

静電気力触覚ディスプレイにおける 複数指による触察の有効性の調査

富田 洋文*¹ 嵯峨 智*² 高橋 伸*¹

An Investigation of the Effectiveness of Multi-finger reading on Electrostatic Tactile Display

Hirobumi Tomita*¹, Satoshi Saga*² and Shin Takahashi*¹

Abstract – Various tactile displays have been developed to present tactile graphics. Among them, electrostatic tactile displays are promising because of their low cost and flexibility. This study investigates the effectiveness of reading tactile graphics with multiple fingers on an electrostatic tactile display. For this purpose, we implemented an electrostatic tactile display using silver nanoparticle ink to allow multi-finger reading. Then, we conducted an experiment to compare one-finger and multi-finger reading with the implemented tactile display. The results showed that, in the multi-finger condition, the recognition rates were higher, and reading times were shorter, which indicates the effectiveness of multi-finger reading on the electrostatic tactile display. These results differ from other tactile displays, and is considered to be related to the size of the tactile graphics and factors specific to electrostatic tactile display. In addition, we observed the strategies for capturing a figure in each condition and examined the use of these strategies. By comparing these strategies with other related works, we consider that these strategies can be used as a reference for design guidelines regarding the presentation of tactile graphics with electrostatic tactile display.

Keywords : Tactile graphics, Electrostatic tactile display, Multi-finger interaction, Silver nanoparticle ink electrode

1. はじめに

視覚障害者が表やグラフといった図をコンピュータから読み取することは難しい。音声を用いることで文字の読み書きは可能であるが、音声のみで図やグラフをユーザに提示することは困難である。

そのため様々な触覚ディスプレイを用いた触図提示装置が開発されている。触覚ディスプレイとはユーザに対して重さや感触といった触覚体験を提示する装置である。代表的な触図提示装置として、点図ディスプレイやピンアレイ装置がある^{[9],[16]}。これらの触図提示装置を用いた図形認識に関する調査がされており、高い識別正答率かつ早い探索時間で図の情報を提示できることが分かっている^{[3],[16]}。しかし、点図を印刷する装置やピンアレイ装置は、製作コストが非常に高い。

より安価かつ小型の装置で触覚提示を行うために、静電気力触覚ディスプレイを利用した。このディスプレイ手法は電圧源、電極、そして絶縁膜という単純な構成である。先行研究では3M Microtouchを利用し

た装置^{[11],[21]}や、銀ナノインク^[17]を用いたが、一般商用の材料でも構成できるため、プロトタイプを作る際に費用コストが安く、すぐに手に入りやすい材料で製作できる利点がある。そしてユーザの指に対して粗さや滑らかさといったテクスチャ感を提示できること^[10]や透明な電極を使用することでタブレット端末上でテクスチャ感を提示できる^[11]特徴がある。

我々はこの触覚ディスプレイを用いて図形情報を提示することを検討し、予備実験を実施した^[12]。この結果、図形によっては識別率が低い数値となった。我々はこの原因が触察の際に一本の指しか使えないことではないかと考えた。なお、本稿における触察とは字や図形情報を指の触覚を通して認識する行為である。一般的な触察行為においては、複数指を同時に用い、対象上をなぞることが多い。

これまでに物理形状の触覚ディスプレイを用いて一本指と複数指で触図の識別を比較調査した研究がある^{[8],[16]}。これらの調査から触図の大きさによって複数指による触察の有効性の可能性が見いだされた。しかし、これまで静電気力触覚ディスプレイを用いて一本指による触察と複数指による触察を比較した調査はなく、静電気力触覚ディスプレイではどのような結果になるかが明らかになっていない。

また、触察の観点でも、これまで複数指で物理形状

*1: 筑波大学大学院システム情報工学研究科

*2: 熊本大学大学院先端科学研究部

*1: Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba

*2: Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University

を認識するための触察戦略に関する調査は行われてきたが^{[6],[25]}, 静電気力触覚ディスプレイの場合において複数指でどのような触察行為が行われるかは調査されていない。今後, 静電気力触覚ディスプレイにおける触図提示の設計指針のために, この触察戦略に関する調査は必要である。

そこで, 本研究は静電気力触覚ディスプレイにおいて, 一本指と比べ複数指による触察がどれほど有効性があるか, またどのような触察戦略が行われるのかを調査することを目的とし, さらにこの調査結果が静電気力触覚ディスプレイの特有な結果であるかを検討する。そのため, 複数指への触覚提示を可能とする静電気力触覚ディスプレイを実装し, このディスプレイを用いた図形識別に関する評価実験を実施した。

従来の静電気力触覚ディスプレイはスクリーン全体に広がる単電極を用いて触覚を提示するため, 図形に応じた触覚を複数指に同時に提示することができなかった。そのため, 静電気力触覚ディスプレイにおける先行研究においては一本の指による触察のみを対象としており, 複数指を用いた触察の有効性について確かめられていなかった。なお, 本稿における複数指は二本以上の指のことを示し, 両手一本ずつの場合においても複数指とした。今回, 我々は複数指による触察を可能とするために, 過去の研究でも利用されている銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイ手法を利用した^{[17],[18]}。この装置では, 様々な図形の電極を銀ナノインクで印刷, 交換することにより様々な図形を提示することができる。また, 触覚が提示されるのは図形の形状となっている電極上だけであるため, 単電極ではあるが複数指での触察が可能になる。

我々はこのディスプレイを用いて一本指および複数指での触察による図形識別に関する評価実験を実施した。評価実験において実験協力者は4種類の図形をそれぞれ触察し, 触察した図形がいずれであるかを回答した。この実験から図形ごとの識別正答率と, 識別するまでの探索時間を収集した。そしてこれらの結果から, 図形識別度および探索時間のどちらも複数指での触察が一本指による触察を上回り, 複数指による触察の有効性が確かめられた。そしてこの実験結果に関する考察に加え, それぞれの触察方法において図形を認識するための戦略が主に2種類見られ, それらの図形識別度や探索時間の結果から各戦略が触察においてどのような有用性があるかを考察した。

2. 関連研究

2.1 触図提示装置

二次元上に広がる線や点, または面といった形状情報を触覚を用いて視覚障害者に伝達するツールとして

触図がある。この触図は, 主に地図やグラフのように, 音声のみで伝えることが難しい形状情報を視覚障害者に伝えるために利用される^[13]。これらの触図は主に図の情報に基づいた凹凸を作り, この凹凸をユーザが触ることで情報を提示する。触図の例として点図の提示や触地図を用いた図の情報提示がある。コンピュータ内で作成した文字や図を点字として印刷できる点字印刷装置システムがある^[2]。これにより文字や簡易的な図といった情報を表す点図を印刷することができ, その上を指でなぞることで情報をユーザに提示することができる。また道路や建物の形状情報を伝える触地図がある。この触図は主に図の情報に基づいた凹凸を作り, その凹凸をユーザに触れてもらうことで情報を提示させる。近年ではコンピュータ内の地図情報や図の情報を専用の印刷機と硬化用機材を使うことで容易に印刷することができる^[1]。

他の触図提示装置として, ピンアレイを用いた触覚ディスプレイがある^[9]。この提示手法は図形の境界線に凹凸を作り, この境界線をユーザがなぞることで図形を認識させる。しかし, ピンごとに凹凸を作るアクチュエータが必要となり, この結果, 装置の内部構造が大きくなる。そこで静電アクチュエータやピエゾ素子を用いることで, 小スペースで構成できる装置が開発された^{[14],[15]}。しかし, これらの触図製作装置やピンアレイといった触覚提示装置は費用コストが高い。

触覚ディスプレイの一つに静電気力を用いた触覚ディスプレイがある。静電気力触覚ディスプレイは3M Microtouchを利用した装置^{[11],[21]}から, 銀ナノインク^[17]を利用した装置, また一般商用で扱っている材料でも製作が可能のため, 費用コストが安いプロトタイプが製作しやすい。また, このディスプレイはユーザの指に対して入力波形を変えることで粗さや滑らかさといったテクスチャ感を提示できることも特徴である^{[10],[11]}。そのため我々は静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示手法に着目した。

この触覚ディスプレイに関する先行研究では, 入力波形と刺激強度や触感の関係を調査するための研究がされてきた。Vardarらは, 入力波形と人間の触覚知覚の関係性を調査した^[19]。この研究から波形の種類ごとに指の知覚に違いが表れることが調査された。また入力波形に対する触感に関する調査^{[10],[11]}から振動といった単純な刺激から粗いテクスチャや滑らかなテクスチャといった触感表現まで提示できることが分かった。我々はこの触覚ディスプレイを用いて図形情報の提示を試みた。

2.2 触図の認識に関する研究

これまで触図の認識に関する多くの調査が行われてきた。点図に関する調査では, 点のサイズや点同士の

間隔によってユーザの読み取りやすさの変化について調査されており、線または図の境界線を提示する場合には大きな点を用いて強い刺激にする、または点同士の間隔を離して刺激を離散的にすることで図の認識の向上を図った^{[4],[5]}。また触地図をユーザに利用してもらい、目的地や経路探索といった地図情報が提示できることも確認されている^[7]。

そして点図を用いてどれほど図形を識別できるかに関する調査が実施された^[3]。この調査では、円や四角、三角、平行四辺形といった基本的な図形を提示したところ、平均識別正答率は高く、図形の種類やサイズによって識別正答率が異なることが分かった。特に、どの図形もサイズが大きくなるほど識別正答率が増加する傾向が見られた。11.5 mm のサイズであれば先天盲者は 100%、後天盲者でも平均正答率が 85.3% と高い識別率となった。

静電気力触覚ディスプレイでも触図の提示に関する調査が行われた。このディスプレイでは提示するテキスト感の違いを利用して図の情報をユーザに提示するレンダリング手法で行われた。Bateman らはこの提示手法を用いて平面上に提示した点をユーザが見つけれられるかどうかについて調査した^[20]。Xu らは単純な図形を用意し、触覚提示領域を境界線上にのみ提示、図形内部のみに提示、そして境界線と図形内部で違う触覚を提示という 3 種類のレンダリング手法を実施したところ、図形内部のみの触覚提示による識別率が一番高い結果となった^[21]。

我々もこのレンダリング手法を用いて基本的な図形を使用した図形識別に関する調査を実施した^[12]。この調査は、静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示において、図形の違いによる識別精度の検証を目的とした。そのために基本的な 4 つの図形である、円形、四角形、三角形、星形を用意し、それぞれの図形をユーザが識別できるかを調査するために評価実験を実施した。この実験の結果、平均識別正答率は 68.3% であった。特に円形と四角形が互いに間違えて回答した割合が多いことも確認された。

これらの結果から、他の触覚ディスプレイと比べ静電気力触覚ディスプレイは触図の提示に関してユーザの識別正答率が低く、まだ触図提示装置として有用するには難しいと考えられる。この静電気力触覚ディスプレイによる触図提示において、我々は複数指による触察を行うことで、図形の位置や距離といった図形情報がより多く得られ、図形の識別度も向上できるのではないかと考えた。

2.3 触図の認識を一本指と複数指で比較した研究

過去の先行研究において一本指と複数指での図形識別に関する調査が行われてきた。振動付き点図ディス

プレイを用いた場合では、複数指を使う方が図形の認識度が下がる結果となった^[8]。しかし、Uematsu らのピンアレイ装置 (DotView DV-2) を用いた図形の提示では^[16]、識別正答率の結果に関しては、一本指と複数指に差異はほとんどなく、探索時間に関しては、サイズによっては複数指の方が探索時間が早くなる傾向があった。このように提示する図形の大きさが変わることによって図形を認識するまでの探索時間も一本指と複数指で差が表れたと考えられる。しかし、静電気力触覚ディスプレイでは識別正答率と探索時間に関する一本指と複数指の比較調査は明らかになっていない。

そこで本研究では、静電気力触覚ディスプレイ装置を用いた場合において、一本指による触察と複数指による触察の結果を比較し、どれほど複数指による触察で図形識別が向上するかを調査する。またこれらの調査結果から、他のディスプレイでの結果と比較し考察する。

2.4 触察戦略に関する研究

複数指による触察の有効性を調査するにあたり、本研究において静電気力触覚ディスプレイでは図形識別のためにどのような触察の戦略が行われるかについて調査する。触察戦略に関する研究に関して、Lederman による調査では、人が触察する際の手指の使い方として 6 つの戦略に分けられることが調査された^[25]。このうち本研究の調査対象となる二次元的凸図は主に「輪郭探索」、「表面をこする」、そして「静的接触」で触察されることが分かっている。また Kwok らは実際の物理形状の触図を使用し、視覚障害者と健常者がどのように図形情報を取得しているのかを調査した。この結果、健常者の触察は図形全体を一度に視覚的に再現しており、視覚障害者の触察は触覚を感じた部分から再現しているといった触察手順が見いだされた^[6]。

しかし、これまでの静電気力触覚ディスプレイは主に一本指による触察のみであったため、複数指による触察においてどのように指を動かすのかに関して調査がされていない。特に静電気力触覚ディスプレイは静止した指に触覚を提示できないという特徴もあるため、今後の触図提示に関する設計指針のために、この調査は必要となる。そこで、本研究では静電気力触覚ディスプレイにおける一本指と複数指の比較調査と共に、複数指での触察戦略に関する調査も実施する。

3. 複数指による触察が可能な静電気力触覚ディスプレイ

本節では静電気力触覚ディスプレイの原理と銀ナノインク電極を用いた複数指対応の触覚ディスプレイの実装について述べる。

3.1 静電気力触覚ディスプレイ

静電気力を用いた触覚提示装置は主に高電圧発生装置、平面状の電極、そして絶縁膜で構成される。図 1 (a) のように、電極は高電圧発生装置と繋がっており、電極表面は絶縁膜で覆われている。高電圧発生装置から電極に高電圧を印加し、人間の指を絶縁膜上に置くと、指と電極の間で誘電分極が発生する (図 1 (b))。この誘電分極により指と絶縁膜の間で電荷が帯電し、非常に薄い絶縁層であれば静電気力による吸引力が発生する。しかし、指を動かさない場合では、この吸引力のみで触覚を提示することは難しい。静電気力が発生した状態で指を絶縁膜上でなぞることで、もともとある絶縁膜との摩擦力に加え、この静電気力による剪断力が働く。さらに電極に印加する電圧値を変化させることでこの剪断力も変化し (図 1 (c))、この変化した剪断力により指が何らかの触覚を知覚することが可能となる。また、印加する電圧の波形を変えることで様々な触感を提示することが可能である [10], [11]。

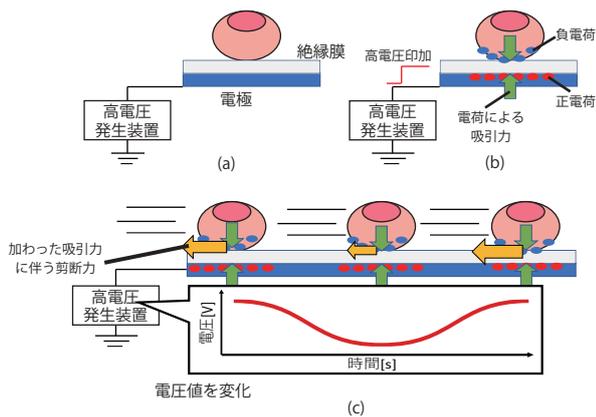


図 1 静電気力を用いた触覚提示システム

これまでの静電気力触覚ディスプレイはスクリーン全体に広がる単電極を用いているため、同じ電極上にあるすべての指に同じ触覚を提示してしまう問題がある。そのため、これまでの触覚提示時には一本指による触察が余儀なくされた。本研究では、複数指による触察の有効性を調査することが目的のため、複数指それぞれに触覚を提示できる静電気力触覚ディスプレイを検討する必要がある。

複数指の触察に対応した試みとしては、Ilkhani らの研究がある。Ilkhani らの装置は直交する電極線に特定の電圧の交流信号を印加することで、この交点において高電圧を発生させ、その上部において指をなぞることで触覚を提示させた。そしてこれを複数点で行うことで、触覚提示領域を変えることができ、静電気力触覚ディスプレイとして複数指への触覚提示を可能にした [22]。また我々も複数電極を用いて複数指に対する触覚提示を可能とするデバイスの開発を行ってき

た [23]。しかし、これらの装置の図形情報提示に関する評価や、一本指と複数指による触察の比較を調査した研究は無い。そこで本稿では、複数指に対応した評価実験を実施するための触図提示装置として、銀ナノインク電極を用いた静電気力触覚ディスプレイを利用することにした。

3.2 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイ

静電気力触覚ディスプレイにおいて複数指による触察を可能とするために、我々は本稿における実験用装置として銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイを作成した。

これまでに静電気力触覚ディスプレイと銀ナノインクを組み合わせた研究として Kato らの触覚ディスプレイがある [17]。このディスプレイは指表面に電極付きのパッドを装着し、この指に対して電気刺激と静電気力による剪断力提示を組み合わせることで触覚提示を行った。これにより、静電気力によるテクスチャ感の提示と、電気刺激による静止した指への触覚提示を可能とした。そして、このテクスチャ感を提示する際に、銀ナノインクによって印刷された図形状の電極上に指がある場合のみ触覚を提示する手法を用いた。また Fukuda らは電極上に塗装を施し、さらに絶縁層を設けることで色のついた絵の上で触覚をユーザに感じさせることを可能にした [18]。この手法も Kato らと同じく、図形状に印刷された電極上でのみ触覚を提示する手法を利用した。これらの提示手法は複数指でなぞれる利点がある。これらの提示手法を本研究での評価実験で利用することで、一本指と複数指での触察での比較調査を実施することができる。

このディスプレイは高電圧発生装置、絶縁膜、銀ナノインクで電極が印刷された PET (polyethylene terephthalate) フィルム、そしてこのフィルムを貼りつけるシナ板で構成される (図 2)。このディスプレイでは図形の形に印刷された電極上でのみ触覚が提示されるため、単電極ではあるが複数指で図形を触察することができる。

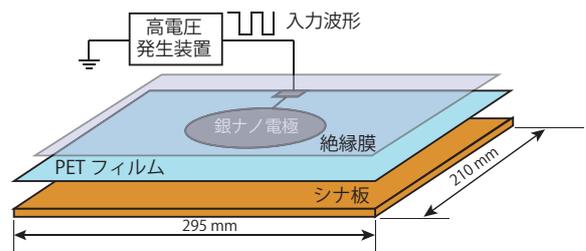


図 2 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイの構成図

我々は提示したい図形を銀ナノインク印刷専用の PET フィルム (NB-TP-3GU100) に銀ナノインク

(NBSIJ-MU01) を用いて印刷した。印刷機は家庭用インクジェットプリンター (EPSON PX-S160T) を用いた。この印刷された PET フィルムを同じサイズのシナ板に貼りつけ、PET フィルムの表面に絶縁膜を貼り付けた。この際に印刷された電極面自体の浮き上がりを知覚することは無かった。絶縁膜は厚さ 11 μm の塩化ビニリデンフィルム (旭化成, サランラップ®30CMX50M) を使用した。シナ板を用いるのは提示する図形ごとに電極を取り換える際に PET フィルムが折れ曲がることによって生じる絶縁膜の歪みを防ぐためである。シナ板は幅 295 mm, 高さ 210 mm であった。実際の銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイを図 3 に示す。

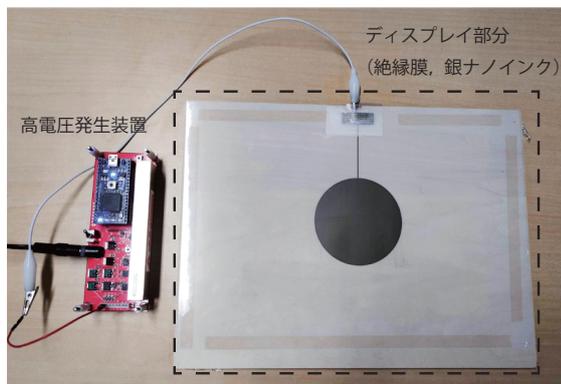


図 3 銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイ。左側に高電圧発生装置, 右側に絶縁膜が貼られた銀ナノインク電極。

また、各図形の電極をディスプレイの中央に配置するため、高電圧発生装置からこの図形へ接続できるようにディスプレイの外枠から図形領域まで幅 0.5 mm の導線パターンも印刷した。導線パターンは十分に細いので触覚はほぼ感じられない。後述する評価実験では、実験協力者に導線パターンがあったことに気づいたかを聞いたところ、この導線パターンに気づいた実験協力者はいなかった。

高電圧発生装置は、図 3 の左側にある装置を利用した。これは、接続されているマイコン (mbed NXP LPC1768) へのプログラミングにより振幅が最大 600 V の波形を出力することができる。

4. 一本指と複数指による触察時の図形識別に関する評価実験

我々は銀ナノインクを用いた静電気力触覚ディスプレイを利用し、一本指による触察と複数指による触察でどれほど図形の識別に違いがあるかを調査するために評価実験を実施した。今回の実験では 4 つの図形を触覚ディスプレイを通して提示し、この提示した図形が何であるかを実験協力者に答えてもらった。

4.1 実験概要

今回の評価実験では、一本指による触察か複数指による触察かといった触察方法ごとの図形識別の差の傾向を把握するために健常者である大学生 10 名を募った。この実験協力者 10 名のうち、6 名が静電気力触覚ディスプレイを体験したことがあった。我々は一本指と複数指の 2 グループを作るために、静電気力触覚ディスプレイを体験したことがある実験協力者と体験したことがない実験協力者ごとでランダムに 2 グループに分けた。一本指による触察のグループは 22 歳から 26 歳の大学生 5 名 (うち女性 1 名) で構成され、複数指による触察のグループは 22 歳から 24 歳の大学生 5 名 (うち女性 1 名) で構成された。

実験中の使う指の本数や動かし方に関して、一本指による触察では実験協力者の利き腕に関係なく右手の人差し指で触察を行ってもらった。この際に、指の触れる場所や指の動き、そしてこの動かす速度に関して制限を設けなかった。複数指による触察では両手の指で自由に触察を行ってもらった。この触察においては、使う指の本数や指の触れる場所、指の速度は指定しなかった。

そしてそれぞれのグループにおいて、触覚ディスプレイ上に提示された図形を識別してもらう。今回の実験で提示する図形に関して、図 4 のように円形、四角形、三角形、星形を用意した。今回の実験は、複数指と一本指を比較するための最初の調査として、基本的な図形を用いて実施された。一本指と複数指を比較する場合、複雑な図形で実施すると、結果の要因が触察した指の本数によるものか、図形の複雑さによるものが混合してしまう可能性がある。そこで、最初の実験として基本的かつ一般の人が分かる図形を提示し、これらの結果を比較した。そのため、直線で構成された四角形、曲線で出来ている円、斜線を含む三角形、これら 3 つの図形より少し複雑な星形を用意した。これらの図形で調査することで、複数指によって把握しやすい図形の特徴といった考察が可能となる。そしてこれらの図形の高さは 80 mm とし、我々の先行研究で使用した図形と同じ大きさとした。そしてこれらはディスプレイのほぼ中央の位置に印刷された。

図形を提示する際の入力電圧波形は 100 Hz の矩形波を用いた。これは使用する波形がユーザにとって触覚を感じやすく、かつ触感も絶縁膜の滑らかさとは逆の粗いテクスチャ感を提示する^[10]ためである。そして波形の振幅値として高電圧発生装置が出力できる最大電圧である 600 V に設定した。同じ提示領域上をなぞるとする場合、指の速さによって領域上の空間周波数は変化し、感じる粗さが実験協力者ごとに変化することが考えられる。そのため、実験本番前に練習時間を設け、触覚を感じる部分と感じない部分の確認を実

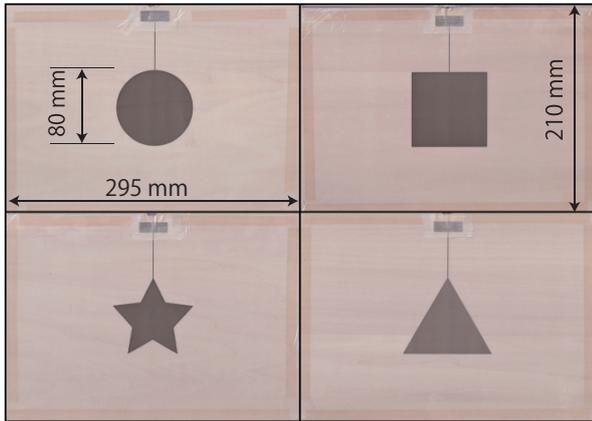


図4 評価実験に使用した4つの触図

施した。これにより本番中に極端に速く、または遅くしなければ図形の境界線を把握できる。

実験手順に関して、初めに実験概要を実験協力者に説明し、実験に関する同意を取得した。この説明時から触覚ディスプレイは実験協力者に見せないようにし、できるだけ触覚ディスプレイや提示する図形の大きさなどの情報を与えないようにした。実験の説明後、実験中の視覚情報を抑えるために実験協力者にアイマスクを着用させた。実験中の様子を図5に示す。そして、実験実施者は口頭で指の触り方と提示する4つの図形の名称（「円形」、「四角形」、「三角形」、「星形」）のみを教示した。実験開始前に、練習として両グループともに右手の人指し指を用いて、実際の触覚ディスプレイに触れてもらった。この際に、触覚ディスプレイの左右上下の端を指で確認してもらった。さらに円形が印刷された電極板を用いて、触覚を感じる場所と感じない場所があるかを聞き、実験協力者がたとえたと確認して実験に移った。なお、この練習時には、どの図形が提示されたかは教えなかった。実験中、実験協力者は触覚によってディスプレイ上に提示されている図形を識別する。識別をする際には制限時間を設けず、図形が分かり次第回答してもらった。回答した後は実験協力者はそれが正解かどうかは教わず、すぐに次の試行へと移った。提示する4種類の図形は5回ずつ順番がランダムに提示され、合計20試行において識別を行った。また、5試行ずつ3分ほどの休憩をはさんだ。この際にはアイマスクの着脱を許したが、休憩中は触覚ディスプレイが見えないようにした。すべての試行が終了した後、実験実施者はすべての回答を収集し、各図形の識別率、そして触覚時の探索時間を計算した。実験中、実験協力者がどのように触覚を行うかを観察するために、動画撮影を実験協力者に許可をもらい撮影した。この実験は筑波大学の倫理審査委員会の承認（承認番号2018R271）のもとで実施した実験である。なお、実験を実施した部屋の平均温

度は摂氏24.2度（SD=0.376）で、平均湿度は63.2%（SD=3.24）であった。



図5 実験協力者が図形を触察している様子

4.2 実験結果

図6は図形ごとの各触察方法の平均識別正答率である。この図の横軸は各図形の名称を、縦軸は平均識

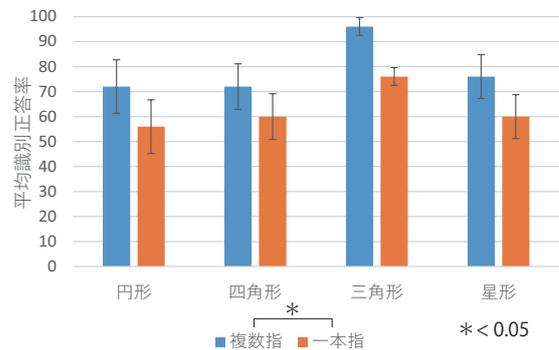


図6 各図形における触察方法ごとの一人あたりの平均識別正答数の結果

別正答率を、そしてエラーバーは標準誤差を示す。図形全体での平均識別正答率は、一本指による触察では63%、複数指による触察では79%であった。また図形ごとの一人当たりの平均識別正答率は、図6に示すように一本指では円形が56%、四角形が60%、三角形が76%、星形が60%であり、複数指では円形が72%、同様に四角形が72%、三角形が96%、星形が76%であった。我々はこれらの結果を分析する前に、平均によって分散が変わるという比率の性質を解消するために、これらの比率に対してロジット変換^[24]を行ってから分散分析を実施した。この結果、触察方法と図形の種類間の交互作用は有意でなかった ($F(3,32)=0.12, p=0.94$)。また主効果に関しては触察方法のみ有意であった ($F(1,32)=5.7, p=0.023$)。これにより、複数指による触察の平均識別正答率が有意に高いことが分

静電気力触覚ディスプレイにおける複数指による触察の有効性の調査

かった。また各図形間の有意差は確認できなかったが、図 6 から、両グループともに三角形の識別正答率が高く、星形や円形、そして四角形ではやや低い傾向であった。

表 1 提示された図形に対する回答した図形の数：一本指による触察 (上), 複数指による触察 (下)

一本指		回答した図形の数 (最大値: 25)			
		円形	四角形	三角形	星形
提示した図形	円	14	6	5	0
	四角	4	15	3	3
	三角	2	2	19	2
	星	5	2	3	15

複数指		回答した図形の数 (最大値: 25)			
		円形	四角形	三角形	星形
提示した図形	円	18	4	1	2
	四角	7	18	0	0
	三角	1	0	24	0
	星	2	0	4	19

また提示されたすべての図形に対して実験協力者が答えた図形の数を表 1 に示す。この表から、提示された図形を実験協力者がどのように認識したかの傾向が分かる。一本指による触察ではほぼ全ての図形間で間違えるケースが見られ、0%となるケースは1つのみであった。特に円形を提示して実験協力者が四角形や三角形を答えたケースや、星形を提示して実験協力者が円形と答えるケースが見られた。それに対して複数指による触察では図形を間違えて答えた割合が0%のケースが増え、このケースは5つであった。特に円形や四角形を提示した際に三角形や星形と間違えるケースが一本指の場合に比べて減少する傾向が見られた。しかし、複数指による触察でも円形や四角形同士で誤認するケースは一本指による触察の場合と同程度であった。

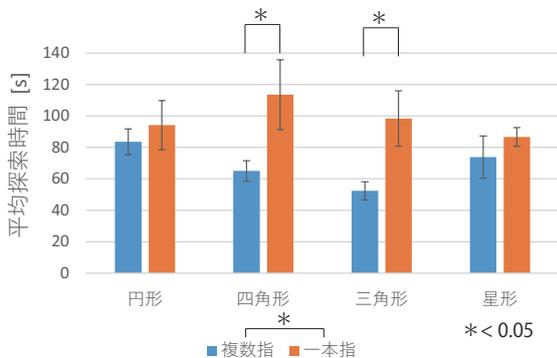


図 7 各図形における平均探索時間の結果

また、触察方法ごとの図形の平均探索時間を図 7 に示す。この図は実験協力者が指を触覚ディスプレイに触れてから何かしらの図形を回答するまでの時間であり、我々はこの探索時間を図形ごとで収集し、すべて

の実験協力者での結果を平均した。横軸は各図形を表し、縦軸は平均探索時間を示す。青いグラフは複数指による触察時の結果で、オレンジのグラフは一本指による触察時のグラフである。図形全体として、複数指による触察では1つの触図に対する平均探索時間が一本指では98秒、複数指では69秒であった。これらの結果を分散分析したところ、まず触察方法と図形の種類間の交互作用は有意でなかった ($F(3,32)=0.96, p=0.42$)。主効果に関しては触察方法のみ有意であった ($F(1,32)=7.9, p=0.0084$)。これにより、両触察方法を比較すると、複数指による触察の探索時間が有意に短いことが示された。また図形ごとの探索時間に関して、四角形や三角形を提示した際には触察方法間の探索時間に有意差があり(有意水準5%)、複数指での触察のほうがそれぞれ43%, 40%短くなった。円形や星形に関しては、平均値ではわずかに複数指のほうが探索時間が短い、有意差は確認できなかった。

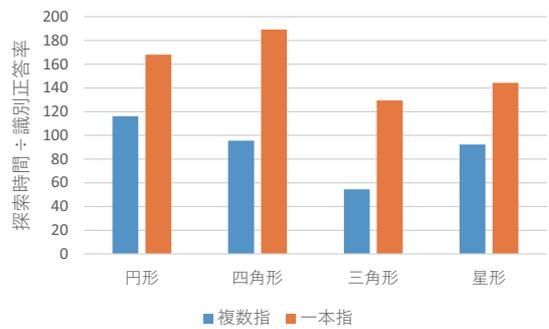


図 8 各図形における探索時間を識別正答率で割った値

図 8 に各図形における探索時間を識別正答率で割った新たな指標を示す。この指標は値が小さいほど、短い時間かつ高い識別率ということを示す。この図より、複数指による触察の結果のほうがすべての図形に対して結果が良く、複数指での三角形の識別の結果が良いことも確認できた。また、四角形や三角形において複数指による触察が一本指の触察より指標値が倍以上となったこともこの図から確認できた。

4.3 考察

4.3.1 実験結果と先行研究の結果との比較

表 2 先行研究と本研究における複数指と一本指での結果の差異

触覚ディスプレイ	識別正答率	探索時間
振動付点図 ^[8]	複数指 < 一本指	複数指 > 一本指
ピンアレイ (小) ^[16]	複数指 ≈ 一本指	複数指 ≈ 一本指
ピンアレイ (大) ^[16]	複数指 ≈ 一本指	複数指 < 一本指
静電気力	複数指 > 一本指	複数指 < 一本指

今回の実験結果において、複数指を用いたほうが一本指のみの場合に比べ、識別正答率の向上の傾向と一部の図形での探索時間の減少が確認された。これまでに触覚ディスプレイを用いて一本指と複数指で触図認識を比較した研究と本研究での結果を表2に示す。振動付き点図ディスプレイを用いた調査では、一本指による触察よりも複数指による触察の方が図形の識別度が下がる結果となった。Uematsuらのピンアレイ装置での調査では、小さなサイズ(24 mm)と大きなサイズ(52 mm)の触図を用いた。この結果、識別正答率に関しては両触察手法で100%に近い結果となり、有意差は確認できなかった。探索時間に関して、どの条件でもほとんどの実験協力者が十秒程度で触図の図形を識別でき、また大きいサイズの場合には複数指のほうが探索時間が短くなる傾向が確認された。

本稿における評価実験の結果と比較して、これまでの触覚ディスプレイは識別正答率に関しては複数指による触察のほうが低くなるか、ほぼ変わらない結果となったが、静電気力触覚ディスプレイでは複数指による触察のほうが識別正答率が高い結果となった。また探索時間に関して、触覚ディスプレイや提示する図形の大きさによって傾向が異なるが、今回の調査では複数指による触察のほうが探索時間が早い結果となった、これらの要因として、図形の大きさといった触図自体の影響と、触察時の手の全体にかかる剪断力の違いが考えられる。

触図自体の大きさによる影響により、複数指と一本指の間で、探索時間に差が表れたと考えた。今回の静電気力触覚ディスプレイではCraigやUematsuらが調査した触覚ディスプレイで使用された触図よりも大きな図形(80 mm)を使用した。これにより図形全体を把握するために必要な指の移動量は一本指に比べ複数指のほうが少なくなるので探索時間が早くなったと考えられる。逆にサイズが小さい場合は移動量が一本指でも複数指でも変わらないため、複数指のほうが多くの情報を読み取ろうとする工程も考えられるため、サイズによっては一本指の方が探索時間が早くなる可能性もある。今後の調査において、より多くの図形のサイズや解像度、また位置や回転角度に関して評価実験を行うことで、触図の影響で複数指の有効性がどれほど変わるのかを調査する必要がある。

もう一つの要因として、触察時の手の全体にかかる剪断力の違いが考えられる。静電気力触覚ディスプレイは、指がディスプレイに接触する面積が大きいほど剪断力が大きくなる。一本指と複数指ではどちらも指ごとにかかる力はほとんど変わらないが、手全体にかかる剪断力は複数指のほうが大きい。後述する触察時の指の使い方に関する考察では、触察戦略として指を触図に対してスキャンするような触察が多く見られ

た。この戦略において一本指でスキャンした場合と、複数指でスキャンした場合では複数指のほうが接触面積が広く剪断力も大きくなる。これによって、提示される触覚の感じやすさが増し、図形の輪郭線をより明確にできたことから、複数指のほうが識別正答率が高くなったと考えられる。

これらの考察により、一本指による触察と複数指による触察において、図形のサイズといった触図自体の影響により探索時間が早くなり、接触面積の影響により識別正答率が高くなったと考えられる。特に、この識別正答率に関しては他の触覚ディスプレイと異なる傾向となり、これは静電気力触覚ディスプレイの特有な結果の可能性があると考えられる。

4.3.2 図形認識時の触察戦略に関する考察

我々は複数指による触察によって識別正答率や探索時間が向上したことを確認した。さらに我々は実験協力者がどのような触察戦略を利用して図形を認識するのかに着目した。そのために、実験時の手の様子から指の動かし方を調査し、それぞれで識別正答率や探索時間を比較した。

実験時に撮影した実験協力者の指の動かし方を観察した結果、多くの実験協力者が触図を認識する際に、主に図9のような2種類の触察戦略で図形の概形を捉える様子が見られた。この戦略とは、水平、垂直、または斜め方向へ指をスキャンする触り方と図形の境界線をなぞる触り方であった。これら以外の戦略で触察する実験協力者はほとんどいなかった。

表3 実験協力者ごとの使用した触察戦略の回数

複数指による触察			
	スキャンのみ	境界線のみ	両手法
実験協力者 1	19	0	1
実験協力者 2	0	17	3
実験協力者 3	6	7	7
実験協力者 4	7	1	12
実験協力者 5	20	0	0
合計	52	25	23
一本指による触察			
	スキャンのみ	境界線のみ	両手法
実験協力者 6	10	2	8
実験協力者 7	20	0	0
実験協力者 8	20	0	0
実験協力者 9	5	9	6
実験協力者 10	20	0	0
合計	75	11	14

表3に実験協力者ごとの使用した触察戦略の回数を示す。実験協力者1人あたり20試行あり、各試行で上記の触察戦略を使用した場合をカウントした。カウント方法として、スキャンする触察は指が図形の端か

静電気力触覚ディスプレイにおける複数指による触察の有効性の調査

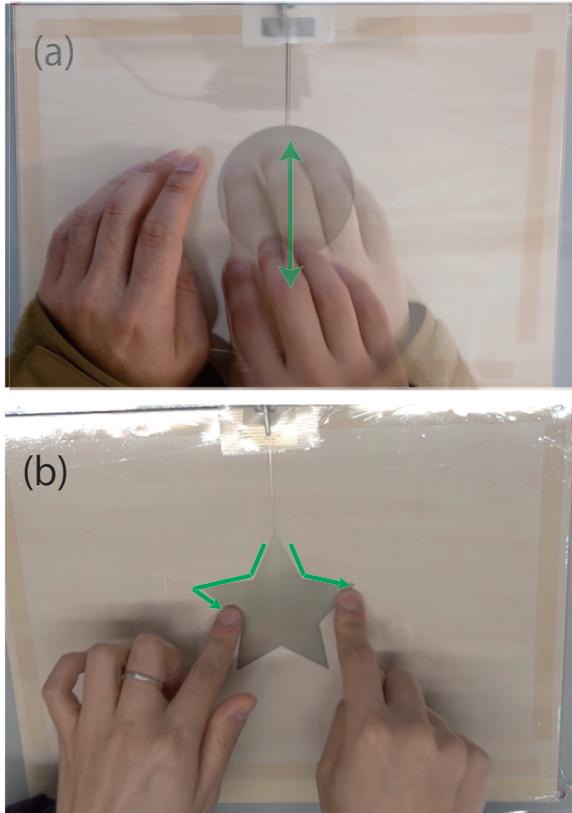


図9 触察時の指の様子. (a) 垂直方向に指をスキャンの様子と (b) 図形の境界線上をなぞる様子

ら端までを直線上に移動し、この動作が反復された場合においてカウントした。なお、片手のみの複数指の場合でも、両手一本指ずつの場合でもカウントした。境界線をなぞる触察は、指が図形の境界線付近を往復する動作が見られた場合においてカウントした。この触察戦略も片手のみの複数指の場合でも、両手一本指ずつの場合でもカウントした。

表3から複数指による触察では実験協力者ごとに用いた触察戦略の傾向が異なった。また一本指による触察ではほとんどの実験協力者が図形上でスキャンする戦略が見られ、境界線をなぞる戦略を用いた実験協力者は一部いたが、複数指による触察の場合より人数が少なかった。

触察戦略が主に「スキャンする戦略」と「境界線をなぞる戦略」になったことと、「スキャンする戦略」を利用した実験協力者が多かったことに関して、静電気力触覚ディスプレイでの触察の制約や実験協力者が健常者であることが要因だと考えられる。Ledermanの調査によって、二次元的凸図は主に「輪郭探索」、「表面をこする」、そして「静的接触」で触察されることが確認された^[25]。このことから、今回の実験結果では、静電気力触覚ディスプレイにおいて図形を認識するために「輪郭探索」の戦略が使われ、その図形の輪

郭を捉えるためにディスプレイ表面のテクスチャ感を得る「表面をこする」戦略が使われたと考えられる。また、今回の実験で「スキャンする戦略」が多かった原因として、今回の実験協力者がすべて健常者であったことが考えられる。Kwokらの調査において健常者は図形全体を捉える傾向があることから^[6]、今回の実験でも「スキャンする戦略」が多かったと考えられる。このように、静止した指に触覚を提示できないことを除き、静電気力触覚ディスプレイでも他の触覚ディスプレイと同様な触察戦略が利用されたと考えられる。

ここで、それぞれの触察戦略において図形の識別正答率や探索時間について算出した。図10は触察戦

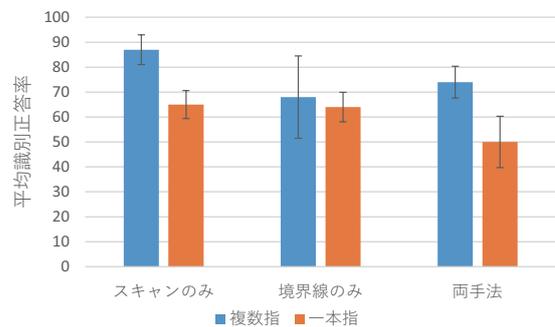


図10 触察戦略ごとの平均識別正答率の結果

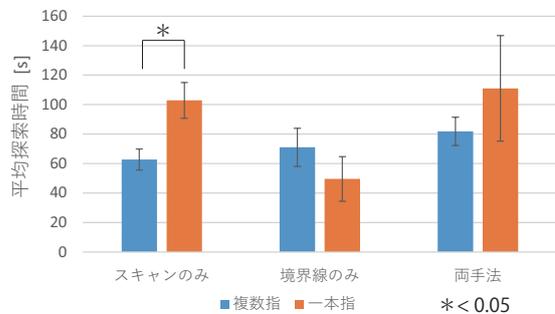


図11 触察戦略ごとの平均探索時間の結果

略ごとの図形の平均識別正答率を示し、図11に触察戦略ごとの平均探索時間を示す。それぞれの図の青いグラフは複数指による触察時の結果で、オレンジのグラフは一本指による触察時の結果である。これらの図から、スキャンのみの触察戦略を利用した場合において、平均識別正答率や平均探索時間では複数指による触察のほうが効果が見られる傾向があった。特に図11において、この触察戦略での平均探索時間に有意差が確認された(有意水準5%)。しかし境界線のみの触察戦略では、複数指による触察での効果があまり見られなかった。

図9(a)のように図形上を指でスキャンする場合、実験協力者が図形の位置や大きさ、概形を捉える様子

が見られた。そして一本指の場合、図形情報を捉えるために指を図形の端から端までを多く往復する様子が見られた。逆に複数指による触察では、複数指を同時になぞることで少ないストロークで図形の位置や大きさを捉える様子が見られた。そのため、図 11 のように平均探索時間が一本指の場合と比べて短縮したと考えられる。また複数指によるスキャンでは識別率の向上も見られた。これは図形をスキャンする際に、一度のストロークで図形の境界線に関する情報を多く取得できたからだと考えられる。一本指ではスキャンするたびに指を同程度の速度でなぞらないと、正確な図形の位置や大きさを把握しづらいと推測できる。複数指であれば、一度のストロークにおいては触れている複数の指はすべて同じ速度で動いているため、指の本数分の情報を一度に取得し、図形の境界線の位置をより正確に把握することができたと考えられる。さらに両手でスキャンすることで図形両端の相対位置を把握できると考えられる。これにより、この触察戦略において複数指による触察のほうが図形の識別率が高くなったと考えられる。

図 9 (b) のように複数指で境界線をなぞる触察戦略では、指同士の相対位置や角度、距離といった情報を取得できる可能性がある。一本指ではこの相対関係の情報を取得しづらいため、この方法を利用した実験協力者が少なく、逆に複数指では上記のような効果が見込まれることから境界線をなぞる実験協力者が増えたと考えられる。

図 11 に示されているように、複数指による境界線のみ触察戦略が一本指による触察より探索時間が遅いという結果となった。この要因として 2 つが考えられる。1 つは、一本指と複数指での試行数の違いが考えられる。一本指での触察では全部で 11 試行であったことに対して、複数指では 25 試行と倍以上であった。特に一本指で境界線を触察する実験協力者は 1 人しかいなかった。実験協力者の個人差の影響によってこの探索時間が早くなってしまったと考えられる。これは今後より多くの実験協力者を募って同じ条件となる実験を実施し、検証する必要がある。もう 1 つの要因として、触察時の指の本数と指の触り方が考えられる。複数指で境界線をなぞる戦略を用いた実験協力者は、両手の人差し指を使って図形の境界線をなぞっていた。そのため、一本指で境界線をなぞる場合より単位時間に探索できる面積が広いわけではなく、さらに慎重に図形を探索することで探索時間が遅くなったと考えられる。

ここで複数指による触察において、図形ごとの触察戦略に対する平均識別正答率の結果を図 12 に示す。このグラフの横軸は図形の名称を示し、触察戦略ごとに色が分かれている。縦軸は平均識別正答率を示す。

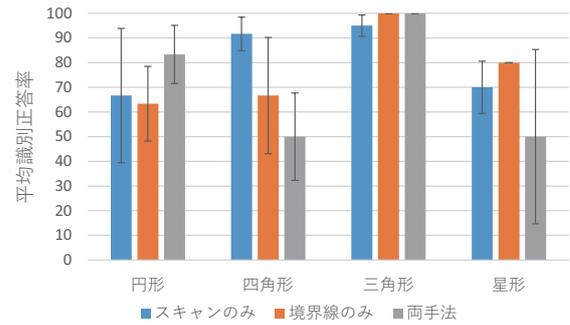


図 12 複数指における図形ごとの触察戦略に対する平均識別正答率の結果

この図から三角形や星形に関して境界線をなぞる戦略を用いた場合では平均識別正答率がスキャンによる戦略と同程度となった。そしてこの触察戦略において三角形では識別率が 100%であった。この結果から、三角形のような図形に関して、頂点の鋭角や数といった図形の特徴を取得しやすかったため、この図形の平均識別正答率がスキャンによる戦略と同程度となったと考えられる。このため図 8 のように、三角形は他の図形と比べて認識しやすかったと考えられる。逆に四角形の場合、直角を認識することが難しかったと考えられ、これにより頂点情報を取得できず円形と間違えるケースが多かったと考えられる。このような図形の場合、頂点を強調するようなレンダリング手法を用いることでさらなる識別度の向上が見込まれる。

5. まとめと今後の課題

本研究では静電気力触覚ディスプレイを用いた触図提示における、複数指による触察の有効性と図形認識のための触察戦略について調査した。今回の実験では、4 種類の図形を表した触図を用意し、一本指による触察と複数指による触察でどれほど図形認識に差が表れるかを評価するための実験を実施した。従来手法では一本指による触察しかできなかったが、銀ナノインクを用いた触覚提示手法を利用することで複数指による触察を可能にした。今回の実験では提示された図形の識別正答率と図形を識別するまでの探索時間を収集した。

実験の結果、複数指による触察のほうが識別正答率が高くなる傾向と探索時間が早くなる傾向が確認された。また、提示した図形のなかで、三角形と四角形を提示した場合は探索時間の有意差が確認された。これらの結果の要因として、触図自体のサイズと、指にかかる剪断力の違い、そして実験協力者の触察戦略が考えられる。特に、識別正答率が複数指による触察で向上したことは他のディスプレイと異なる傾向であり、これは接触面積による剪断力の違いといった静電気力

触覚ディスプレイの特有な要因が考えられる。

さらに我々は実験時の実験協力者の指を動かす様子を観察した。この観察から、図形を認識するための2種類の戦略が確認された。一つは境界線をなぞる触察戦略であり、指同士的位置や距離、角度といった図形情報を取得する様子が見られた。これにより三角形といった頂点に特徴のある図形が識別されやすかったと考えられる。もう一つは水平、垂直、または斜め方向にスキャンすること触察戦略であり、複数指を同時になぞることで短い時間で図形の概形を把握する様子が見られた。この触察戦略に関する結果と先行研究による触察の調査から、静止した指に触覚を提示できないことを除き、静電気力触覚ディスプレイでも他の触覚ディスプレイと同様な触察戦略が行われていたと考えられる。

今後は図の条件をより複雑にした触図を用いた評価実験や図形識別度を向上させる手法の検討、そして実験協力者を増やした実験を実施する予定である。特に実験実施者に関して、本稿では各条件で健常者5名ずつの実験であったため、一部の図形での結果や触察戦略に関する結果に対して、十分な複数指の有効性を示すのは難しかった。このため、今後多くの実験協力者を増やした評価実験の実施が必要である。さらに、本稿では実験協力者として健常者を募ったが、今後は触図提示装置を利用する機会が多い視覚障害者にも同様な実験を実施し、複数指による有効性に関して今回の健常者で実施した場合とどれほど違いがあるかを調査する。

謝辞

この「静電気力触覚ディスプレイにおける複数指による触察の有効性の調査」の研究をするにあたり、電気通信大学の梶本研究室で開発された高電圧発生装置を使用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

[1] 一刈良介, 蔵田武志: 外出前学習のための拡張現実型触地図; 感覚代行シンポジウム, Vol.41 pp.21-24 (2015)

[2] 渡部謙, 渡辺哲也, 山口俊光, 秋山城治, 南谷和範, 宮城愛美, 大内進, 高岡裕, 菅野亜紀, 喜多伸一: 点図触地図自動作成システムの開発と地図の触読性の評価; 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 95, No. 4, pp. 948-959 (2012).

[3] 長尾博: 点図読み取り指導プログラムの開発における段階的指導に適した触図課題の作成とその排列に関する研究 (平成 25²⁶ 年度文科省科学研究費補助金研究); 宮城教育大学特別支援教育総合研究センター研究紀要, No. 12, pp. 12-29 (2017).

[4] 森まゆ, 佐島毅, 青松利明: 点図の線における点サイズと点間隔の要因が直交する 2 線の識別容易性に及ぼす影響; 特殊教育学研究, Vol. 48, No. 5, pp. 337-349 (2011).

[5] 土井幸輝, 西村崇宏, 藤本浩志: 紫外線硬化樹脂点字のマス間隔比が触読性に及ぼす影響; 国立特別支援教育総合研究所研究紀要, Vol. 41, pp. 27-36 (2014).

[6] Kwok, Misa Grace, 福田 忠彦: 感覚特性に基づく触地図作成法の提案; ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 6, No. 1, pp. 55-62 (2004).

[7] 渡辺哲也, 渡部謙, 山口俊光, 南谷和範, 大内進, 宮城愛美, 高岡裕, 喜多伸一: 立体コピー触地図の触読性の評価; 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 96, No. 4, pp. 1075-1078 (2013).

[8] Craig, James C.: Attending to two fingers: two hands are better than one; Perception & Psychophysics, Vol. 38, No. 6, pp. 496-511 (1985).

[9] Yeh, F. H., Liang, S. H.: Mechanism design of the flapper actuator in Chinese Braille display; Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 135, No. 2, pp. 680-689 (2007).

[10] Tomita, H., Saga, S., Kajimoto, H., Vasilache, S., Takahashi, S.: A study of tactile sensation and magnitude on electrostatic tactile display; 2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 158-162 (2018).

[11] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A., Harrison, C.: TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces; 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology, pp. 283-292 (2010).

[12] Tomita, H., Agatsuma, S., Wang, R., Takahashi, S., Saga, S., Kajimoto, H.: An investigation of figure recognition with electrostatic tactile display; International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 363-372 (2019).

[13] 渡辺哲也, 加賀大嗣, 小林真, 南谷和範: 視覚障害者のための触図訳サービスに関する調査; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.20, No.2, pp.147-152 (2018)

[14] Velázquez, R., Hernández, H., Preza, E.: A portable piezoelectric tactile terminal for Braille readers; Applied Bionics and Biomechanics, Vol. 9, No. 1, pp. 45-69 (2012).

[15] Prescher, D., Weber, G., Spindler, M.: A tactile windowing system for blind users; Proceedings of the 12th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility, pp.91-98 (2010).

[16] Uematsu, H., Suzuki, M., Kanno, Y., Kajimoto, H.: Tactile vision substitution with tablet and electro-tactile display; International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, pp.503-511 (2016).

[17] Kato, K., Ishizuka, H., Kajimoto, H., Miyashita, H.: Double-sided printed tactile display with electro stimuli and electrostatic forces and its assessment; the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1-12 (2018).

[18] Fukuda, T., Shimazu, K., Hashimoto, Y.: Basic Characteristics of Printable Large-Area Electrostatic Tactile Display; 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp.497-502 (2019).

[19] Vardar, Y., Güçlü, B., Basdogan, C.: Effect of waveform on tactile perception by electrovibration displayed on touch screens; IEEE transactions on haptics, Vol. 10, No. 4, pp. 488-499 (2017).

[20] Bateman, A., Zhao, O. K., Bajcsy, A. V., Jennings, M. C., Toth, B. N., Cohen, A. J., Horton, E. L., Khattar, A., Kuo, R. S., Lee, F. A., Lim, M. K., Migasiuk, L. W., Renganathan, R., Zhang, A., Oliveira, M., A.: A user-centered design and

analysis of an electrostatic haptic touchscreen system for students with visual impairments; International Journal of Human-Computer Studies, Vol. 109, pp. 102-111 (2018).

- [21] Xu, C., Israr, A., Poupyrev, I., Bau, O., Harrison, C.: Tactile display for the visually impaired using TeslaTouch; CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, pp. 317-322 (2011).
- [22] Ilkhani, G., and Samur, E.: Creating multi-touch haptic feedback on an electrostatic tactile display; 2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 163-168 (2018).
- [23] Tomita, H., Saga, S., Kajimoto, H.: Multi-electrodes-Based Electrostatic Tactile Display; International AsiaHaptics conference, pp. 171-174 (2016).
- [24] Stevens, S., Valderas, J. M., Doran, T., Perera, R., Kontopantelis, E.: Analysing indicators of performance, satisfaction, or safety using empirical logit transformation; BMJ, Vol. 352 (2016).
- [25] Lederman, S. J., Klatzky, R. L.: Hand movements: A window into haptic object recognition; Cognitive psychology, Vol. 19, No. 3, pp. 342-368 (1987).

著者紹介

(2020年11月29日受付, 2021年3月8日再受付)

著者紹介

富田 洋文



2016年筑波大学情報学群情報科学類卒業。2018年筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程修了。現在、同大学院博士後期課程在学中。現在は触覚とヒューマンインタフェースに関する興味を持ち、バーチャルリアリティの触覚・知覚に関する研究を行う。情報処理学会、日本バーチャルリアリティ学会、計測自動制御学会各学生会員。

嵯峨 智 (正会員)



1998年東京大学計数工学科卒業。2000年同大学大学院計数工学専攻修士課程修了。2007年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士後期課程修了。博士(情報理工学)。2007年東北大学大学院工学研究科工学研究科バイオロボティクス専攻助教。2012年マサチューセッツ工科大学客員助教兼任。2013年筑波大学システム情報系准教授。2017年熊本大学大学院先端科学研究部環境科学部門知能情報工学分野准教授、現在に至る。触覚を中心としたインタフェースに関する研究に従事。IEEE, ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 計測自動制御学会各会員。

高橋 伸



1991年東京大学理学部情報科学科卒業。1993年同大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了。1995年同博士課程中退。博士(理学)。1995年東京工業大学大学院情報理工学研究科数理・計算科学専攻助手。2004年筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻講師。現在、同大学システム情報系准教授。ユーザインタフェース・ユビキタスコンピューティングに興味を持つ。ACM, 情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。