

触覚探索における2次元抽象オブジェクトの提示条件 Presentation condition of two dimension abstraction object in tactile search

御園 政光[†] 坂井 忠裕[‡] 半田 拓也[‡] 小田 浩一[‡]
Masamitsu Misono Tadahiro Sakai Takuya Handa Koichi Oda

1. はじめに

従来、視覚障害者のグラフィカル情報の理解のためには、平面に線や面を凸状に浮出させ、指で触って理解できるようにした触図が利用されてきた[1]。しかし、触図の作成には、熟練と時間を要するため、パソコンの画面に表示された画像を即時的に表現する用途には適さない。即時に、様々なグラフィカル情報を表現するためにはリアルタイムで書き換えられる触覚ディスプレイの利用が適切である[1]。昨今、インターネットの普及に代表されるように、即時的な情報をいかにして効率的に収集し把握するかが大きな課題となっている。特に画像情報に関しては情報提供者が視覚障害ユーザーに説明情報を付加する必要がある。しかし、説明だけでは理解が困難な場合が多い。視覚障害者の画像情報へのアクセシビリティは十分ではない。情報化社会の進展により、今後ますます画像による情報の提供の増大が予想され、こうしたコンテンツに対する視覚障害者に適した提示技術や提示方式が開発、実用化されることが強く求められている。

筆者らはデジタル放送やインターネットの情報を触覚で視覚障害者に伝える視覚代行を目的として、触覚の情報受容や認知に基づく最適な提示法やアクセス方式を研究している[2], [3]。その中で、マルチメディア情報における新たな視覚代行研究の視点で、画面や図などの視覚的に表わされるコンテンツ(以下視覚的コンテンツ)に対して音声や点字のような時系列データだけではない、2次元の触覚を併用したマルチモーダルな提示方式の研究を進めている。触覚ディスプレイを用いて、視覚的コンテンツを伝達したり、視覚的コンテンツへのアクセスを用意するために、タッチパネルを搭載し、インタラクティブに GUI(Graphical User Interface)操作ができるシステムを開発している[4]。これにより、視覚障害者への情報環境が大きく進展する可能性がある。

視覚障害者の GUI 環境に対する操作の改善のための研究は 1990 年代より行われるようになった。GUI の画面を触覚ディスプレイに提示したり、階層やアイコンを触覚インタフェースに提示する研究が行われるようになった[5, 6, 7]。しかし、表などのコンテンツを触覚で提示する研究は少ない。

現在、視覚障害者への表の表現方式は、紙点字では、表の体裁(レイアウト)を崩さない形で点字で表現されている。一方、スクリーンリーダーで表を全文読みする場合には、二次元で表される表の見出しと項目との内容の関連性が伝わるように、見出し→項目1→項目2→項目Nとなるように時系列データを適切な順序で変換し音声や点字で提示する。また、キー操作によるセル単位のアクセスでは、セル(オブジェクト)を順次探索し、表の全体像、複数のセルの位置関係、内容を把握できる。スクリーンリーダーや表計算ソフトによっては、表の始点や終点、左端や右端といった表の枠を基点とするフォーカスセルの移動コマン

ドが用意されている場合がある。しかし、表全体に対するセルの位置を直截的に把握するのは難しい。

このように、視覚に障害がある人が、スクリーンリーダーだけで表の目的のセルを探索したり、効率良く内容を理解し操作するには限界がある。2次元で提示されたパターンを迅速に理解したり操作するには、触覚提示を併用することが有効な手段である。この場合、探索しやすい適切なオブジェクトのパターンの配置条件を検証する必要があると考えられる。現在、実用的な触覚ディスプレイは、ピン間隔は2mm程度であり、格子状に配置したオブジェクトの提示において、触覚ディスプレイの解像度に起因するオブジェクトの表現能力も影響する課題がある。したがって、触覚で探索しやすいオブジェクトの形状やサイズ、オブジェクト間の間隔、配置パターンを求める必要があるが、表のような格子状のパターンを触覚で伝えることを目的とした研究は少ない。

本論文では、スプレッドシートに代表されるような格子状に配置されたオブジェクトを効果的に探索できるように、現状の実用的な触覚ディスプレイにおいて、単純な形状の図形で表現したオブジェクト(以下、抽象オブジェクト)の探索に影響を与える要因を実験で評価し、最適な配置パターンや提示条件の指針を得ることを目的とした。以下、2章で、触覚インタフェースを用いた情報伝達の関連研究事例を述べ、3章では格子状に配置した表の抽象オブジェクトの提示方式を提案するためにに行った基礎実験の内容、および結果の解析より得られた知見を述べる。

2. 触覚による情報伝達

2.1 触覚による情報伝達の先行研究事例

オプタコン(optical-to-tactile converter)や TVSS(tactile vision substitution system)に代表されるように、視覚代行に関する研究は 1970 年代から行われ有効な視覚代行機器が開発された[8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]。また、オプタコンや TVSS を用いた簡単な幾何学図形の提示法に関する実験[15]や、触覚グラフや地図用の記号に関する実験[16, 17]が報告されている。これらは、いずれも文字や図形のわかりやすい提示方式を対象とした研究であった。

1990 年以降には、パーソナルコンピュータの OS(Operating System)が Windows の GUI 環境へと移行したことで、GUI の操作環境で表わされる画面の構成や階層を触覚に伝えることを目的に研究開発が行われるようになった[5], [18]。海老名らは、階層やオブジェクトの機能を触覚、オブジェクトのラベル名を音声で表現することにより、GUI オブジェクトを非視覚的に表現する方法を提案した[5]。視覚障害者を被験者とした評価実験を行い、GUI オブジェクトの探索において触覚ディスプレイにおける GUI オブジ

エクトの探索方式は、十字キーを用いた探索方式よりも速く目的のオブジェクトを探索でき、かつユーザーに与える負担も少ないことを示唆した[5].

表のコンテンツの提示に関する坂井ら[19], [20]の研究は、格子状に配置した抽象オブジェクトのサイズや間隔などの提示条件が探索時間に与える影響を求め、最適な提示パタンの指針を得た。この実験では、本論文と同様の触覚ディスプレイを用い、12個の抽象オブジェクトを電話式テンキーのように配置した。このうち形状の異なる1つを触覚で探索するタスクを与え、探索時間で最良の提示条件を評価した。実験結果から、抽象オブジェクトのサイズが2×3(dot)以上になると探索時間が有意に小さくなり、抽象オブジェクトの配置は手指に収まる範囲(30~60mm)が良いことが示唆された。この実験では、デジタル放送のメニュー項目の提示を兼ねたため、提示パターンを日常的に慣れている4×3の電話のテンキーに限定していた。

2.2 触覚ディスプレイによる表の提示の可能性

表計算ソフトで提示された複雑な表の全体をスクリーンリーダーのような画面読み上げソフトだけで理解するには限界があり、時間を要する。本論文や、筆者らの一連の実験は、この課題を軽減するために、触覚ディスプレイを用い、格子状に配置したオブジェクトの配置パターンや提示条件が探索に与える影響を検証するのが目的である。

触覚による認知に関して、和氣[21]・Lederman[22]は、浮き上がった点や線で表示される文字や図形などの認知実験を行い、二次元情報を手掌や指先を使って認知することは可能ではあるが、能動的な触運動モードでも容易ではないこと、視覚に比べれば認知の速度は遅いという見解を示している。

本論文で対象とした提示条件は、抽象化された基本的なオブジェクトの形状であり、配置されたオブジェクトを弁別できれば良いので、図形の形状認知とは異なり、複雑な形状認知のメカニズムは必要ではない。この観点からは、触覚ディスプレイを用いて、表計算ソフトで提示される表の全体の構成や、探索しているセルの相対的な位置関係の把握や理解が可能と考えている。

3. 触覚探索実験

3.1 実験の目的

本実験は、階層的なメニューの構造や表計算ソフトの spreadsheet を触覚提示で表すときに、触覚ディスプレイ上のオブジェクトの配置条件が探索効率にどのように影響するかを明らかにし、最適な提示パターンを得ることを目的とした。

3.2 実験装置

触覚ディスプレイは、微小ピンアレイを平面に実装し、凹凸で画面を表示する平面型の提示デバイスである。実験は、96×64ドット(全6144ドット)、ピッチ2.4mmの、広面積の触覚ディスプレイを用いた。図1は触覚ディスプレイ実験装置の外観である。画像信号を2値化し、触覚提示の画素数に変換して凹凸で形状を表示する。これにより、図や表、グラフなどの形状理解の支援のほか、リアルタイ

ムな情報におけるメニュー画面の選択ボタンや階層を、通常の画面に忠実に提示するほか、配置や形状を変えて提示することが可能である。

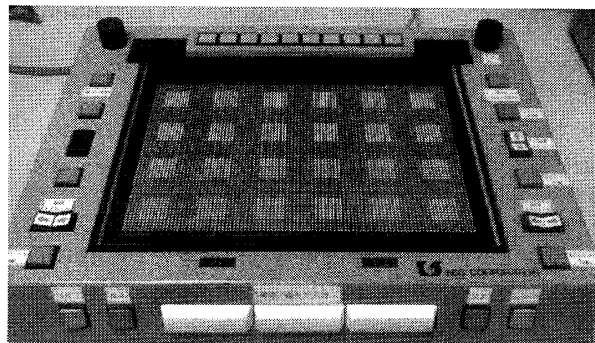


図1 触覚ディスプレイ実験装置の外観図

3.3 実験の方法

(1) 実験条件

触覚ディスプレイ上に格子状の抽象オブジェクトを提示する場合に、抽象オブジェクトの探索に影響を与える要因として、提示パターンP、一つの抽象オブジェクトを構成する縦横のピン数(以後オブジェクトサイズS)、抽象オブジェクト間のピン間隔Dの3つを設定した。ここで、提示パターンPは、格子状に配置するオブジェクトの縦横の数が異なるパターンであり、横長型と縦長型、正方形に分類できる。それぞれの要因の水準を表1に表す。また提示する正方形、横長型、縦長型のそれぞれのパターンと、オブジェクトサイズおよび間隔の概念を模式的に図2に示す。

これらを要因として、3元配置の乱塊法により探索時間に与える影響を求めめるための実験を実施した。実験では、触覚ディスプレイ実験装置(図1)を用い、格子状に抽象オブジェクトを配置した。提示パターンとオブジェクトサイズ、オブジェクト間の間隔の要因について、全ての水準の組み合わせ(10×2×2)=40試行をランダムに提示した。40試行を1サイクルとし、これを12回繰り返す、合計480試行を行った。一つの提示パターンにおいて、探索する行列の位置は12通りである。従って提示面積の中でほぼ全体に均等となるように設定した。

表1 3元配置による要因と水準

要因	水準
パターン:P (cell×cell):	(正方形)4×4, 8×8, (横長型)4×8, 4×12, 4×16, 8×12, (縦長型)8×4, 12×4, 16×4, 16×8
オブジェクトサイズ:S(dot×dot)	2×2, 4×4
オブジェクト間隔:D(2.4mm/dot):	1dot, 2dot

(2) 被験者

被験者は晴眼者4名, 視覚障害者2名の計6名で実施した。被験者6名はいずれも右利きであった。晴眼者にはアイマスクを着用するように指示した。視覚障害被験者2名はいずれも全盲であった。なお本実験を実施するにあたっては事前に実験内容の説明を行いその目的・方法を説明した後被験者から承諾を得た。

(3) タスク

被験者には, ターゲットとなるオブジェクトの行と列の位置を指示し, 二次元に配置したパタンのうちターゲットオブジェクトを片手の指全体で発見する触覚探索課題を与えた。格子状の表のパタンの1行1列に指を置き, 「スタート」の合図とともに, 探索を始めた。探索は片手のみで行うように指示し, ターゲットの発見ができた時点で被験者は口頭で回答した。

探索にあたり, 提示したパターンは告げず, 「スタート」の前に全体を触れるのを許した。探索中の被験者の動作に対しては制限を設けず, 被験者が探しやすい方法で, できるだけ正確にターゲットオブジェクトを発見するように指示し, 誤答した場合はエラー値として取り扱った。また, タスクはすべて音声合成で教示した。

(4) 探索時間の算出

探索時間は, 実験用に開発した Windows API で提供されている高分解能タイマ(PerformanceCounter)を実装したストップウォッチで計測し, アプリケーション内部で合成音声とフィッティングさせた。計測開始はアプリケーション側で制御させ, 停止は被験者が回答した時点で手動で行った。

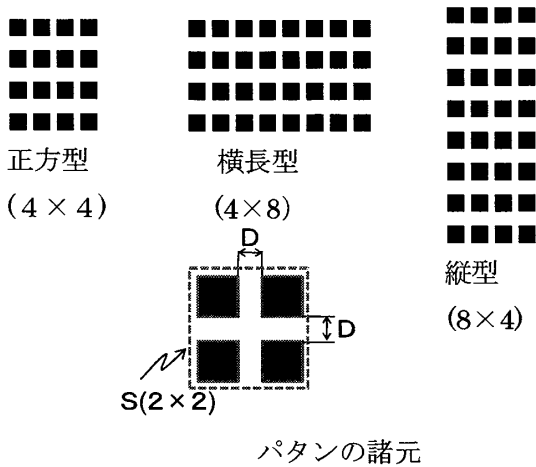


図2 提示パタンの模式図

3.4 実験結果

(1) 探索時間データの処理

実験中の観察で, M行N列のタスクにおいては被験者はオブジェクトの順序を正確に指で認識する必要があったことから, 実際には斜め方向の探索はみられず, 立て方向から横方向への触覚探索方式の順序付けがみられた。加えて, 3.2の実験条件で述べたように, タスクごとの探索時

間は提示パタンごとに与えられる探索位置の影響を含む。そこで, 探索位置の影響を除去するために, 各探索時間(x)の平均値を求め, 次式で, 探索する経路長で規格化し, 行(m)と列(n)の1経路に要する時間に換算した。

$$\text{規格化した探索時間} = x / \{(m-1) + (n-1)\}$$

以後の分析は規格化した探索時間に基づいて行った。

(2) 分散分析による要因効果

抽象オブジェクトの配置条件による探索時間の要因効果を分散分析で求めた。提示パタン(P), オブジェクトサイズ(S), オブジェクト間隔(D)を従属変数とし, 探索時間を独立変数とする3元配置の分散分析の結果, 表1で示した要因のそれぞれの主効果P, D, Sと交互作用S×Dが以下の通り有意となった。

$$\text{主効果P: } (F(9, 423) = 4.454, P < .01)$$

$$\text{主効果S: } (F(1, 47) = 68.31, P < .01)$$

$$\text{主効果D: } (F(1, 47) = 70.272, P < .01)$$

$$\text{交互作用S*D: } (F(1, 47) = 10.577, P < .01)$$

(3) 提示パタンのカテゴリ別要因効果

提示パタンについて縦長型, 横長型, 正方形のカテゴリに分類してそれぞれの要因効果を分散分析で求めた。カテゴリの分類を表2に, 分散分析の結果を表3に示す。すべてのカテゴリにおいて主効果が1%の危険率で有意となり, 交互作用はなかった。

カテゴリで分類した探索時間は, オブジェクトサイズ4×4ドットよりも2×2ドット, オブジェクト間隔1ドットよりも2ドットの方が小さくなった。

表2 提示パタンのカテゴリ分類

横長型:H	4×4, 4×8, 4×12, 4×16
縦長型:V	4×4, 8×4, 12×4, 16×4
正方形:Sq	4×4, 8×8

表3 提示パタンのカテゴリ別分散分析結果

要因	2乗和 SS	d f	平均平方 MS	F比	有意確率 p
Sq:P	726773.03	1	726773.03	13.93	0.001
Sq:S	591032.66	1	591032.66	15.03	0
Sq:D	711506.30	1	711506.30	18.21	0
V:P	796924.54	3	265641.51	3.51	0.017
V:S	1293520.98	1	1293520.98	35.06	0
V:D	1703991.70	1	1703991.70	52.58	0
H:P	1833196.95	3	611065.65	8.51	0
H:S	660142.50	1	660142.50	23.67	0
H:D	674843.98	1	674843.98	24.79	0

(4) 提示パタンと探索時間の結果

図3~5は, それぞれ, 横長型, 縦長型, 正方形の提示パタンに対する探索時間を示す。グラフより以下のことがいえる。

- ・横長型提示パターンと縦長型提示パターンでは、探索する長さ方向において探索時間がU字型であり、極小となる条件がある。
- ・横長型提示パターンでは 4×12, 縦長型提示パターンでは 8×4 または 12×4 がほぼ極小である
- ・4×4, および、縦横ともに提示パタンの長さ方向が大きい場合には探索に要する時間が大きい。

表 4 は、提示パターンごとに探索時間の全平均を求め、段階的な探索時間に分類した結果である。

これから、横長型提示パターンで 4×12 がほかの提示パターンに比して明らかに探索時間が短くなった。本実験の探索条件においては最も探索の効率が高いといえる。

また、横長型と縦長型提示パターンとの比較では、4×12, と 12×4 のパターン, 4×16 と 16×4 において、いずれも横長型パタンの探索時間が大きい。これは、格子状の提示パターンにおいて、縦方向よりも横方向の探索が容易であることを示している。

表 4 段階的な探索時間に対する各提示パタンの分類

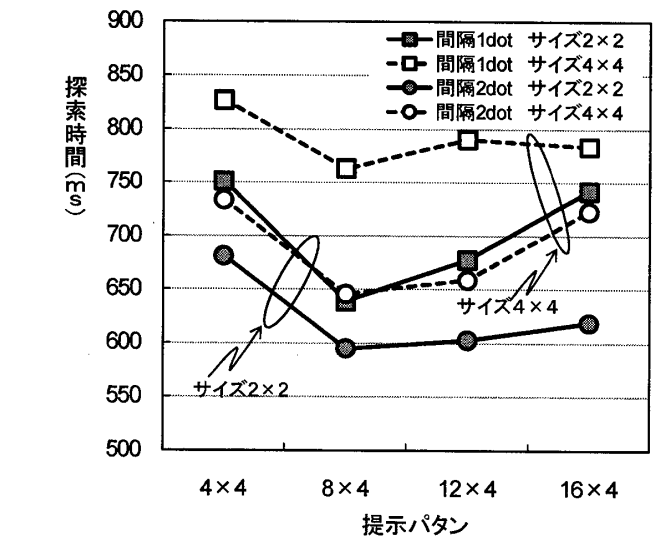


図 4 縦長型提示パターンと探索時間との関係

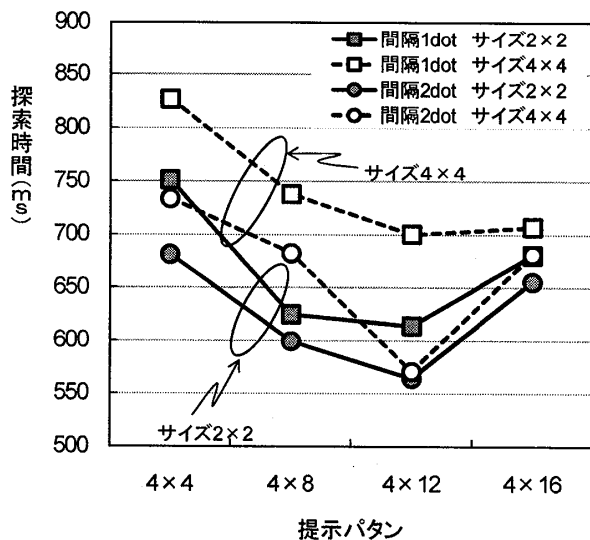


図 3 横長型提示パターンと探索時間との関係

探索時間	探索時間の全平均値	提示パターン
I 群	600~650	4×12
II	650~700	4×8, 4×16, 8×4, 12×4, 8×8
III	700~750	4×4, 16×4

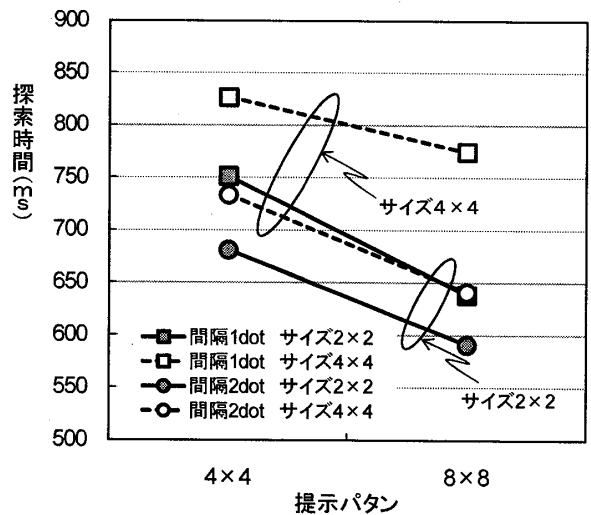


図 5 正方形提示パターンと探索時間との関係

3.5 考察

- (1) 抽象オブジェクトの配置条件が探索時間に与える影響
実験結果から、オブジェクトの探索において、オブジェクトサイズ S とオブジェクト間隔 D の主効果が有意となった。探索時間が最小となったのは、オブジェクトサイズ 2

×2ドット、オブジェクト間隔2ドットであった。このパターンは2×3ドットで構成される点字に近似しており、指を動かさずに全体を触れられるサイズである。指を動かして探索する場合にも十分に抽象オブジェクトを認知できる大きさといえる。オブジェクト間隔については、間隔が1ドットでは、2ドットに比して探索時間が大きくなった。点字では隣接する文字のドット間隔は通常1ドットである。触覚探索の場合に間隔1ドットの条件で時間を要した理由には、今回の実験のように確実に隣接するオブジェクトを識別するには、点字で文字を知覚する場合と、抽象オブジェクトの位置を探索する場合とでは、手や指の動かし方や注意の向け方によってドット間隔が変化することが考えられた。

実験後の内観報告では、オブジェクトサイズについては2ドット、オブジェクト間隔は2ドットがもっともわかりやすかったという回答がおおむねであった。また、オブジェクトのサイズ4×4において、間隔が1ドットではわかりにくいという回答が多く、このことからオブジェクト間隔は2ドットは必要といえ、先行研究[19, 20]の実験を裏付ける結果となった。

(2) パタンの提示条件が探索と触覚動作に与える影響

横長型提示パターン、縦長型提示パターンにおいて、両者ともに探索時間は長さ方向で極小値を持つU字型の曲線となった。このことは、提示パタンの長さ方向に最適な提示パタンのエリアが存在することを意味する。

横長型の提示パタンの提示条件で、探索時間が小さくなったオブジェクトサイズ2×2ドット、オブジェクト間隔2ドットについて、それぞれの横方向の最大距離を求めると以下となる。

4×4: 34mm, 4×8: 53mm, 4×12: 72mm, 4×16: 91mm

実験前は、4×4のパタンのように小さい提示エリアの方が即座に位置を把握できるので、探索時間が短いという仮説を立てたが、結果は逆になった。その原因の一つには、触覚動作の観察より、被験者は4×4においても、他の提示パターンと同様に1経路ごとに順次探索していたことがあげられる。探索前に提示パターンを教示した場合には、4×4のような狭い探索エリアでは、あらかじめ位置関係を把握し、オブジェクトを直接ポインティングできるので探索時間が軽減される可能性があり、今後検証する予定である。

横長型提示パタンの探索で4×12のパタンの探索時間が極小となったのは、触覚動作において、4×16では肘の運動が必要になるのに対し、手首と指だけの動きで探索できたことが考えられる。また、4×4との比較では、ある程度オブジェクト数が多い方が、継続的な速い指の触覚動作でオブジェクトを発見できたことも探索時間を減少した原因の一つと考えられる。

横長型提示パターンと縦長型提示パターンとの比較で、横長型提示パターンの方の探索時間が小さくなった理由には、縦長型提示パターンでは触覚において肩の運動を必要とすることが考えられる。

実験後の被験者の内観報告では、格子状に配置した抽象オブジェクトの探索方法に関する行を上から下へ探索した後、列を横方向へ動かすという意見があった。また、実験中の被験者の触覚動作の観察では、提示パターンに対して、手指の大きさの範囲であれば関節動作を行わずに、指と手

のひら全体で内容を把握していた。横長型提示パターンで横方向の探索エリアが大きくなると、手指の動作範囲を肘関節を中心に表示エリアを確認して探索していた。縦長型提示パターンでは、縦方向の探索エリアが大きくなると、肩の上下方向の運動が加わるようになった。

これらのことから、格子状パタンの探索時間を極小とする適切な提示面積があること、それは手首の運動範囲内である条件であることが示唆された。

しかし、今回の実験で用いた触覚ディスプレイは、刺激ピンを点間隔2.4mmで実装した離散的な点刺激でオブジェクトを表示するタイプである。格子状に配置した抽象オブジェクトを探索する場合に、探索時間に影響を与える要因は、触覚動作における運動の距離と、離散的な点刺激とが触覚認知に影響を与えることの二つが混在している。したがって、実験で得られた探索時間を最小とする提示パターン4×12の横方向の最大距離は、普遍的に最適な距離を示しているものではない。これについては今後明らかにしていくべき課題である。

(3) 実用的な触覚ディスプレイにおける提示条件

今回の実験より、表などのオブジェクトをユーザーが探索しやすい適切な配置パターンと、触覚ディスプレイに求められる所要要件の指針として以下のことが示唆された。

- ・ 表のオブジェクトの配置は横長型提示パターンが適している
- ・ 点間隔2mm級の触覚ディスプレイでは、横方向のドット数は30ドット程度、最大距離60~70mm程度のサイズがあれば良い

これらの知見は、図などの形状が意味するコンテンツを除き、階層構造のメニューやアイコンの配列、ツリー構造などの抽象的なコンテンツを表示する場合のオブジェクトの配置条件として適用できると考える。

4. まとめ

本論文は、インターネットのコンテンツや、オフィスで頻繁に使用される表計算ソフトにも対応可能な抽象オブジェクトの配置条件の指針を得ることを目的に、触覚ディスプレイ上のオブジェクトの配置条件が探索効率にどのように影響するかを把握し、最適な提示パタンの指針を得るための評価実験を行った。その結果、格子状に配置した抽象オブジェクトの探索において、ユーザーが探索しやすい適切な提示パタンの条件として、以下の知見を得ることができた。

- ・ 抽象オブジェクトのサイズは、点字サイズがあれば十分であるが、隣接との間隔は点字よりも広い方が探索時間が軽減できる
- ・ 抽象オブジェクトの提示パターンは、縦長型よりも横長型の方が探索時間を軽減できる
- ・ 横長型と縦長型の提示パターンにおいて、抽象オブジェクトが同一サイズの場合の探索時間の比較では、それぞれの長さ方向の抽象オブジェクトの数に対し、探索時間はU字型で極小となる条件が存在する
- ・ 上記については、触覚の運動範囲に影響することが考えられ、手首の運動範囲と比べ、肘や肩の運動を必要とする範囲の方が探索時間を要する

残された課題には、提示パタンの長さ方向の触察において、探索時間が最小となる距離は、純粹に運動の距離に起因するのか、離散的な点刺激が認知に影響しているのかを明らかにすることがある。

今後、本実験で得られた知見を基礎として、ディスプレイサイズが小さい場合を想定し、面積やオブジェクト数が少ない既知の提示パターンでの探索時間や、両手で探索した場合の差異などについてさらに検証を深めていく。また、実際の表について、触覚提示と音声を用いたときの効果について検証を行い、視覚障害者に表を提示する場合の最良の条件を、より明らかにしていきたい。

文 献

- [1] 渡辺, 須貝, 為近: "グラフィカル情報提示のための触覚ディスプレイシステムに関する研究"; 障害者職業総合センター調査研究報告書, No.41 (2001).
- [2] 坂井, 近藤, 清水, 鈴木: "GUI に対する視覚障害者のためのマルチモーダル情報提示環境の検討"; ヒューマンインタフェース学会研究会, Vol.No1, pp.29-34, (2003).
- [3] 坂井, 近藤, 半田, 伊藤: "GUI や表を伝える触覚提示インタフェースと評価"; 電情通学会研究会 TL2005-39, WIT2005-64, pp.25-30, (2006).
- [4] 半田, 坂井, 御園, 森田, 伊藤: "タッチパネル搭載型触覚ディスプレイを用いたインタラクティブな提示方式"; 電情通学会研究会 TL, WIT2007-47, pp.83-86, (2007).
- [5] 海老名, 猪木, 三宅, 高橋: "触覚ディスプレイを用いた GUI オブジェクトの探索法"; 電情通学会論文誌 A, Vol.J80-A, No.11, pp.2007-2016, (1997).
- [6] 渡辺, 岡田, 伊福部: "GUI に対応した視覚障害者用スクリーンリーダーの設計"; 電情通学誌 D-II, J81-D-II, No.1, pp.137-145, (1998).
- [7] 安村: "計算機システムのバリアフリー 障害者対応マルチメディアシステムの研究開発"; 電情通学誌, Vol.84, No.5, pp.329-332, (2001).
- [8] 小柳, 志村, 山県, 永田: "オプタコン研究の動向(1)"; 特殊教育学研究, 17(2), 19791015, pp.42-54, (1979).
- [9] 小柳, 志村, 山県, 永田: "オプタコン研究の動向(2)"; 特殊教育学研究, 17(3), 19800315, pp.55-70, (1979).
- [10] Scadden, L.A.: "Tactile pattern perception and body loci"; Perception, 2, pp.333-336, (1973).
- [11] Loomis, J.M.: "An investigation of tactile hyperacuity"; Sensory Processes, 3, pp.289-302, (1979).
- [12] Johnson, K. O. & Phillips, J. R.: "Tactile spatial resolution : Two-point discrimination, gap detection, grating resolution, and letter recognition"; Journal of Neurophysiology, 46, pp.1177-1191, (1981).
- [13] Phillips, J. R., Johnson, K. O., & Browne, H. M.: "A comparison of visual and two mode soft actual letter recognition"; Perception and Psychophysics, 34, pp.243-249, (1983).
- [14] P. Bach-y-Rita, "Tactile Vision Substitution: Past and Future"; International Journal of Neuroscience, Vol. 19, pp.29-36, (1983).
- [15] Lindblom, U.: "The Afferent Discharge Elicited by Vibrotactile Stimulation"; IEEE Transactions On Man-Mach Syst, No.1, pp.2-4, (1970).
- [16] M. Shinohara, Y. Shimizu and A. Mochizuki: "Three-Dimensional tactile display for blind"; IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol.No3, pp.249-256, (1998).
- [17] 岡田, 兼吉: "障害者対応マルチメディアシステムの開発～非視覚的 GUI アクセス システム～"; 信学技報, WIT99-6, pp.35-40, (1999).
- [18] 坂井, 近藤, 津田: "触覚ディスプレイを用いた視覚障害者のためのデータ放送メニュー画面アクセスの一検討"; 電情通学会総合大会, A-14-8, pp.286, (2002).
- [19] 坂井, 半田, 比留間, 伊藤, 伊福部: "2 次元触覚パタンの提示条件がオブジェクトの探索に与える影響"; 電情通学会総合大会, A-19-5, pp.370, (2007).
- [20] 御園, 坂井, 半田, 小田: "触覚探索におけるオブジェクトの配置条件と提示方式に関する基礎実験"; 信学技報, Vol.108, no.488, WIT2008-74, pp.31-36, (2009).
- [21] 和氣: "触覚によるパターン知覚"; 大山正, 今井省吾, 和氣典二 (編) 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, pp.1279-1294, (2007).
- [22] Lederman, S. J., & Klatzky, R. L.: "Flexible exploration by human and robotic haptic systems"; Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Vol.12, No.5, pp.1915-1916, (1990).