ピンの凹凸状態の変化量が異なってくる(図3(c))。この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が、同時に、図形の線分をとらえ続けるのにユーザはより巧みなマウス操作が求められ、図形が触覚ディスプレイの提示領域から逸脱する可能性が高くなると予測される。

3. 実験1：線分のなぞり操作

触覚マウスの利用目的は触図形の認識である。図形を線図形に限定した場合、その認識は図形の輪郭をなぞることによって達成される。輪郭は様々な種類の線分から構成されるが、ここでは最も単純な線分として水平方向の線分を選び、これをなぞる操作におけるHMP比変化の影響を見ることを実験1の目的とした。水平方向としたのは、触知

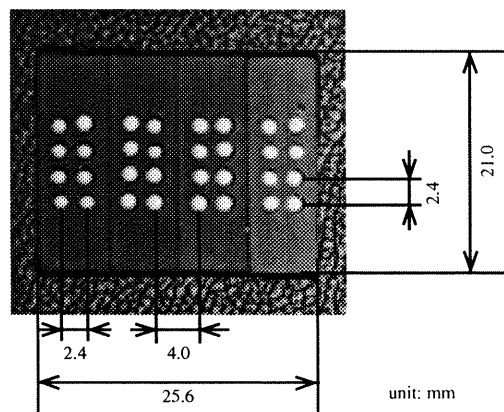
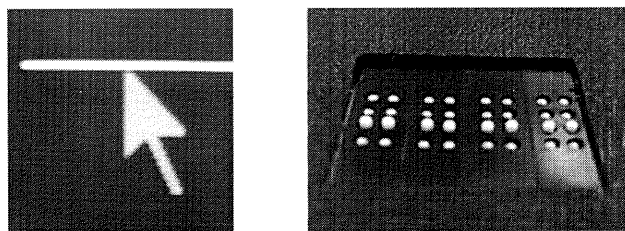
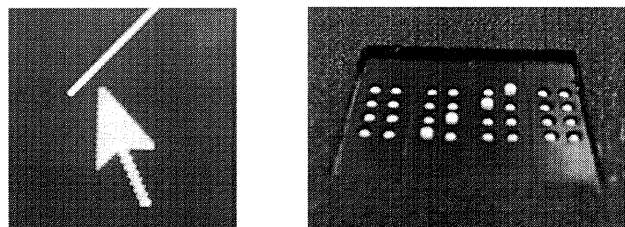


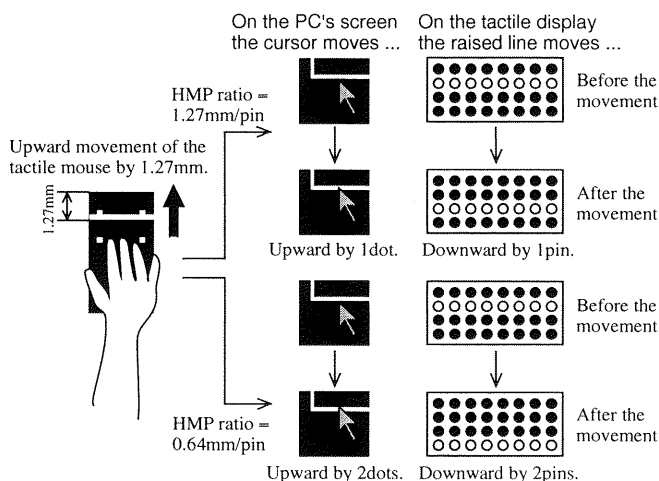
図2 触覚ディスプレイ部
Tactile display unit.



(a) 水平方向の線分



(b) 斜め方向の線分



(c) HMP比が1.27 mm/pinの場合、マウスを上方向に1.27 mm動かせば、パソコン画面上のカーソルは1 dot 上へ移動し、触覚ディスプレイ上の凸線は1 pin 下へずれる。HMP比が0.64 mm/pinの場合、同じように1.27 mm マウスを上方向に動かすと、カーソルは2 dot 上へ移動し、凸線は2 pin 下へずれる。触覚ディスプレイ面の白抜き丸(○)は突出しているピン、黒塗り丸(●)は下がっているピンを表す。

図3 スクリーン上の線分と触覚ディスプレイ部のドットの凹凸との対応

Correspondance between a line on the CRT display and a row of raised dots (white circles) of the tactile display unit. (a) A horizontal line, (b) An oblique line, (c) When HMP ratio is 1.27 mm/pin, upward movement of the tactile mouse by 1.27 mm moves the cursor upward by 1 dot and the raised line by 1 pin. When HMP ratio is 0.64 mm/pin, however, the same movement of the mouse moves the cursor upward by 2 dots and the raised line by 2 pins. White circles on the tactile display represent raised pins and black circles lowered ones.

ピンの並びが縦8列横4行のため、垂直方向より水平方向において逸脱の影響を観測しやすいと考えたためである。

3.1 方法

触覚マウスを使って水平方向の線分を右方向へなぞる操作を課題とした。線分は0.32~1.91 mm/pinの6種類のHMP比条件で提示した。線分のスタート地点からゴール地点までマウスを動かす距離をすべての条件において、およそ80 mm一定とした。このために、画面上の線分のドット数は80 mm/HMP比(mm/pin)=42~250 dotの間で調節した。

実験では6種類のHMP比条件について10回ずつランダムな順序で提示し、合計60試行を1セットとした。各セットの間に5分程度の休憩を挟み5セットの繰り返し実験を行い、合計300試行を行った。各試行において、被験者には常に指先で凸線を感じるように垂直方向のマウスの位置を調整しながら、できるだけ素早く右方向へ動かすよう指示した。実験者がスタートキーを押すとマウスカーソルの座標は線分のスタート地点にセットされ、触覚ディスプレイ部の下から2列目のピン8本が突出する。この時点から被験者にはマウスを動かすよう指示した。なぞりの途中で凸線を指先で感じなくなったときには、マウスを垂直方向に動かして凸線を探すよう指示した。線分のゴール地点では複数のピンが突出して凸面を形成する。ゴール地点到達を知った被験者は終了ボタンを押す。これで1試行が終了する。実験システムは、実験者がスタートキーを押してから被験者が終了ボタンを押すまでの間のマウスの軌跡を記録した。

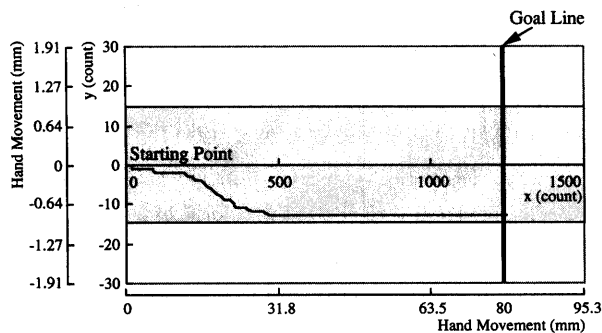
なお、触覚マウスを使った実験に被験者を慣れさせるため、実験に先立って、触覚マウスで図形を自由に触覚させる時間を1時間弱設け、続けて、実験と同じ手順で線分をなぞる操作を実験者による説明を交えながら30回行っておいた。

被験者は20歳および21歳の大学生4名である(男1名、女3名)。4名とも右利きで、マウスは右手で持つ。マウスの使用歴は5~6年、普段より学業においてマウスを使用している。実験中は被験者にはアイマスクを着用させ、視覚情報を遮った。

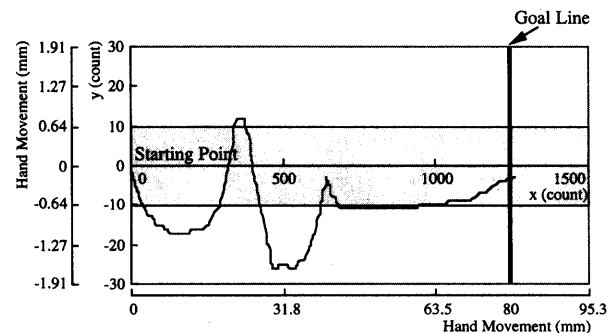
3.2 結果

5セットの実験のうち最初の1セットは、なぞり操作の学習に要するセットとみなして、そのデータは使用せず、2セット目以降の計測データを被験者ごとにまとめて解析した。また、被験者がスタート時に終了ボタンを押してしまった1試行と、実験システムの不調のため適切に計測できなかった1試行は、解析から除外した。

全試行のマウス軌跡を観察した結果、典型的と思われるマウスの移動軌跡2例を図4に示した。図中で灰色に塗りつぶした矩形領域内にマウス座標があるとき、触覚ディスプレイのピンが隆起した凸部により線分が提示される。この領域を凸線提示領域と呼ぶことにする。図4(a)では、



(a) 逸脱がない試行(HMP比は0.44 mm/pin)



(b) 逸脱を含む試行(HMP比は0.32 mm/pin)

図4 マウス軌跡の例(x軸とy軸にはマウスエンコーダのカウントとmmの両単位を併記した。灰色の矩形内にマウスカーソルがあるとき触知ピンが突出する)

Two typical mouse trajectories. Pins were elevated while the mouse cursor stayed in the rectangles painted in gray. (a) Trial without deviation. The HMP ratio is 0.44 mm/pin, (b) Trial with deviation. The HMP ratio is 0.32 mm/pin.

マウスはゴールに向かって直線的に動かされ、移動の間マウスの軌跡は凸線提示領域から逸脱することがなかった。他方、図4(b)では軌跡は凸線提示領域から何度か逸脱し、そのつど、被験者は提示領域にマウスを戻すため方向転換を行った。

凸線提示領域からの逸脱を含む試行を逸脱試行と呼ぶ。各HMP比条件ごとに、逸脱試行の数を全試行数で除した値を逸脱試行の割合とし、これを図5に表した。図5より、HMP比が小さくなるにつれて逸脱試行の割合が増えているのがわかる。逸脱試行の割合について1元配置の分散分析を行うと、HMP比の変化の有意な影響が認められた($F(5, 15)=10.2, p<0.005$)。多重比較としてチューキーのHSD test(1%)を行ったところ¹⁷⁾、0.32 vs. 0.95, 1.27, 1.91 mm/pin および 0.44 vs. 1.27, 1.91 mm/pin の各条件間で有意差が見られた。すなわち、低い側の2つのHMP比条件においては、高い側のHMP比条件2つないし3つに比べて有意に逸脱試行の割合が高かった。

平均操作時間を表1に示す。項目により試行数(number of trials)が大幅に異なるため統計的分析は行わず、傾向を見るにとどめる。いずれの条件下でも、逸脱があった場合の平均操作時間は、逸脱のない場合より長かった。さら

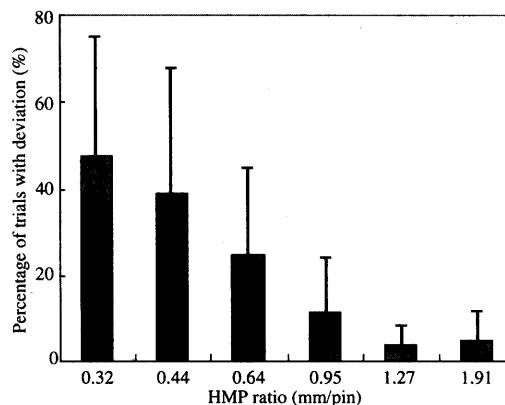


図5 HMP比を変化させたときの逸脱試行の発生割合(図中の誤差範囲は標準偏差を表す)

Percentage of trials with deviation. Error bars represent the standard deviation.

表1 逸脱の有無で分けた平均操作時間

Mean performance time of trials with and without deviation.

HMP ratio (mm/pin)	0.32	0.44	0.64	0.95	1.27	1.91
trials with deviation (s)	2.28	1.85	1.67	1.73	1.30	1.72
(number of trials)	76	62	39	18	6	7
trials without deviation (s)	1.26	1.26	1.29	1.29	1.26	1.27
(number of trials)	84	98	120	142	154	152

に逸脱のない試行では全条件下で操作時間が一定であるのに対し、逸脱試行ではHMP比が低くなるにつれ操作時間が長くなった。

4. 実験2: 図形の識別

実験1の線分なぞり操作における低いHMP比の影響は、図形の識別においても同様に観察されると予測できる。これを確かめるために実験2を行った。

4.1 方法

角の数が異なる単純な幾何図形5種類(三角形, 四角形, 五角形, 六角形, 円)を刺激として選んだ。多角形はすべて正多角形である。これを0.32~3.81 mm/pinの6種類のHMP比で提示するので、総刺激数は30となる。最大のHMP比条件を実験1より大きく取ったのは、HMP比が1.27 mm/pin以上で逸脱試行の割合が低いまま安定するかどうか、図5を見る限り判然としなかったためである。全図形の周囲長、すなわち被験者が触察してなぞるべき距離は、およそ156 mm一定となるように画面上の図形のドット数を調節した。したがって、図形を構成するドット数は156 mm/HMP比(mm/pin)=41~488 dotであり、これを辺の数で割った値が各辺のドット数となる。ただし計算中の丸め誤差と、斜線と曲線もマトリクス状のドットで構成する影響とにより、各辺の正確なドット数はこの値からいくらか変動する。なぞるべき距離を一定にしたのは、画面上の図形の大きさを一定にすると、HMP比条

件によってなぞるべき距離が変動し、これが操作時間の長短に影響を及ぼしたと考えられる報告が過去にあり¹⁴⁾、この影響を避けるためである。

被験者を触覚マウスに慣れさせるため、実験に先立って30分程度マウスを自由に使用させた。実験では最初に刺激図形の図を被験者に見せた。以後の実験中、被験者は図形識別の回答時にこの図を見ることができたが、マウスによる触察中は見せられなかった。実験では30種類の刺激をランダムな順序で1回ずつ触覚マウスに提示した。各刺激は最長4分まで触察することができた。被験者の視覚情報を遮断するため、実験1ではアイマスクを使用した。実験2では触察中は被験者の肘部に黒い布を垂らし、被験者の手とマウスが被験者に見えないようにした。被験者には図形の特徴をはっきり識別した時点で触察を終了させ、触った図形と一致する図形を刺激図形の図から強制選択させた。アイマスクを使用しないことで、視覚的な選択がスムーズに行える。実験中は回答の正誤を被験者に伝えなかった。図形の識別と同時に、形状の触りやすさを5段階の基準(5:大変触りやすい, 4:触りやすい, 3:普通, 2:触りにくい, 1:大変触りにくい)で評価させた。実験システムにより、触察に要した全操作時間と凸線提示領域からの逸脱時間を各試行ごとに測定した。すべての刺激の触察が終了した後、被験者には図形の識別基準を口頭で説明させた。

被験者は晴眼者の男性4名と女性5名の計9名、平均年齢は21.9歳であった。全被験者とも右利きで、マウスの使用歴は1年半以上であった。

4.2 結果

識別率は8名の被験者で80%を越えており、チャンスレベル(20%)を大きく上回った。ただし、1名のみは50%の識別率にとどまった。心理物理実験において被験者が、できるだけ速く、かつ、できるだけ正確にタスクを遂行するように教示を受けた場合、操作時間は短いと正確さに欠ける、あるいは逆に、タスクは正確に遂行されたが操作時間が長いというように、操作時間と正確さの間でトレードオフの関係が見られることがある。このようなデータを対象に統計解析を行い、操作時間に関して有意な差を見ても、条件の変化と正確性のばらつきのいずれが要因なのか判然としない。そこでまず、識別率が大幅に異なる1名のデータは解析から除くこととした。次に、識別率の高かった8名のデータについて、操作時間と回答の正誤の関係を見たところ、両者の間にトレードオフの関係は見られず、むしろ誤識別された図形は、正しく識別された図形より長い操作時間を要した。この場合、正誤の違いは操作時間に影響を及ぼしていないと考えられるので、誤答された試行も含めたすべての試行を対象として、HMP比の変化と図形の種類を要因とする2元配置の分散分析を行った。

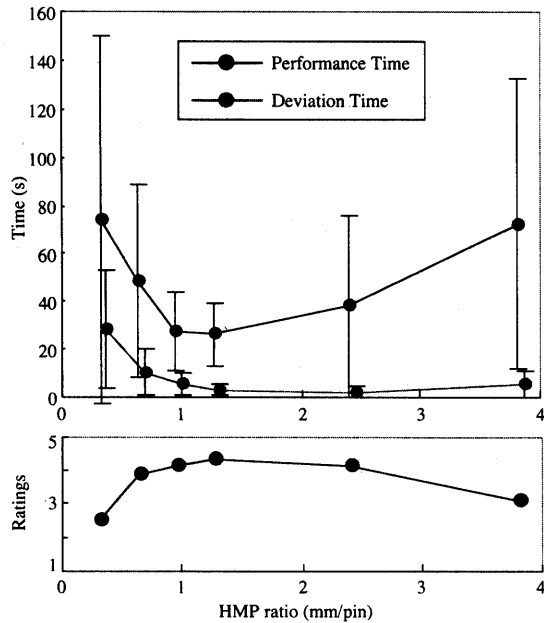
図6は、各条件における操作時間と逸脱時間、触りやすさの評価値を表している。HMP比が最低(0.32 mm/

pin)、あるいは最高(3.81 mm/pin)のときに、操作時間は他の条件と比較して長かった。逆に、操作時間の短い試行の多くはHMP比が1 mm/pin近傍であった。高いHMP比において操作時間が長くなるかどうかは図形により結果が異なった。操作時間について2元配置の分散分析を行ったところ、HMP比の変化の有意な効果が見られた($F(5, 140)=6.57, p<0.01$)。しかし図形の違いによる効果および、交互作用の有意な効果は見られなかった(図形の違い: $F(4, 140)=1.84, p>0.1$;交互作用: $F(20, 140)=1.25, p>0.1$)。テューキーの多重比較(1%)を実行すると、刺激図形が三角形、四角形、五角形、円の場合、最も低いHMP比である0.32 mm/pinと他のHMP比のほとんどとの間で有意な差が見られ、六角形と三角形では、最も高いHMP比である3.81 mm/pinと中間3つあるいは4つの条件の間で有意な差が見られた。

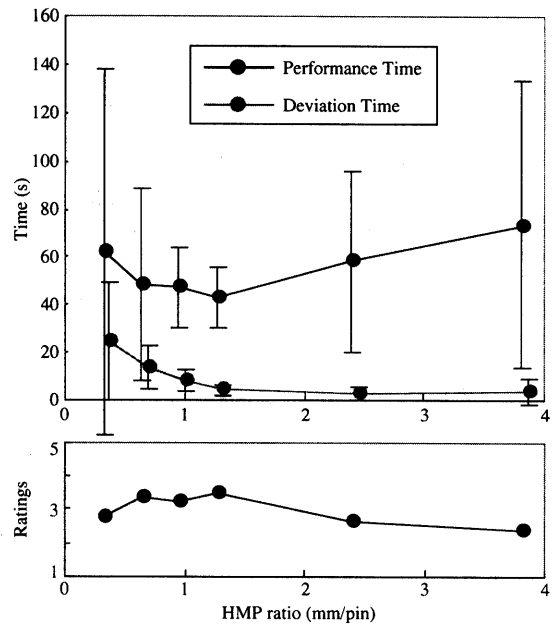
低いHMP比条件で操作時間が長くなったのは、明らかに逸脱時間の増加が要因である(図6)。0.32 mm/pinにおける平均逸脱時間は他の5種類の条件に比べ有意に長い($F(5, 140)=20.41, p<0.01$)。逸脱時間はHMP比が高くなるにつれて減少し、図形の違いの影響は受けなかった($F(4, 140)=0.85, p>0.1$)。これは実験1の結果と一致する。またHMP比が1.27 mm/pin以上では、平均逸脱時間は短いまま安定することが確認された。

一方、高いHMP比条件で操作時間が長くなったのは、図形の識別が困難だったためと考えられる。HMP比が0.32と1.27 mm/pinでは誤答は極めて少なく、0.64と0.95 mm/pinの条件では誤答が見られなかったのに対して、2.40と3.81 mm/pinの両条件では誤答率がそれぞれ15%と35%と高かった(図7)。表2の混同表によると、誤答は五角形、六角形、円の間で頻繁に見られた。今回の実験では、すべての条件においてマウスの移動距離を一定とするため、HMP比が高くなると相対的に刺激図形を構成するドット数が少なくなり(4.1方法の項を参照)、五角形、六角形、円のドット表現がお互いに類似してきた。ところで、被験者の多くは図形識別の手がかりとして、角の検出、直線と曲線の弁別、角度の計測を挙げ、このうち角の検出や、直線と曲線の弁別が難しい刺激があったという感想を報告している。したがって、少ないドット数による表現のため、類似した刺激図形においては角の検出や曲線の弁別が難しくなり、頻繁に誤答を生じさせたと推測できる。

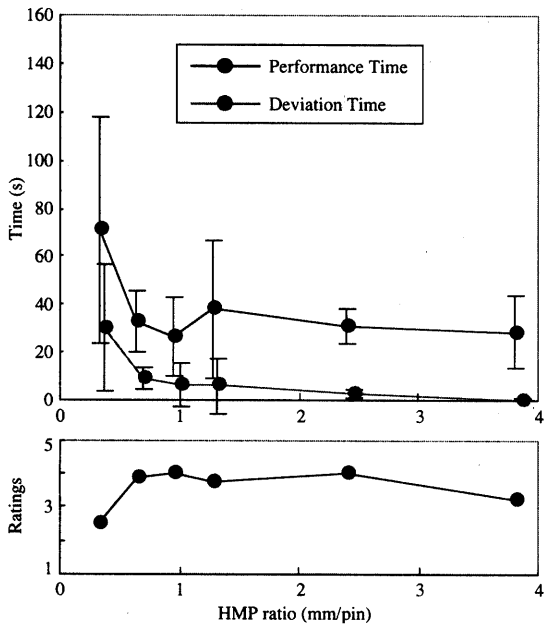
図6において、触りやすさの評価値を表すグラフの形状は操作時間とは上下逆の形になっている。すなわち、操作時間が短い条件ほど評価値が高かった。触りやすさの評価値についてHMP比と図形の種類を要因とする2元配置の分散分析を行ったところ、HMP比に有意な要因効果が見られた($F(5, 150)=4.86, p<0.01$)。また、図形の要因についても有意差が認められた($F(4, 140)=4.22, p<0.01$)。各刺激図形ごとにテューキーの多重比較(1%)を行うと、



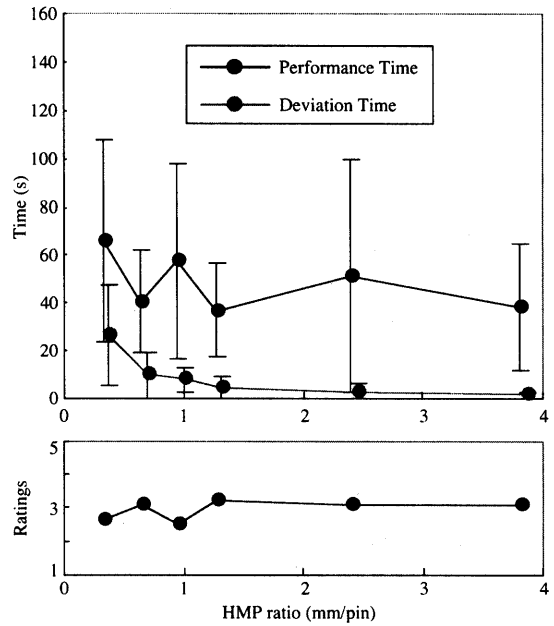
(a) 三角形



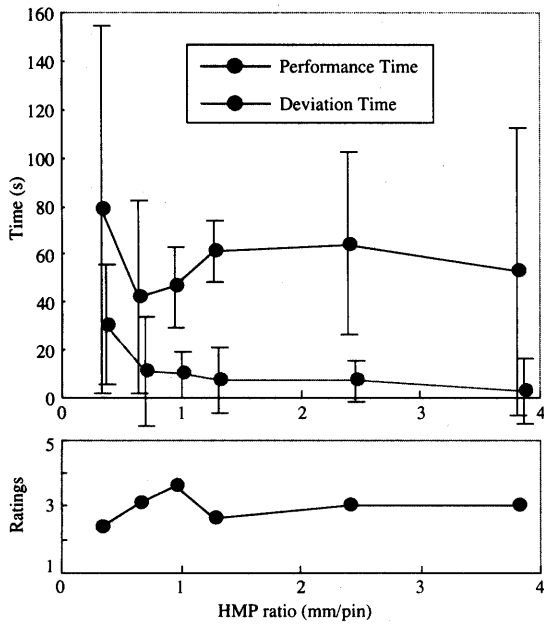
(d) 六角形



(b) 正方形



(e) 円



(c) 五角形

図6 操作時間, 逸脱時間, 触りやすさの評価値(図中の誤差範囲は標準偏差を表す. 各刺激図形につき2枚の図を作成した)

Performance time, deviation time and ratings. Two charts were drawn for each stimulus form. Error bars represent the standard deviation. (a) Triangle, (b) Square, (c) Pentagon, (d) Hexagon, (e) Circle.

三角形では HMP 比 0.64, 0.95, 1.27, 2.40 mm/pin の 4 条件は 0.32 と 3.81 mm/pin 条件より高く評価された。四角形では中間の 4 つの条件は, 最も低い 0.32 mm/pin 条件より高い評価だった。五角形では 0.95 mm/pin 条件は 0.32 と 1.27 mm/pin 条件より評価が高かった。六角形では 0.64 と 1.27 mm/pin は 3.81 より評価が高かった。円ではいずれの条件でも高い評価は得られなかった。

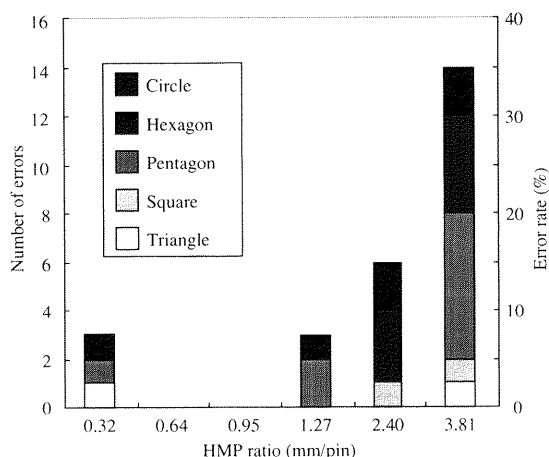


図7 誤認識された試行数(各 HMP 比における総試行数は 40(=5 刺激×8 被験者)である)

The number of error trials. At each HMP ratio, the number of total trials was 40 (=5 forms×8 subjects).

表2 図形認識の混同表(提示された図形を最左列に, 認識された図形を最上行に示した)

Confusion matrix of form recognition. The figures in the leftmost column are the stimulus forms presented. In the topmost are the figures recognized as.

	Triangle	Square	Pentagon	Hexagon	Circle	Sub Total
Triangle	2	0	0	0	0	2
Square	0	2	0	0	0	2
Pentagon	1	1	7	0	0	9
Hexagon	0	0	2	5	0	7
Circle	0	0	2	4	0	6
Total						26

5. 考 察

凸線分をなぞる際に線分が触覚ディスプレイに提示されつづけるには, 線分の法線方向の手(マウス)の動きを凸線提示領域の幅以下に抑える必要がある。この幅は(HMP比×ピンの本数)で決定される(図4を参照)。そこで本研究では, 前者の HMP 比を変化させて逸脱の生起の様子を観察した。その結果, 水平方向の凸線分のなぞり操作において HMP 比の変化の顕著な効果が見られ, 0.44 mm/pin 以下の条件はそれより高い HMP 比条件より逸脱試行の割合が有意に増加し, さらに逸脱試行においては HMP 比が低いほど操作時間は長くなった。触覚ディスプレイの縦方向のピン数は4本であるから, HMP 比が0.32および0.44 mm/pin のときの凸線提示領域の幅は1.27または1.78 mm となる*。したがって, 被験者は垂直方向の手の動きをこれら以下に抑えながらマウスを水平方向に動かさ

* $0.32 \times 4 = 1.28$, $0.44 \times 4 = 1.76$, $0.95 \times 4 = 3.80$ である。しかし 0.32, 0.44, 0.95 はマウスエンコーダの分解能 0.0635 mm/count にそれぞれ 5, 7, 15 をかけた数値を有効数字 2 桁に丸めた数値であるため, この数値には $0.0635 \times 5 \times 4 = 1.27$, $0.0635 \times 7 \times 4 = 1.78$, $0.0635 \times 15 \times 4 = 3.81$ の計算結果を用いた。

なければならず, 困難な操作であったことが窺える。逸脱試行の割合が10%程度に抑制された 0.95 mm/pin 条件では凸線提示領域の幅は 3.81 mm であり*, 提示領域の幅がこれ以上となるように HMP 比を設定すれば, 触覚マウスの操作における逸脱試行の影響は軽減できるといえる。HMP 比変化の効果は図形の識別においても同様に観察され, HMP 比 0.32 mm/pin の条件下で, それよりも大きい HMP 比条件より有意に長い平均逸脱時間が測定された。図形の識別では, 水平線以外に垂直線, 斜め線, 円弧の触察も含まれるが, 図2に示す触覚ディスプレイのピン配列から, これらの凸線提示幅は水平線のそれより広くなる。したがって, 水平線からの逸脱が生じにくい HMP 比では, 他種の線でも逸脱は生じにくかったと考えられる。

逸脱を抑制するもうひとつの手段は, 触覚ディスプレイのピン数の増加である。触覚情報を提示する指先部の面積は有限なので, ピン数の増加はピン密度の増加といってもよい。ピン本数およびピン密度の増加は触覚ディスプレイの製作技術に規定されるが, 近年では図形情報の提示などを目的に, 高密度かつ小形の触覚ディスプレイの開発が進められており⁸⁾, 今後はピン密度の増加により逸脱を抑制する方策も期待がもてる。

図形の識別実験においては, HMP 比の変化の影響は逸脱の制御だけでなく誤答率にも現れた。すなわち HMP 比が 0.64 と 0.95 mm/pin のとき誤答はなかったが, HMP 比がこれより高くなるにつれて誤答が増える様子が観察された。その原因は, 少ないドット数表現により図形が互いに類似したためと考えた。これより, 十分なドット数で図形を表現すれば高い HMP 比でも誤答率を低くできるという考えが自然に導出される。しかし, 触察してなぞるべき図形が大きくなるとマウスをより大きく動かす必要が生じ, これに伴って操作時間も延びる¹⁴⁾。さらに, 0.64 と 0.95 mm/pin の低い HMP 比において高い識別率と短い操作時間が達成されている以上, 高い HMP 比を設定し, これに合わせて画面上の図形のドット数を増やす方策は得策ではないといえる。

触覚に関する研究では, 2点間に継時的に刺激を与えることで皮膚上を刺激が移動しているように感じる仮現運動と呼ばれる現象が知られており, 触覚マウスによる図形の識別もこの現象に基づいている。触覚の仮現運動に影響する要因はいくつかあるが, そのうち刺激提示時間と提示時間間隔が最も重要であり, 刺激間距離の重要性はこれらより低いことが報告されている¹⁸⁾。したがって, 本触覚ディスプレイのピン間距離の不整合性(2.4 mm と 4.0 mm)はさほど問題にならなかったと考えられる。また, 触察後にピン間距離の違いによる違和感を訴えた被験者もいなかった。

以上の議論を経たところ, 本触覚マウスシステムにおいては HMP 比条件を 0.64~1.27 mm/pin に設定すること

で、触図形からの逸脱を抑制でき、高い正答率で幾何図形の識別が可能となることがわかった。したがって、図形情報伝達のためのデバイスとして触覚マウスの有効性が示されたといえる。ただし、今回の実験は晴眼者を対象に行われており、その結果から導かれる知見が視覚障害者に対しても同様に有効性をもつか検討しておく必要がある。従来の研究を見ると、視覚障害者と晴眼者との間で触察による形状認識の成績に相違があるかどうかについて、心理学の分野で多くの研究がなされている。それらの研究は、樹脂シートに凸状に浮き出したり、ドットプリンタで紙面に凸状に打ち出したりした図形や文字の認識実験であるが、視覚障害者と晴眼者の間で差異がないことが報告されている¹⁸⁾¹⁹⁾。これらの実験と触覚マウスとではタスクが全く等しいわけではないが、被験者が自由に指先を動かして図形を触察する点で類似しており、触覚マウスの使用においても同様に、晴眼者、視覚障害者間の差異はないと考えられる。また、アイマスクをした被験者を中途失明者と見なしたときの先天盲との相違について検討すると、視覚経験のない先天盲児に対しては特殊教育において図形認知の学習が行われており¹⁹⁾、今回の実験で用いた円や多角形などの簡単な単一平面図形の識別タスクの範囲内では、視覚経験の有無の影響は見られないと考えられる。

図形情報伝達デバイスの応用としては、例えば盲児への図形教育が挙げられる。ここでは、何種類もの図形情報をリアルタイムで再描画できる触覚マウスの利点が生かされるだろう。また、ポインティング位置の情報を音声出力することで、地図のルート案内にも適用可能と考えられる²⁰⁾。音声出力のほかに、触知ピンの振動²¹⁾、力覚フィードバック²²⁾²³⁾などの機能追加によりユーザに提示できる情報量を増やすことも期待できるが、そのうちどれを選択すべきかは、実際の用途とそこでの効果に規定される。今後は視覚障害者を対象としたシステムの有効性を探る実験を行っていきたい。

6. むすび

触覚マウスを開発し、その HMP 比を変化させたときの図形からの逸脱に着目して触覚マウスの操作性を検討したところ、逸脱を抑制し、かつ、誤りなく図形を識別できる適切な条件が見い出された。ただし、逸脱や識別率は HMP 比以外のパラメータにも依存すると見られ、特に触知ピンの本数・密度・配列は重要な要因である。したがって、その実用化を目指すには、これらの仕様も含めた包括的な検討が必要である。

最後に、本研究で使用した触覚マウスシステムの構築にあたり貴重な情報を提供して頂いた佐々木忠之氏(茨城大学)と製作を担当して頂いた須貝克美氏(東京電機大学(当時))、本論文について御討論頂いた井野秀一氏(北海道大学電子科学研究所)と岡田伸一氏(障害者職業総合センター)に深く感謝の意を表す。

〔文 献〕

- 市川, 大頭, 鳥居, 和氣: “視覚障害とその代行技術”, 名古屋大学出版会 (1984)
- 芝田: “視覚障害者の社会適応訓練第3版”, 日本ライトハウス (1996)
- J. G. Linvill and J. C. Bliss: “A Direct Translation Reading Aid for the Blind”, Proc. IEEE, **54**, 1, pp. 40-51 (1966)
- 平, 長岡, 福井: “視覚障害者のパソコン事情”, 日本盲人職能開発センター (1993)
- 和田: “視覚障害者のパソコン利用環境としての Windows”, 視覚障害, **160**, pp. 1-15, 日本盲人福祉研究会 (1999)
- C. C. Collins: “Tactile Television: Mechanical and Electrical Image Projection”, IEEE Trans. Man-Machine Syst., **MMS-11**, pp. 65-71 (1970)
- 和氣, 清水: “視覚代行システム”, 計測と制御, **14**, pp. 910-918 (1975)
- 洪, 白石, 谷: “多数行の点字情報が表示可能な小型点字セルモジュール”, 第20回感覚代行シンポジウム, pp. 5-8 (1994)
- 清水: “文部省科学研究費補助金, 基盤研究 (B-2) 課題番号 06452407” (1997)
- シェーファー: “ドット・マトリックス・ディスプレイ〜グラフィックス及びテキストのための対話型装置〜”, Pin, **15**, pp. 68-73, 視覚障害情報機器アクセスサポート協会 (1994)
- M. Shinohara, et al.: “Three-Dimensional Tactile Display for the Blind”, IEEE Trans. Rehab. Eng., **6**, 3, pp. 249-256 (1998)
- 末田: “盲人用画像入力システム”, システムと制御, **30**, 6, pp. 48-51 (1986)
- S. F. Wiker, et al.: “Development of Tactile Mice for Blind Access to Computers: Importance of Stimulation Locus, Object Size, and Vibrotactile Display Resolution”, Proc. of the Human Factors Soc. 35th Annual Meet., Part 1, pp. 708-712 (1991)
- 田淵, 佐々木, 堀籠: “マウス型触覚ディスプレイにおける情報表示面積の影響”, 第20回感覚代行シンポジウム, pp. 79-82 (1994)
- 山中, 岡田, 兼吉, 井関: “触覚ペンディスプレイ付きポインティングデバイスの提案”, 第12回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp. 63-66 (1996)
- J. Siegel-Itzkovich: “A Seeing-Eye Mouse”, The Jerusalem Post, Dec. 1 (1998)
- 森, 吉田: “心理学のためのデータ解析テクニカルブック”, 北大路書房 (1990)
- “皮膚感覚・自己受容感覚”, 大山, 今井, 和氣編: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 第IV部, 誠信書房 (1994)
- 佐藤編: “視覚障害学入門”, 学芸図書 (1991)
- 皆川, 大西, 杉江: “触覚と聴覚による盲人用図表現システム”, 信学論, **J77-D-II**, 3, pp. 616-624 (1994)
- 下条, 石田, 渡辺: “視覚障害者用 Tactile Display の開発”, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会, pp. 101-102 (1999)
- M. Akamatsu and S. MacKenzie: “Movement Characteristics Using a Mouse with Tactile and Force Feedback”, Int. J. Human-Computer Studies, **45**, pp. 483-493 (1996)
- C. J. Hasser: “User Performance in a GUI Pointing Task with a Low-Cost Force-Feedback Computer Mouse”, Proc. of the Am. Soc. of Mech. Eng. Dyn. Syst. and Control Division, **DSC-64**, pp. 151-156 (1998)



わたなべ てつや
渡辺 哲也 1993年, 北海道大学大学院工学研究科生体工学専攻修士課程修了。水産庁水産工学研究所研究員を経て, 現在, 障害者職業総合センター研究員。音声, 視覚障害者用感覚代行技術の研究に従事。



く ぬ ゆ う い ち ろ う
久米祐一郎 1985年, 早稲田大学大学院理工学研究科物理学及応用物理学専攻博士後期課程修了。(株)東芝, 早稲田大学理工学部助手, シカゴ大学医学部研究員, SRI インターナショナル主任研究員等を経て現在, 東京工芸大学教授。バーチャルリアリティ, 視覚障害者補助技術の研究に従事。工学博士。正会員。



い ふ く べ と お ろ う
伊福部 達 1971年, 北海道大学大学院工学研究科修士課程修了。北海道大学応用電気研究所助手を経て, 1984年, スタンフォード大学客員助教授, 1989年, 北海道大学電子科学研究所教授。この間, 音に関する福祉工学の研究に従事。工学博士。