

# 高密度ピンマトリクスを利用した 触覚ディスプレイのピン径・ピン間隔と形状認識率の基礎検討

仲谷 正史<sup>\*1</sup> 川上 直樹<sup>\*1</sup> 舘 暲<sup>\*1</sup>

Tactile Shape Recognition on a Tactile Display Using a High Density Pin Matrix

Masashi Nakatani<sup>\*1</sup>, Naoki Kawakami<sup>\*1</sup> and Susumu Tachi<sup>\*1</sup>

**Abstract** – Tactile displays composed of a plenty of pins (pin matrix) are one of the most common types of developed tactile displays so far. However, only a few studies examined the appropriate diameter of pins and the interval between adjacent pins to convey comprehensible tactile information. We conducted an experiment in which participants evaluated the shape primitives either through a pin matrix tactile display or through a bare finger. The interval between adjacent pins (from 1.0 to 2.0 mm) and the diameter of pins (from 0.8 to 1.8 mm) were manipulated. We found that participants could correctly answered tactile shape primitives as touching with a bare finger when they touched with a pin matrix of 1.0 mm spatial interval between adjacent pins. Yet, the time for answering the shape when touching with a pin matrix took about 25 % longer comparing when touching with a bare finger.

**Keywords** : tactile perception, shape primitives, pin matrix, tactile display

## 1 はじめに

手の指腹部における触覚ディスプレイとして、様々なものが開発されてきている。その中でも、過去の多くの触覚ディスプレイはピンマトリクス型触覚ディスプレイ（以下ではピンマトリクスをPMと呼ぶ）である。Optaconの開発をはじめとして[1]、これまで多くのPM触覚ディスプレイが様々な種類のアクチュエータを利用して開発されてきている[2]。一方で、PM型触覚ディスプレイのピン接触子（以下、ピンと呼ぶ）の空間配置などの設計パラメータに特化した研究文献は、開発されてきた触覚ディスプレイの数と比べると少ない。一般的な触覚特性（例えば、物体のsoftness, roughnessなど）や触覚受容器の特性について調べた心理学的・神経生理学的な文献は多数見受けられる。それに比べると、PM触覚ディスプレイの具体的な設計パラメータ決定に直接的に役に立つ知見は少ない。しかし、テレビジョンの画素数を決める際のように、あるピン径・ピン間隔、ピンストロークを持つPM触覚ディスプレイに触れた際の人間の触覚特性や触覚情報の認識率が既知となっていれば、触覚ディスプレイの設計時に有用である。

PM触覚ディスプレイの設計パラメータに関する先行研究例として、Shimojoらはピン径1.75 mmおよび2.75 mmのピンを2, 3, 5 mm間隔で細密構造にならせたパッシブなピンマトリクスを用意した実験を

行っている[3]。また森園らは、PM触覚ディスプレイにおいて高品位触感呈示のためには、ピンマトリクスであるがゆえに離散感を感じさせないピンの間隔を求める必要があると考え、心理実験を行っている[4]。

上述の2つの研究では、PM触覚ディスプレイが静的（時間変化しない）であることを前提に、評価実験が行われていた。一方で、Optaconに代表されるように、ピンが動的に上下動して触覚情報を呈示する場合も考えられる。すなわち、渡辺ら[5]の検討を参考に、PM触覚ディスプレイの呈示方法としては次の2つ、(a) スタティック呈示：ピンマトリクスによって呈示された触覚情報は時間変化せず、体験者が手指腹部および手掌部で触覚ディスプレイ表面をスキャンするもの。(b) ダイナミック呈示：ピンマトリクスによって呈示される触覚情報は時間変化し、体験者の手指腹部もしくは手掌部は触覚ディスプレイ表面に対して静止しているもの。のように2つに大別できる。前者(a)に関しては、前述のShimojoらや森園らのように研究手法が確立している。一方で、後者(b)に関しては、研究例が少ない。その理由として、ピンが動的に動くためにはまず何らかのアクチュエータを利用し触覚ディスプレイを開発しなければならない背景が考えられる。

そこで本論文は、後者(b)のダイナミック呈示を行うPM触覚ディスプレイの開発する際に必要となるピン径とピン間隔について、簡易に調査する手法を提案する。加えて、提案手法を利用して、PM触覚ディスプレイで形状プリミティブを呈示する際の形状認識

<sup>\*1</sup>東京大学大学院 情報理工学系研究科

率についての検討した結果を示す。ピン径とピン間隔の2点に注目した根拠として、PM 触覚ディスプレイにおける設計パラメータに関し仲谷らが提案するピンマトリクス型3次元形状ディスプレイ必要な設計パラメータ (1) ピンの径 (2) 隣り合うピンの間隔 (空間解像度) (3) ピンの縦方向のストローク (4) ピン数の拡張性の4点を参考とした [6]。

## 2 高密度ピンマトリクスを利用した触覚情報呈示に必要な空間解像度の検討手法の提案

図1に本研究で作成した高密度ピンマトリクスを示す。30 mm x 30 mm の支持板 (ベークライト製、厚さ 1.0 mm) にピン径よりもわずかに大きいホールを等間隔に空け、そこにステンレス (SUS 303) 製で径の細かいピン (0.8~1.8 mm, 長さ 17.0mm) を挿入することで構成したものである。ピンの水平方向変位は制限されており、垂直方向にのみスムーズに上下動できる。ゆえに、下に物体を押し当てるとその高さ情報を離散的にサンプリングして、上面に伝えることができる。ピンの下側は半球形状であり、ピン径の半分までの高さ差の表面形状であれば滑らかに追従できるように設計した。例えば、0.8mm 径のピンであれば、0.4mm の高さ差までは表面形状に滑らか追従して高さ情報を上部に伝達することができる。

PM を利用してダイナミックな触覚情報を呈示する際には、体験者が PM 上面に人差し指を置き、かつ PM を親指と中指で把持しながら任意の表面形状をなぞる、もしくは物体が PM に対して相対的に移動することが必要である。後者の場合には、可動リニアステージに物体を固定しておき、PM に対して物体が移動させるなどの方法が考えられる。本論文では、前者のように触覚情報体験者が自ら PM を動かして表面形状をスキャンする場合の実験結果を示す。以下では、ピン間隔とピン径の異なる PM を利用して触覚情報呈示をした場合の人間の形状識別率を検討した実験を報告する。

### 2.1 実験

【実験参加者】 指先の触覚に特に問題を持たない 8 名 (男性 6 名, 女性 2 名, 年齢 22~25 歳, 平均 23.4 歳) が実験に参加した。参加者は、実験の目的について知らされていないかった。

【実験器具】 実験器具として、図2に示した PM (PM 1~3, ピン直径はそれぞれ 0.8, 1.3, 1.8 mm, および PM 4~5 はピン径が 0.8 mm) を使用した。ピン間隔は PM 1~3 でそれぞれ 1.0, 1.5, 2.0 mm, PM 4~5 で 1.5, 2.0 mm であった。

【呈示形状】 指先の触覚を通して認識する形状プリミティブとして図3に示すような円・正三角形・正方形 (○・△・□) の形状を持つ薄い塩ビシール (厚さ

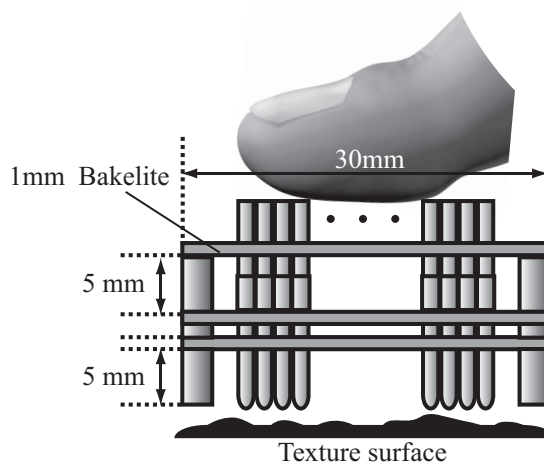


図1 提案する高密度ピンマトリクスの概観図  
Fig.1 A schematic of a high density pin matrix.

0.10 mm) を使用した。上述の3つの形状は、Shimojora が先行研究で報告している Shape Primitives の中でも、Edge type および Vertex type の検討の一例と考えて選定した。すなわち、Edge type として直線と曲線を区別できるか否かを検討し、かつ Vertex type として交わる直線の角度が 90 度か 60 度かを区別できるか否かを検討することを目標とした。薄いシールを今回の実験で利用した理由は、形状判断を指先の皮膚感覚だけに依存させ、関節の曲げ角度の変化等で形状を認識しないように配慮したからである。指先の接触面積とほぼ同程度もしくはそれよりも少し大きいものとし、スタティックな触覚情報呈示 (ピンマトリクスと表面形状との間に相対運動がない場合) だけで被験者が物体表面を認識してしまわないように呈示形状サイズを決定した。以上より、指を刺激する各形状全体の面積が一律に  $78.5\text{mm}^2$  になるよう、円の半径・三角形と正方形の辺の長さを決めた。これら3つの形状をベークライト製の薄板板 (100mm x 100mm) に貼り付けたものを呈示する形状プリミティブとして使用した。

【実験手順】 実験者は実験参加者に対し、これらどのような形状を触覚を通じて呈示するのかについてあらかじめ目視で確認させた。その後、実験参加者はアイマスクを装着した。実験者は任意の表面形状が貼り付けられたベークライト板の上に、5種類の PM1~5 のいずれか・もしくは何も載せない状態 (以後、素手と呼ぶ) で実験参加者の前に置いた。その後、実験参加者の利き手の人差し指を PM 越しもしくは素手で呈示形状プリミティブの上に載せた。実験参加者は、

PM を通してもしくは素手で表面形状を自由にスキャンし、呈示されている形状が○・△・□のいずれであるかを強制三択で、判断がつき次第できるだけ早く正確に答えるように指示された。試行数は PM1~5 を利用したもしくは素手の 6 条件下で、各○・△・□の 3 形状を 4 回ずつなぞらせ、計 72 回の試行を行った。72 回の試行中に休憩時間は設けなかったが、実験参加者の要望があれば任意のタイミングで休憩をとることを許した。全ての試行を終えるまでに必要な時間は約 40 分であった。

【データ処理】 実験後、PM1~5 を利用もしくは素手で触れた場合の形状プリミティブの認識正答率を算出した。各被験者が素手で形状プリミティブを判断をするまでの回答時間によって、各条件の回答時間を正規化し評価に用いた。上述で得られた正答率および回答時間を、分散分析 (One-way Repeated ANOVA) により検定を行った。球面性の仮定が成立しない場合には、Greenhouse-Geisser による修正を行った。

【実験結果】 実験結果を図 4 に示す。どの PM を用いても、被験者はチャンスレベル (33.3%) よりも有意に正しく形状を同定した。正答率に関して、素手の条件を含めた分散分析の結果 (素手, PM1~5), 触り方の効果は有意 ( $F(5, 35) = 16.43, p < .001$ ) であった。多重比較の結果、素手と PM1 間の正答率に有意差はなかった。素手と PM3, および PM5 の間で正答率は素手のほうが、また、PM1 と PM2, PM1 と PM3 および PM1 と PM5 との間で正答率は PM1 のほうが有意に高かった ( $p < .05$ )。ピン間隔が同じでピン径の異なる組み合わせである PM2 と PM4, PM3 と PM5 の間で正答率に有意差は無かった。

一方、回答時間に関して、素手の条件を含めた分散分析の結果、触り方の効果は有意 ( $F(1.4, 9.9) = 17.53, p < .01$ , Greenhouse-Geisser による修正) であった。多重比較の結果、素手と PM を使用した全ての組み合わせにおいて、回答時間が素手の場合の方が有意に短かった ( $p < .05$ )。素手と PM1 の間では、回答に至るまでの時間が平均で約 25% 増加した。また、PM1 と PM3, PM1 と PM4 との間で、回答時間が PM1 の方が有意に短かった ( $p < .05$ )。

### 3 考察

#### 3.1 ピン径・ピン間隔について

前節の実験結果より、ピン間隔が 1.0mm であれば今回呈示したような形状プリミティブを触覚呈示する場合には素手と同程度の正答率であった。また、ピン間隔が 1.0mm より広くなる場合には、正答率が低下することがわかった。一方で、たとえピン間隔が 1.0mm であっても素手の場合よりも回答時間は長くなることわかった。また、回答時間はピン間隔が 1.0mm

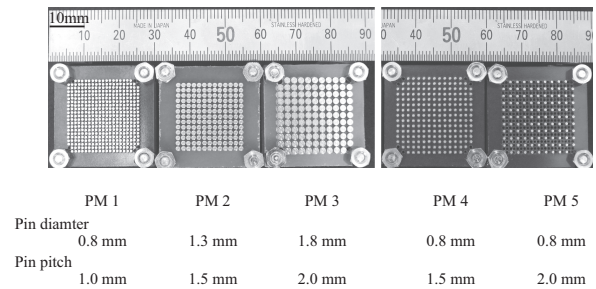


図 2 実験で使用したピンマトリクス

Fig. 2 A set of high density pin matrix used in the experiment.

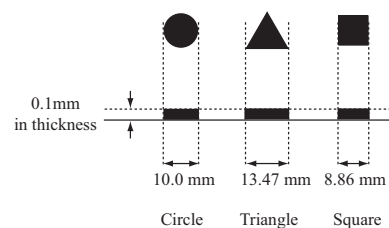


図 3 実験で用いた形状プリミティブの概観

Fig. 3 Shape primitives as tactile stimuli used in the experiment.

よりも広がるにつれて長くなる傾向が見られた。以上より、形状プリミティブを呈示された場合の正答率と回答時間に関して次のことが考えられる。今回提案したピンマトリクスは図形の高さ情報のみを垂直変位として触覚に伝達している。この垂直変位による触覚情報呈示は、Edge type や Vertex type の特徴量に関して、ピン間隔が 1.0 mm であれば形状を判断するに足る情報を伝達できていると考えられる。一方で、素手で触った場合と比べて回答時間が長くなっていることから、単位時間あたりの情報量は PM 越しに触ったほうが素手で触るよりも有意に少なくなっていると考えられる。これは、素手で形状に触れた場合に、指先には垂直方向の変位に加えて、せん断方向の変位も接触によって同時に与えられることから、もっともらしい結果と考えられる。

また、今回の実験で利用したピン径 (0.8 mm, 1.3 mm, 1.8 mm) の間では、形状認識率・回答時間ともに有意差はなかった。ただし、ピン間に隙間のある PM4, PM5 では標準偏差が大きく、一部の被験者では形状認識率が低下、もしくは回答時間が長くなった点は留意する必要があると考えられる。以上より、ピン間に隙間は無いほうが望ましいと示唆する結果と考えられる。

#### 3.2 本提案手法の課題と展望

本論文では、触覚情報をダイナミック呈示する PM 触覚ディスプレイにおいて、ヒトの触知覚特性に基づいてピン径とピン間隔を設計する際に有用な新しい



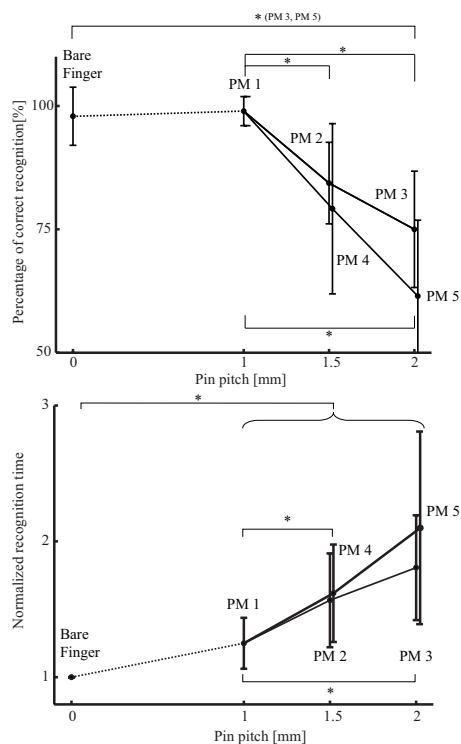


図4 実験結果 (N=8). エラーバーは標準偏差. 上: 各 PM を使用した際の形状プリミティブの認識率. 下: 回答までにかかった時間を素手の時に要した時間で正規化したもの. Fig.4 Results of the experiment. Mean of eight participants is plotted, and error bar indicates the standard deviation.

手法を提案した. そして, 提案手法を実際に使って形状プリミティブの中でも Shimojo らの分類に基づき, Edge type と Vertex type を呈示する際に求められる必要条件を調べた. 一方, 本提案手法では, ピン径の半分の高さ差までの凹凸形状しか呈示できないため, 局所で急激に高さが変化するような形状呈示に関する評価が難しいというデメリットも存在する. このデメリットを解決するためには, Shimojo らの先行研究にならない下から物体を押し付けるスタティックな形状プリミティブ呈示手法の併用が望まれる.

また, 本論文で検討した形状プリミティブは○・△・□の3種類だけであるため, 少なくとも当該形状を呈示する際には, 1.0mm 間隔の PM 型触覚ディスプレイで十分である, という結果を示したに過ぎない. しかし, Shimojo らが指摘するように実験で全ての形状に対して, PM が持つべき適切なピン径・ピン間隔を検討することは現実的ではない. 本課題を解決するためには, (a) 実際に PM 型触覚ディスプレイが使われる使用場面・アプリケーションを先に決めた上で, 本研究が提案した手法によって PM に求められるピン径・ピン間隔を経験的に検討する (b) 人間が触覚において利用している触覚情報の空間周波数の上限をあ

らかじめ調査し, ピン径・ピン間隔を設計するの2つの方法が挙げられる. 今後は, 直近のアプリケーション開発時には (a) による手法を用いながらも, (b) のようなヒトの触覚特性についても調査を行い, 経験と科学的裏付けに基づいた PM 型触覚ディスプレイの開発・設計につなげてゆきたいと考えている.

参考文献

- [1] J. Bliss, "Dynamic tactile displays in man-machine systems," *IEEE Transactions on Man-Machine Systems*, vol. 11 (no.1), pp. 58-65, 1970.
- [2] F. Vidal-Verdu and M. Hafez, "Graphical Tactile Displays for Visually-Impaired People," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 15 (no. 1), pp. 119-130, 2007.
- [3] M. Shimojo, M. Shinohara, Y. Fukui, "Human shape recognition performance for 3D tactile display," *IEEE Trans. Sys. Man and Cyber. Part A*, vol. 29 (no. 6), pp. 637-44, 1999.
- [4] 森園, 山田, 荒井, 梅谷, "ピンマトリクス型触覚ディスプレイにおいて離散感なく面を呈示するためのピンピッチの研究," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 6 (no. 3), pp. 235-238, 2001.
- [5] 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-視覚障害者に対する触覚と聴覚を用いた情報提示法に関する研究-, " 日本障害者雇用促進協会 障害者職業総合センター 調査研究報告書, no. 41, <http://www.nivr.jeed.or.jp/> (2009年3月31日現在).
- [6] 仲谷, 梶本, Vlack, 関口, 川上, 舘, "コイル形状記憶合金を用いた3次元形状ディスプレイの研究," 映像情報メディア学会論文誌, vol. 60 (no. 2), pp. 183-191, 2006.

(2009年3月31日受付)

[著者紹介]

仲谷 正史 (正会員)



2008年東大大学院・情報理工学・博士課程修了. 博士(情報理工学). 日本VR学会触覚デザイン研究委員会 幹事. 触覚メカニズム・触覚ディスプレイの研究や, TECHTILE 展を通じた触覚デザインの普及に従事.

川上 直樹 (正会員)



1996年東工大・理工・電気電子修士課程修了. 1999年東大・工・先端学際工博士課程修了. 工学博士. 同年大学院・工・計数工助手, 2002年東大院・情報理工・システム情報学専攻講師. バーチャルリアリティの研究に従事.

舘 暲 (正会員)



1973年東大大学院博士課程了. 工学博士. 1994年より東大・工・計数工教授, 2001年, 同大学大学院・情報理工教授. 2009年, 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 教授. バイスペクトル, 盲導犬ロボット, テレイグジスタンスなどの研究に従事.