

2次元のタッチ操作を可能とする 3D オブジェクトのプロトタイピング手法

加藤 邦拓^{1,2,a)} 山中 祥太^{1,2,b)} 宮下 芳明^{1,c)}

概要：スマートフォンやタブレット端末などの普及に伴い、導電性素材を配置した物理インタフェースを静電容量式タッチパネル上で使用するインタラクションが数多く提案されてきた。しかし、既存研究ではタッチパネル上で導電性素材が接触している箇所において「点」としてタッチ入力が発生させるか、スクロールのように「線」としてタッチ入力が発生させることしかできなかった。本研究では 3D オブジェクト表面に配置した「導電性の点群」を介することでタッチ入力が発生させる。これにより、3D オブジェクト上で行われた操作をタッチパネル上に伝え、手書き文字入力やポインティングなど自由自在な 2 次元のタッチ操作が行える。提案するオブジェクトは 3D プリンタによって容易にプロトタイピングできる。また、本研究では提案した 3D オブジェクトによるタッチ認識精度及び入力デバイスとしての性能評価を行い、その有用性を示した。

Prototyping Technique for 3D-Printed Objects with 2D Touch Input

KUNIHIRO KATO^{1,2,a)} SHOTA YAMANAKA^{1,2,b)} HOMEI MIYASHITA^{1,c)}

Abstract: In recent years, several studies have adopted a variety of approaches for the realization of interfaces based on capacitive touch panels. We propose the use of a 3D-printed object that a user can use as a 2-dimensional touch input area. Our technique can generate a continuous touch input by using “multiple conductive points” on the face of the 3D-printed object. This technique also enables a variety of touch operations on a 2D planar area (e.g., hand writing input, and pointing tasks). By bending the wiring or changing the interval at which the conductive materials are printed, a wide range of touch interfaces can be realized. We describe the conditions required to create our 3D-printed object and evaluate the recognition accuracy of the touch operations. In addition, we also describe an experiment that we conducted, involving a pointing task, to evaluate the performance of the 3D-printed object when used as a track pad.

1. はじめに

今日、スマートフォンやタブレット端末などの静電容量式タッチパネルを備えたデバイスが数多く普及している。静電容量式タッチパネルは人体などの接地した導電体の接近を検知することで認識を行っており、金属などの導電性素材を介することでもタッチ入力を認識することができる。

こうした手法はタッチパネル上に置いて使用する物理インタフェース [12] や、タッチパネルを拡張するためのインタフェース [24] など様々なインタラクションに応用されてきた。また、金属箔や導電性インクを用いることで容易に実装ができるため、インタフェースのプロトタイピング手法としても有用であることが示されている [21], [27], [28]。しかし従来手法では、タッチパネル上の導電性素材が接触した特定の箇所で「点」としてタッチ入力が発生させる、もしくはスクロール操作のように「線」としてタッチ入力が発生させるなど単純な入力しか実現されていなかった。

本研究では、こうした静電容量式タッチパネル上で使用する物理インタフェースの新たな提案として、2次元の

¹ 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo, Japan

² 日本学術振興会
JSPS, Chiyoda, Tokyo, Japan

^{a)} kkunihir@meiji.ac.jp

^{b)} stymnk@meiji.ac.jp

^{c)} homei@homei.com

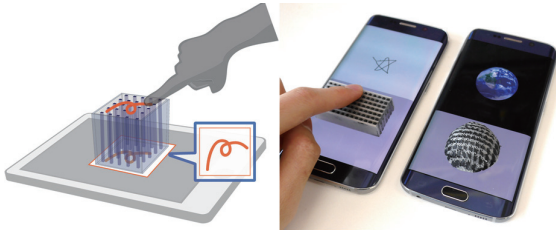


図 1 導電性の点群によるタッチ入力発生。3D オブジェクト上で行われた操作をタッチパネル上に伝え、自由自在な 2 次元のタッチ操作を実現する。平面だけでなく半球、凹凸平面など様々な形状のタッチインタフェースを実現可能。

Fig. 1 Generating touch input with conductive points. This technique also enables a variety of touch operations on a 2D planar area. Our interface allows the user to 3D-print free-shaped interfaces (e.g., a hemispherical trackball-like interface).

タッチ操作が可能なインタフェースを実現する。提案手法では、1 点だけでは十分な静電容量の変化を起こせないような面積の小さい導電性の「点」を複数同時に触れることでタッチ入力を発生させる (図 1 左)。これにより 3D オブジェクトの任意表面上を、トラックパッドのような 2 次元入力可能な入力領域として使用できる。従来手法に比べ、手書き文字入力やポインティングなど自由自在なタッチ操作が行える。また、提案する 3D オブジェクトは熱溶解積層方式 (FDM) 3D プリンタによる導電性・非導電性樹脂の 2 色造形により作成する。これにより、平面だけでなく、曲面や凹凸面などの形状を持つ様々なタッチ入力インタフェースを実現した。例えば、図 1 右は半球体のタッチインタフェースである。この半球体のタッチインタフェースを用いてディスプレイ上に表示された球体を操作するなど、コンテンツに合った操作体験を提供することができる。また、オブジェクト内部の導電性素材を曲げたり、間隔を変えることで、3D オブジェクト上での操作をそのままタッチパネル上に伝えるだけでなく、より多彩な入力デバイスとして使用することができる。本研究では 3D プリントの際に必要な諸条件を示し、それにより作成する 3D オブジェクトの造形精度及び、タッチ認識精度について評価を行った。また、提案デバイスのユーザビリティを評価するためのポインティングタスクを実施し、フィッツの法則における操作性の検証を行った。

2. 関連研究

2.1 静電容量式タッチパネル

静電容量式タッチパネル上で実物体を活用する手法は SmartSkin [16] にて提案されており、多くの研究で使用されている。静電容量式タッチパネルは人体などの接地された導電体の接近を検知することでタッチ認識を行っており、金属などの導電性素材を介することでもタッチ入力ができる。これを利用し、タッチパネル上に載せた物理オブジェ

クトをタンジブルユーザインタフェース (TUI) として活用する研究が行われてきた。特に電氣的に接続された複数の導電性素材によりマルチタッチ入力を発生させ、物理オブジェクトの位置や向きを識別する手法が多数報告されている [5], [12], [23]。ユーザが導電性素材に触れていたとしても、タッチパネル上に接触する導電性素材が細い線や小さな点であった場合はタッチ入力が発生しないことも報告されている [27]。紙窓 [27] はそのことを利用し、導電性素材のタッチ入力を発生させる部分と、それらを接続するための配線を全て同一平面上に実装する手法を実現している。また、GaussBricks [14] は物理オブジェクト内部に埋め込まれた磁石を用いたインタラクションに関する研究であるが、その応用例のひとつとしてオブジェクト上でのタッチ操作を、導電性素材によってタッチパネル上に伝えるアプリケーションを示している。CapCodes [8] では、マルチタッチ入力を発生させるインタフェースを 3D プリンタによって出力する手法を提案している。また、PUCs [29] では複数の足を持ったブリッジ状の物理オブジェクトをタッチパネル内部の電極に対して斜めに配置することで、人体の接触を必要としないタッチ認識を実現している。TUIC [23] にて提案された手法のひとつとして、静電容量の変化を自動的に発生させるための回路を用いる手法も提案されている。これらに対し、本研究ではタッチパネルとの接触面積が小さく、タッチ入力の発生ができないような導電性の「点」を複数同時に触れることで静電容量の変化を与え、タッチ認識を行う手法を検討する。

TUI としての活用法の他に、タッチパネル外部からの入力を行うデバイスとして使用しているものもある。Clip-on Gadgets [24] はボタンやダイヤルなどのインタフェースを持つクリップ状のデバイスを提案している。クリップ上のボタンやダイヤルをユーザが操作した際に導電性ゴムを介してタッチ入力を発生させることで、触覚フィードバックを持つインタフェースを実現している。この他にも、スライダやダイヤル、ボタンなどの物理オブジェクトを配置したタブレット端末を、大型ディスプレイを操作するためのコントローラとして使用する手法 [10] も提案されている。

ここまで述べた研究は全てタッチパネル上で導電性素材が接触している箇所における、タッチ入力の ON-OFF 制御しか行うことができなかった。これに対し ZebraWidgets [5] と ExtensionSticker [28] は、等間隔に並べられた細い導電性素材を介したタッチ入力により、スクロール操作のような連続的タッチ入力の発生を実現している。ユーザがこれらのインタフェース上で指をスライドさせる操作を行うと、指と接触している導電性の箇所が順にずれていく。これにより、発生させたタッチ入力が途切れることなく、連続的な入力を実現した。ZebraWidgets では「ゼブラゴム」と呼ばれる導電性素材を用いて実装をしている。直線または円形に曲げたゼブラゴムをアクリルのブロックにはめ込み、

スライダやダイヤルなどのインタフェースとして使用している。ExtensionSticker では、導電性インクによって縞模様状のパターンを印刷することでインタフェースを作成している。ユーザは印刷された縞模様パターン上でタッチ操作を行うことで、ExtensionSticker がタッチパネル上に貼り付けられた箇所において連続的タッチ入力が発生させることができる。印刷する縞模様パターンの形状を変えることで、ユーザの回転操作をタッチパネル上でのスクロール操作に変換したり、指 1 本でピンチ操作を行うなど様々なインタフェースを実現している。また、ExtensionSticker の応用例として、縞模様状の導電部を持つ 3D オブジェクト上でのタッチ操作を可能とする TUI [19] も提案されている。しかし、ZebraWidgets 及び ExtensionSticker の手法 (文献 [19] を含む) では直線または曲線状の動きとしてしかタッチ入力が発生できなかった。これに対し、本研究で提案する 3D オブジェクトは 2 次元のタッチ領域として利用可能なインタフェースとして使用できる。従来手法 [5], [28] と提案手法は、マウスホイール (1 次元の操作) とトラックパッド (2 次元の操作) のように、明確に異なるインタフェースである。後者のインタフェースでは、ポインティングや手書き文字入力など遥かに多くの応用ができる。

2.2 3D プリンタによるプロトタイピング

FDM 方式 3D プリンタを用いたインタフェースのプロトタイピング手法はこれまでも提案されている。PrintPut [3] は 3D プリントしたオブジェクトに対し、導電性樹脂を用いて回路を埋め込む手法を提案しており、タッチセンサやスライダなどを作成している。PrintPut で示されているインタフェースは全て、外部に取り付けたマイコンとセンサを通じて取得した数値からユーザの操作を認識している。これに対し、本研究では静電容量式タッチパネル上で使用するインタフェースのプロトタイピングを対象としており、タッチパネルデバイス以外のセンサ等を必要としない。Capricate [18] ではこうした、内部に回路を持つ 3D オブジェクトをデザインするためのシステムを提案している。また、Capricate のインタフェース例として、前節で述べたようなタッチパネル上で使用するインタフェースの作成例も示している。

FDM 方式以外の 3D プリンタを活用した研究も数多く報告されている。PAPILLON [2] では、Polyjet 方式の 3D プリンタを用いることで、光ファイバのようなパイプを造形しており、赤外線センサを用いることでユーザのタッチ入力を認識するインタフェースを実現している。Polyjet 方式 3D プリンタは、一般に FDM 方式 3D プリンタより高精細な造形が可能である。一方で、FDM 方式に比べ高価な専用の樹脂が必要となり、高いコストがかかる。造形物に対し、導電性素材を埋め込む手法 [6] を用いることで提案手法と同様のインタフェースを作成可能であるが、専

用の特殊な 3D プリンタが必要となる。そのため本研究では、比較的安価な FDM 方式 3D プリンタを対象とし、比較的安価で入手しやすい導電性・非導電性の樹脂の一括造形によるプロトタイピングを行う。

3. 導電性の点群を介したタッチ入力

本研究では、格子状に配置した「導電性の点群」を複数同時に触れることでタッチ入力が発生させる 3D オブジェクトを実現する。3D オブジェクト上でのユーザのタッチ操作をタッチパネル上に伝え、2 次元のタッチ入力を可能とする。また、ユーザは FDM 方式 3D プリンタを用いることで容易にインタフェースをプロトタイピングすることができる。提案する 3D オブジェクトは、ユーザがタッチ入力を行う箇所 (入力部) と、タッチパネル上に接しタッチ入力が発生させる箇所 (出力部) からなる。入出力部にはそれぞれ複数の導電性の点が格子状に配置されている。入出力部の点はそれぞれ 1 対 1 対応しており、オブジェクト内部を通して接続されている。ユーザがオブジェクト表面上の複数の点を触れることで 1 点のタッチ入力として認識することができる。また、ユーザが入力部上で指をスライドさせることで、指と点群の接触箇所が順にずれていく。これにより、タッチ入力を途切らせることなく 3D オブジェクト上でのタッチ操作をタッチパネル上に伝えることができる。基本的なアプローチは ZebraWidgets, ExtensionSticker の手法を基にしているが、本手法では導電性の点群を用いることで、2 次元の任意箇所でのタッチ入力を実現している点で異なる。

4. 3D オブジェクトのプロトタイピング手法

本研究では、2 つのノズルを持つ RepRap[11] プロジェクトをベースとした FDM 方式 3D プリンタ (BS01 Dual ABS/PLA Model, Bonsai Lab.Inc.) を用いて導電性の点群を持つオブジェクトを造形する。樹脂を押し出すノズルは 0.4 mm 口径を使用し、使用する樹脂は 1.75 mm 径である。3D オブジェクト表面に並んでいる入出力部の導電性の点群は「柱」のような形で内部に埋め込まれる (図 1 左参照)。以降、本章では 3D オブジェクトの表面に露出する入出力部とそれらを接続する内部配線を含めた導電性素材を「導電性の柱」と表現する。導電性の樹脂には、グラフェンベースの PLA 樹脂 (Graphene 3D Lab. 製, 体積抵抗: $0.6 \Omega \cdot \text{cm}$) を使用する。3D プリンタの制御には Repetier-Host を、スライサには Slic3r を使用する。これらはいずれもフリーソフトであり、RepRap ベースの 3D プリンタ全般で使用することができる。

提案手法によりタッチ入力が発生させるために、内部に配線された隣り合う導電性の柱同士が接触せず、完全に独立した状態である必要がある。また、入出力部を繋ぐ経路が断線していない必要がある。一方で FDM 方式 3D プリ

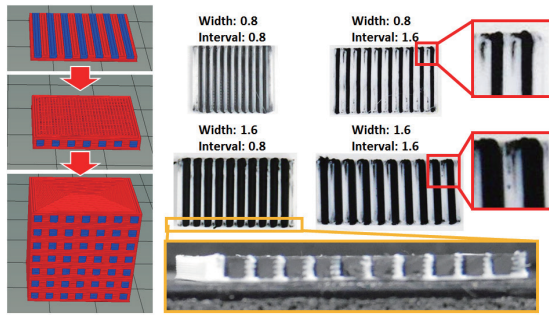


図 2 造形精度評価用プレート。10 本の導電性の線は造形時に内部に埋め込まれる点群の 1 列分に相当する。

Fig. 2 Striped pattern plates. This plate is equivalent to conductive points standing in a row of grid-layout conductive points.

ンタによる 2 色造形の際、造形品質が低下してしまう問題も報告されている [9]。待機中のプリントヘッドから溢れる樹脂による汚れなどによって、隣り合った導電性の配線同士が接触してしまう恐れがある。また、面積の小さな「点」を積層する場合、もう一方のノズルから出力される樹脂によって塗りつぶされてしまい、内部で断線する可能性がある。提案手法ではこうした問題を解決し 3D オブジェクトを造形する手法を検討する必要がある。

Clean color [9] で述べられているようなソフトウェア上での造形パスの工夫に加え、本研究では 3D オブジェクトを 90 度傾け、内部の導電性の柱が横たわるような向きにして造形を行う (図 2 左)。これにより導電性の柱を 1 本ずつ「線」として積層できるため、オブジェクト内部配線の断線を避けることができる。また、1 列分の柱を造形し終えた際に、非導電性樹脂の層が造形される (図 2 左・中段)。これにより導電性の層をカバーできるため、高さ方向で隣り合う柱同士の接触を避けることができる。これらを踏まえ、オブジェクト内部の導電性の柱同士の接触について評価を行った。図 2 右に示すような、1 列分の導電性の柱を積層したプレートを複数造形する。この際、造形した隣り合う導電性素材同士が接触していないかについて調査を行う。前述したとおり、今回採用した造形方法では積層時の高さ方向で接触する確率は非常に低い。そのためここでは横方向に並んだ柱同士の接触のみを評価対象とする。評価には、最大 20 MΩ まで測定可能なテストを使用し、隣り合う導電性の柱の接触状態を調査する。各導電部について、上部、中部、下部の 3 箇所についてテストを当て、一度以上反応があった場合をエラー (接触している) とし、各パラメータの組み合わせについて非接触率を算出する。評価用のプレートには、柱の幅、間隔を 0.8, 1.6 mm の 2 種類ずつ用意し、それらの組み合わせ (合計 4 パターン) について評価を行う。導電性の柱は 1 枚のプレートにつき 10 本とし、各プレートを 10 枚ずつ用意し評価を行う。

結果、非接触率は間隔が 0.8 mm 場合 75 % 以上、1.6 mm

の場合 96 % 以上となり、間隔が広くなるほど線同士が接触する確率が下がることがわかる (図 3(a))。また、柱の幅の違いには大きな影響は見られなかった。ここで評価に使用したプレートに着目すると、導電部の端が横に広がっていることが確認できる (図 2)。これは出力時に押し出された樹脂の滲みにより発生しており、隣り合う導電性の柱同士の接触の原因のひとつであると考えられる。

そこで、実験に使用したプレートの両端を 1 mm ずつ切断し、再度接触状態の測定を行ったところ、非接触率は間隔 0.8 mm の場合でも 98 %、1.6 mm の場合 100 % の精度で柱同士が接触していない結果となった (図 3(b))。このことから、提案手法では 3D オブジェクト造形後に点群の表面 (入出力部) をヤスリなどにより、余分に溢れ出た導電性の樹脂を取り除くことで接触確率を下げることができる。また、提案オブジェクトをタッチパネル上で使用する際、出力部がタッチパネル上に接触している必要がある。そのため出力部を平面にするという意味でも、ヤスリがけを行うことが有効だといえる。今回示した条件を基にし、かつ一定以上の長さの「線」の積層により造形することで、内部に複雑な形状の配線を持つ場合でも高精度に 3D プリントできることを確認している。

なお、今回の調査では特定の 3D プリンタ環境でのみ行っているが、本研究では RepRap ベースの 3D プリンタの使用を想定している。そのため特定のメーカーの 3D プリンタ環境に限らず、様々な 3D プリンタに同様の条件を適用することができる。また、3D プリンタ自体の改造や、制御ソフトウェア上で特殊な設定を施すことなく実現している。一般に、3D プリンタの造形品質を左右する要因のひとつとして、ノズル口径の大きさがある。これは、ノズル口径の大きさによって一度に出力される造形パスの最低幅が決定されるからである。今回、特殊な環境下での造形は行わず、市販されている比較的安価な 3D プリンタを用いた造形を行っているため、標準サイズである 0.4 mm 口径のノズルを採用した。これをより細かいものを採用することで、導電性の点群をより小さくし、かつ造形精度の更なる向上も見込むことができると考えられる。

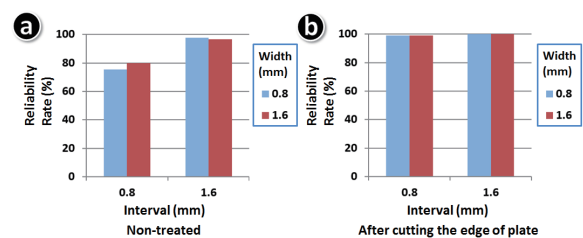


図 3 造形精度: (a) ヤスリがけ前, (b) ヤスリがけ後。
Fig. 3 Reliability rate: (a) Non-treated plate, (b) after cutting the edge of the plate.

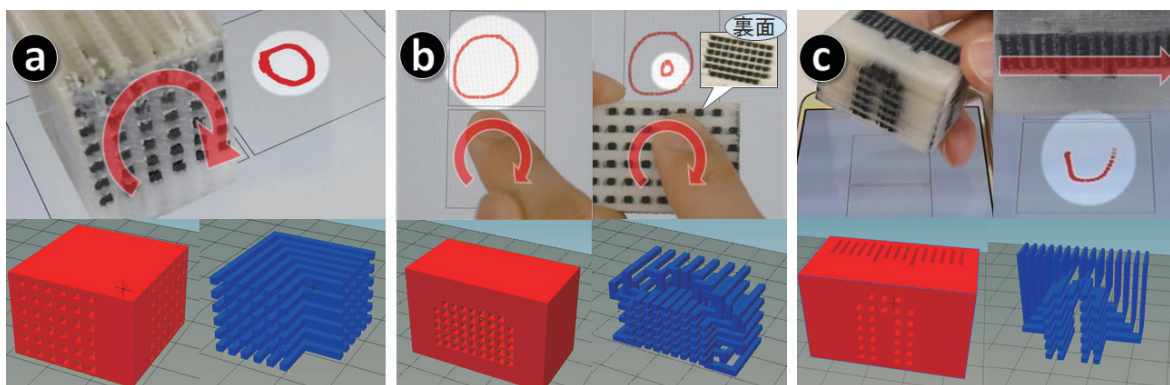


図 4 (a) 側面でのタッチ入力, (b) タッチ移動量の変換, (c) タッチ操作の変換.

Fig. 4 (a) Side touch interface, (b) Changing the Control-Display gain, (c) Transforming the touch movement.

5. インタフェース例

提案手法によって発生させたタッチ入力を可視化するため、簡単なドローソフトを実装した。図 4(b) 左上のように、入力領域 (下部) で行われたタッチ入力を表示領域 (上部) に描画する。以下に示す例は全てこのドローソフトを使用して提案手法によるタッチ入力の軌跡を描画している。

図 4(a) は、直角に曲げた導電部をオブジェクト内部に積層することで側面でのタッチ入力を可能としている。これにより側面入力を可能とするスマートフォンケースの実現が考えられる。提案手法によって 2 次元方向に入力が可能なため、スマートフォン側面での上下方向のスクロール操作の他に、奥行き方向へのスワイプ入力など多彩な入力を実現できる。図 4(b) に示す 3D オブジェクトは、出力部の点の間隔に対し、入力部の点の間隔を広げて造形をしている。これにより、ユーザのタッチ操作に対しタッチパネル上で行われるタッチ操作の移動量を変更できる。例えば、ユーザの行うタッチ操作に対し、より細かな動きでの入力をタッチパネル上で発生させることができる (図 4(b) 右上)。また、(a) と (b) の手法を組み合わせたインタフェースをカードボード HMD に適応することで、インタラクティブな VR コンテンツを操作するためのトラックパッドを安価に実装できる (詳細は 8, 9 章にて述べる)。

ここまでで紹介した応用例では、ユーザが行ったタッチ操作と同じ動きのタッチ入力を行うインタフェースを示した。これに対し、点群の配置を任意の形状に変えることで、ユーザのタッチ操作と異なる動きのタッチ入力を発生させることもできる。図 4(c) に示した例では 3D オブジェクトの出力部を U 字型に配置している。また入力部の形状を ExtensionSticker のような縞模様状に並べることで、ユーザの簡単なスクロール操作によって任意の形状のタッチ入力を行うインタフェースを実現できる。出力部の点群の配置形状を変えることで、様々な形のタッチストロークを入力できる。タッチパネル上でユーザのタッチ操作を記録

し、それと同じ動きを実現する 3D オブジェクトを出力すれば、マクロのようなタッチ入力の記録・再生を実現できる。また Android OS のパターンロック解除に応用することで、スクロール操作をするだけでロックを解除するなど、簡易的な認証にも使用できる。提案手法は 3D プリンタによって様々な形状の 3D オブジェクトに適用することができる。そのため、例えばキャラクタの形状をしたキーホルダとして簡易認証インタフェースを持ち歩くことも可能である。ExtensionSticker の手法では、印刷するパターンの形状を変えることで、ユーザの回転操作などをスクロールに変換していた。これに対し、提案手法ではユーザが行ったスクロール操作を逆に 2 次元の任意形状ストローク操作に変換しタッチ入力を発生させることができる。

6. 実験 1: タッチ認識精度

本研究で提案する手法を用いたタッチ入力を発生させるために必要な点のサイズ、及び点同士の間隔を調査するため、評価実験を行った。

実験参加者は、11 名の大学生・大学院生 (女性 4 名、男性 7 名) であり、平均年齢は 21.8 歳、標準偏差は 1.52 歳である。また、参加者は全員がスマートフォンなどのタッチパネルデバイスを使用した経験がある。

6.1 タスク

実験条件として、点の縦横幅 (*Width*) を 0.8, 1.6, 2.4 mm, 点同士の間隔 (*Interval*) を 0.8, 1.6, 2.4, 3.2 mm とし、それらを組み合わせた基本形 3D オブジェクトを用意した (図 5)。これらのオブジェクトをタッチパネル上に両面テープを用いて固定する。実験参加者はこのオブジェクト上で 20 回ずつタップタスクを行う。この際、入力を認識した回数からタッチ入力精度を算出する。また、3D オブジェクトはタッチパネル中央部付近に配置して実験を行った。使用する 3D オブジェクトは高さ 15.0 mm に設定し (高さ誤差 ± 0.1 mm 以下)、隣り合う全ての点同士が内部

で接触していないことを確認した上で実験を行う。

実験には Apple iPad mini (入力領域 159.5×119.7 mm, 解像度 1024×768 px) 及び Samsung Galaxy S6 edge (入力領域 112.6×633.6 mm, 解像度 2560×1440 px) の 2 種類のデバイスを用いた。記録された実験データは 3 (Width) $\times 4$ (Interval) \times タップ数 20 回 \times デバイス 2 種類 = 480 回 (各デバイスについて 240 回ずつ) となる。

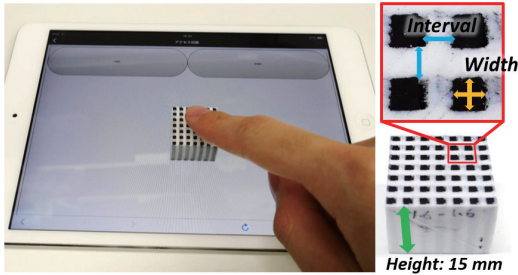


図 5 (左) タップ実験の様子と (右) パラメータ設定。

Fig. 5 (Left) Experimental setting, and (Right) parameter setting in the tap operation task.

6.2 実験結果

実験結果を図 6 に示す。iPad mini を用いた場合、点同士の間隔が 0.8 mm の時、縦横幅 0.8 mm で 100 %, 1.6 mm で 99 %, 2.4 mm で 99.5 % と高精度でタッチ認識に成功した。Galaxy S6 edge を用いた場合、間隔が 0.8 mm の時、縦横幅 0.8 mm で 95 %, 1.6 mm で 97.5 %, 2.4 mm で 93 % の精度となった。間隔が 1.6 mm の時、縦横幅 0.8 mm で 97.5 %, 1.6 mm で 98.5 %, 2.4 mm で 99 % となった。また、間隔が 2.4, 3.2 mm の時、縦横幅 2.4, 3.2 mm で 90 % 以上の精度となった。

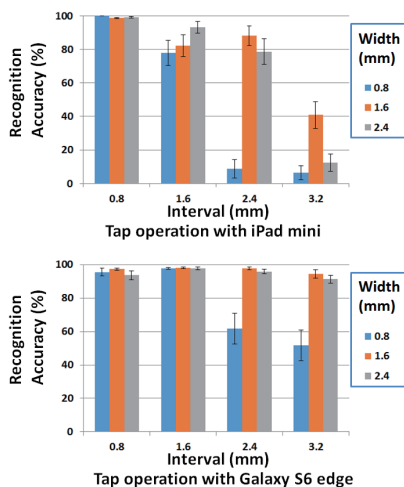


図 6 iPad mini, Galaxy S6 edge を用いたタップ実験結果。

Fig. 6 Tap operation experimental results on the iPad mini and Galaxy S6 edge.

6.3 点の縦横幅・間隔による精度の違い

評価実験の結果から点同士の間隔が広がるにつれて、認識精度が下がることが分かる。間隔が広くても点の縦横幅が広ければ、高精度でのタッチ認識が可能である。特に Galaxy S6 edge を用いた場合では、縦横幅が 1.6, 2.4 mm の時で全て 90 % 以上の認識精度でタッチ認識に成功している。一方で点の間隔 2.4, 3.2 mm について着目すると、点の縦横幅が狭い 1.6 mm の方が、2.4 mm よりも精度が高い結果になった。これは、ユーザが 1 本の指で同時に触れる導電部の数に依存していることが考えられる。図 7 は実験に使用した 3D オブジェクトである。人間の指の大きさを 10 mm 四方の正方形と仮定した場合、縦横幅 2.4 mm では同時に 4 つの点に触れることができる。これに対し、縦横幅 1.6 mm では 9 つの点に触れることができる。このことから、導電性の点ひとつひとつの縦横幅が狭くても、一度により多くの点に触れていればタッチ入力精度が上がる事が分かる。実験に使用したデバイスごとに比較をすると、iPad mini は特にこの影響を受け、精度が下がることが確認された。実験により高精度での認識に成功した 3D オブジェクトを用いることで、2 次元のタッチ入力ができることを確認した。

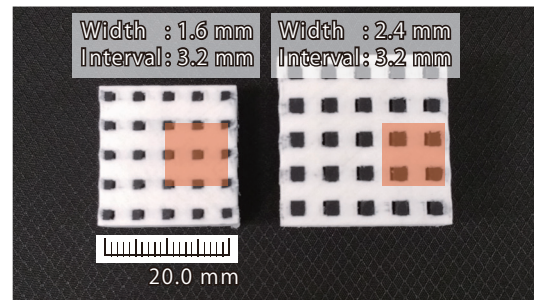


図 7 実験に使用した 3D オブジェクト: (左) 縦横幅 1.6 mm, 間隔 3.2 mm, (右) 縦横幅 2.4 mm, 間隔 3.2 mm. 図中の四角はオブジェクト上で指が接触する範囲を示す。

Fig. 7 Interfaces used in the evaluation: (Left) 1.6 mm width at 3.2 mm interval and (Right) 2.4 mm width at 3.2 mm interval. The red square indicates the range that can be simultaneously touched by a finger.

7. 実験 2: ポインティングタスク

提案デバイスのユーザビリティを評価するため、ポインティングタスクを実施した。ここではフィッツの法則 [7] における操作性性能 (パフォーマンス) を検証する。

本実験には 10 人のボランティアが参加した。その内、女性が 1 名、男性が 9 名であり、平均年齢は 22.2 歳、標準偏差は 1.72 歳であった。参加者は全員が裸眼で通常の視力、あるいは矯正して PC 操作に支障がない視力を持っており、全員が右利きであった。また、実験参加者は右手の指 1 本のみを使用してタスクの操作を行う。

7.1 タスク

図 8 に示すように、ターゲットである 11 個の円がタッチパネルディスプレイに表示される。また十字型のカーソルも表示される。実験参加者は、ディスプレイ下部に表示した矩形領域内で操作を行う。この矩形領域は、仮想のトラックパッドとなっており、市販のラップトップ PC に標準搭載されたトラックパッドと同様にカーソルを操作することができる。タッチスクリーン上のトラックパッドを模倣するため、(a) 指の移動量に対してカーソルは相対座標入力モードで移動し (文献 [4] 参照), (b) 遠くのターゲットを選択する場合はクラッチ操作 (トラックパッドを繰り返してタッチする操作) を必要とする。実験参加者は赤いターゲット上にカーソルを合わせクリックすると、次のターゲットが赤く表示される。ターゲットが選ばれる順番は図 8 に示すとおりである。

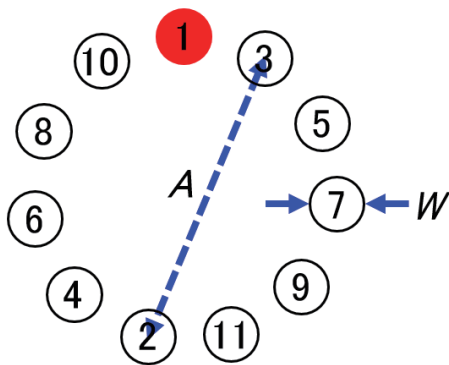


図 8 ポインティングタスクのパラメータ定義。
Fig. 8 Parameter setting in the pointing task.

提案手法による 3D オブジェクトの性能評価を行うため、3D オブジェクトを介してトラックパッドを操作した場合、タッチスクリーンを直接操作した場合の比較を行う。この際、実験参加者にはできる限り速く、かつ正確に操作を行うよう指示をした。通常のトラックパッドにおけるクリック操作は、タップ操作またはトラックパッドを押し込む操作によって行われるが、本実験ではタップ操作のみをクリック操作として認識する。

実験には SONY 製 VAIO Pro 11 (Intel Core i7-4650U, 2.29 GHz, 8 GB RAM, Windows 10 Home) を使用する。タッチスクリーンには GeChic On-Lap 1502I/J (入力領域 344.2×193.5 mm, 解像度 1920×1080 px, 反応時間 17.5 ms) を使用し、USB 2.0 及び HDMI ケーブルによって PC に接続し、平らな机の上で実験を行う (図 9)。実験システムは Hot Soup Processor 3.4 によって実装した。ポインティングタスクでは、タップ操作実験において特に認識精度の高かったパラメータ (点の縦横幅・間隔 0.8 mm, 高さ 15 mm) の 3D オブジェクトを使用しており、 $58 \times 33 = 1914$ 本の導電性素材 (入力領域 92×52 mm) を持つ。

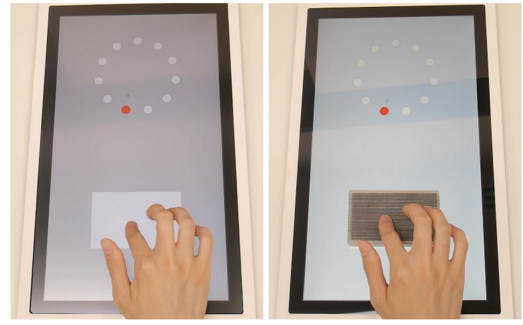


図 9 実験のセッティング: (左) 3D オブジェクトと (右) タッチスクリーンを使用したポインティングタスク実験の様子。

Fig. 9 Experimental setting: (Left) Pointing task with 3D-printed interface, and (Right) touchscreen.

7.2 実験デザインと操作手順

ターゲット間の距離 A を 256, 512, 756 pixels (45.8, 91.6, 135.3 mm) に設定する。また、ターゲットの直径 W を 36, 48, 60 pixels (6.4, 8.6, 10.7 mm) に設定する。パラメータの組み合わせは、 $3(A) \times 3(W) = 9$ 種類である。参加者は 11 個の円を連続でクリックしていき、それが終わると次のパラメータの組み合わせで 11 個の円をクリックする。合計 9 種類のパラメータがランダムな順序で選出され、合計で $11 \text{ 個} \times 9 \text{ 種類} = 99$ 個の円をクリックするのを 1 セットとする。実験参加者は 1/3 セット (33 回のクリック) の練習を行った後に、続けて本番を 2 セット行う。この練習・本番のタスクを、提案手法あり・なしの条件それぞれで行う。

記録された実験データは、ターゲット数 11 個 \times パラメータの組み合わせ 9 種類 \times 2 セット \times 2 条件 (3D オブジェクトの有無) \times 実験参加者 10 名 = 3960 回 (3D オブジェクト、タッチスクリーン操作について各 1980 回ずつ) となる。実験は事前のインストラクションから全試行終了まで 1 人あたり 20 分程度であった。

7.3 結果と考察

合計 3960 回の試行があり、その内エラー (ターゲット外でのクリック) は 93 回であった (エラー率 2.25 %). エラーを排除した試行について繰り返しのある分散分析 (反復測定) により分析を行う。多重比較には Bonferroni の手法を用いた。

ターゲットサイズ W を実験データによって補正してから操作性能を分析する手法 [15] は本分析では使用していない (利点・欠点の議論については文献 [25] を参照)。クラッチ操作がポインティング性能に有意に影響するため [4], 指がタッチパネルから離れている時間を含めた場合と除いた場合の操作時間の両方について分析を行った。ここでは、指がタッチパネルから離れている時間を含めた時間を Total MT , ユーザの指がタッチパネル、3D オブジェクト上に接触している時間を Contacted MT と定義する。

7.3.1 トータル操作時間 Total MT

主効果が見られたのは A ($F_{2,18} = 344.653, p < 0.001$), W ($F_{2,18} = 31.556, p < 0.001$) であった. また, 入力デバイス (3D オブジェクトかタッチスクリーンか) の効果は見られなかった ($F_{1,9} = 1.304, p = 0.283$). 多重比較の結果, A が大きくなるほど (全ての A の組み合わせに対して $p < 0.001$), また W が小さくなるほど (最低でも $p < 0.01$) MT が増大した. 平均時間は 3D オブジェクトでの操作が 1595 ms, タッチスクリーンでの操作が 1553 ms であった. どのパラメータ間にも有意な交互作用は見られなかった.

7.3.2 接触操作時間 Contacted MT

主効果が見られたのは A ($F_{2,18} = 275.178, p < 0.001$), W ($F_{2,18} = 74.740, p < 0.001$) であった. また, 入力デバイスの効果は見られなかった ($F_{1,9} = 0.033, p = 0.860$). 多重比較の結果, A が大きくなるほど (全ての A の組み合わせに対して $p < 0.001$), また W が小さくなるほど (最低でも $p < 0.01$) MT が増大した. 平均時間は 3D オブジェクトでの操作が 947.9 ms, タッチスクリーンでの操作が 951.6 ms であった. どのパラメータ間にも有意な交互作用は見られなかった.

7.3.3 エラー率

A ($F_{2,18} = 2.296, p = 0.129$), と W ($F_{2,18} = 0.231, p = 0.796$) において有意なデバイスの効果は見られなかった. エラー率の平均値は, 3D オブジェクト操作の場合 $53/1980 = 2.68\%$, タッチスクリーン操作の場合 $40/1980 = 2.02\%$ であった. これらのデータは, 一般的なフィッツの法則におけるタスクよりわずかに低い ([22] では 3-4 %).

7.3.4 フィッツの法則の適合度の検証

フィッツの法則 [7] によると, MT とターゲットのパラメータ (A 及び W) は次の関係をもつ.

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right)$$

a と b は実験的に決定される定数である. $\log_2(A/W + 1)$ を Index of Difficulty (ID) と呼び, この値が大きくなるほどポインティングの難度が増すことを示す.

図 10 に示すように 3D オブジェクト操作, タッチスクリーン操作時の両方においてフィッツの法則に適合していることがわかる ($R^2 > 0.93$ - 0.98). したがって本実験で用いた 2 種類の入力デバイスは, 一般的なポインティングデバイスであるトラックパッドを適切に模倣しているといえる.

7.3.5 性能指標 IP

一般的にポインティングデバイスの操作性能として, 性能指標 Index of Performance (IP) の値がフィッツの法則の回帰式から計算される [22], [25]. IP は ID_{mean}/MT_{mean} [bits/s] であり, 実験で採用した ID の平均値である ID_{mean} と, MT の結果の平均値である MT_{mean} によって求める. また, IP の異なる定義として $1/b$ [bits/s] も HCI 分野に

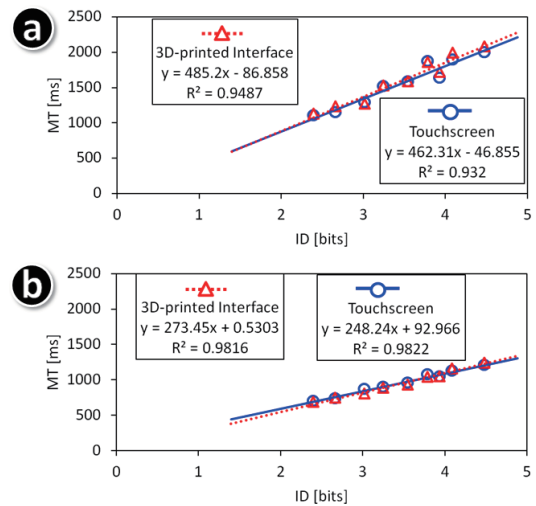


図 10 (a) Total MT と (b) Contacted MT のフィッツの法則の適合度.

Fig. 10 Fitts' law fitness for (a) total MT and (b) contacted MT.

において採用されることがある. Wobbrock ら [22] によって提案されているように, これら両方について IP を示す. 一般的な指標として, デバイスまたは入力手法の IP が大きいほど良いとみなされる. 得られた IP を表 1 に示す.

表 1 操作デバイス間の IP の比較.

Table 1 IP value comparison for the two devices.

	Total MT		Contacted MT	
	$1/b$	ID_{mean}/MT_{mean}	$1/b$	ID_{mean}/MT_{mean}
3D-printed interface	2.06	2.17	3.36	3.65
Touchscreen	2.16	2.23	4.03	3.63
Compared to Touchscreen	4.72 % down	2.46 % down	9.22 % down	0.544 % up

7.3.6 フィッツの法則による分析についての考察

表 1 によれば, 3D オブジェクトを使用するとタッチスクリーンよりも IP の値が低くなる傾向がある. しかし, 3D オブジェクトの有無は Total MT, Contacted MT 及びエラー率に有意な影響を与えていなかった. このような (有意ではない) 若干のパフォーマンス低下の理由のひとつとして, 表面の摩擦が考えられる. タッチスクリーンの表面は滑りやすく, 指をスムーズに動かすことができた. 一方, 3D オブジェクトの表面は目の細かいヤスリによって研磨した後であっても, わずかにざらつきがあった. このように 2 種類のデバイス間に摩擦の違いがあるものの, 3D オブジェクトの性能は IP が 2-5 %程度しか性能が下がっていないことが分かる. 従って, 3D オブジェクトを使用した場合でも, 表面を十分に研磨するか, 表面上に薄いシートを貼り付けることで, よりタッチスクリーンに近い操作性が実現できると考えられる. これらのことから,

提案手法である 3D オブジェクトを介したタッチパネルの操作は、一般的なポインティングデバイスに近い性能で使用可能だといえる。

8. アプリケーション例

図 11 は提案手法によって、半球体のトラックボールのような 3D オブジェクトを作成した例である。この半球体オブジェクトによって操作可能な地球儀ビューを実装した。ユーザはこの半球体オブジェクト上をスクロール操作することで画面に描画された地球儀を回転させ、ピンチ操作によってズームを行うことができる。これにより、画面に描画された地球儀を直接触れて動かしているかのような操作体験が可能となる。この他にも 3D プリンタを使用することでコンテンツに合った操作を可能とする、様々な形状のインタフェースを作成できる。

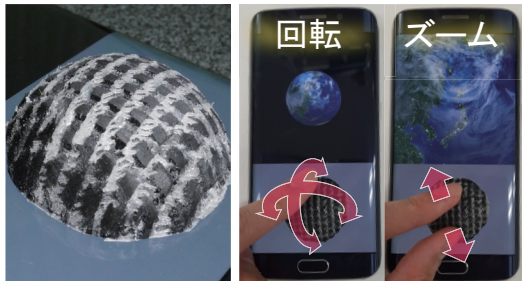


図 11 半球体 3D オブジェクト。トラックパッド上をスクロール操作により地球儀を回転、ピンチ操作によりズームが可能。

Fig. 11 A hemispherical object. The user can rotate the earth by scroll operation, and zoom by pinch operation.

図 12 は、提案手法をカードボード HMD に適用した例である。これにより、Samsung Gear VR^{*1} が持つようなトラックパッドをカードボード HMD 表面上に低コストで実装することができる。先行研究の MilboxTouch^{*2} [26] は、ExtensionSticker [28] を応用しスクロール操作やスワイプ、回転操作など様々なタッチ入力を可能としていた。しかし、MilboxTouch では HMD 内部に格納したスマートフォン画面上で、スクロール操作やタップする入力しか発生させることができなかった。これに対し提案手法を用いれば、より高いインタラクティブ性を実現するインタフェースをひとつの 3D オブジェクトによって実装可能である。例えば、HMD 側面上でのタッチ操作によるポインティングや手書き入力、3 点以上のマルチタッチ操作など、より多彩な入力が可能となる。

9. まとめと今後の展望

本研究では「自由自在な 2 次元タッチ操作が可能な 3D オブジェクト」を実装しその応用例を示した。提案オブ



図 12 側面にトラックパッドを持つカードボード HMD。

Fig. 12 Cardboard HMD with Trackpad.

ジェクトは FDM 方式 3D プリンタを用いることで容易にプロトタイピングできる。FDM 方式 3D プリンタは、高温で溶かした樹脂を何層にも渡って積み重ねていくことで造形するため、完全に透明な物体を出力することは難しい。また、本研究ではタッチ入力を発生させるための導電性素材としてグラフェンベースの導電性樹脂を使用している。そのため、提案手法によって作成した 3D オブジェクトをタッチパネル上で使用する際に、タッチパネルディスプレイの一部が遮蔽される問題がある。これは 5 章で示したタッチ移動量の変更手法によってある程度軽減できる。つまり、点同士の間隔を物理的に狭めることで、ユーザが操作する入力部の面積を確保しつつ、画面に接触する出力部の面積を小さくすることができる。特に前章で示した側面にトラックパッドを持つカードボード HMD では、VR 空間を表示するためのディスプレイ領域を確保する必要があるため、この手法が有効である。

また本論文では提案手法によって安定したタッチ入力を発生させるために必要な条件及び、その条件下における 3D オブジェクトの性能評価を目的とした評価実験を行った。実験の結果、提案オブジェクトが安定した入力を可能とし、一般的なポインティングデバイスに近い性能で使用可能であることを示した。今後はこれに加え、操作のために最低限必要な導電性素材全体が有する面積 (タップ・スクロールのために必要な点群の行数・列数) についての調査を行う。また、Lumino [1] で提案されているような、シースルー型のインタフェースの実現を行う。PAPILLON [2] のように、Polyjet 方式 3D プリンタを用いて、光ファイバのような形状のオブジェクトを出力すれば、タッチパネルディスプレイ上に表示された情報を 3D オブジェクト上に表示できる。光ファイバのような高精細なオブジェクトの作成には Stratasys Objet のような Polyjet 方式 3D プリンタが必要となるが、文献 [6], [17], [20] などの手段によって導電性素材を埋め込むことで実現が可能であると考えられる。現在、本論文で示した全ての 3D オブジェクトは、著者がモデリングを行っている (Autodesk 123D Design 使用)。今後は、Capricate [18] で提案されているような、導電性素材の内部配線を考慮した 3D オブジェクトの作成支援システムの構築を目指す。

^{*1} <https://www3.oculus.com/en-us/gear-vr/>

^{*2} <http://milbox.tokyo/milboxtouch/>

3D プリンタの低価格化に伴い、多くの企業や大学で FDM 方式 3D プリンタが導入されている。本研究で提案した 3D オブジェクトは、こうした環境における様々なインタラクティブデバイスのプロトタイプングとしての活用が期待される。なお、本研究は ACM UIST'16 にてデモ発表を行った [13]。

謝辞 本研究は JST, COI の支援を受けたものである。また、本研究の一部は JSPS 科研費 16J10193 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Patrick Baudisch, Torsten Becker and Frederik Rudeck. Lumino: tangible building blocks based on glass fiber bundles. In *Proc. of CHI'10*, pp.1165–1174 (2010).
- [2] Eric Brockmeyer, Ivan Poupyrev and Scott Hudson. P-PILLON: designing curved display surfaces with printed optics. In *Proc. of UIST'13*, pp.457–462 (2013).
- [3] Jesse Burstyn, Nicholas Fellion, Paul Strohmeier and Roel Vertegaal. PrintPut: Resistive and Capacitive Input Widgets for Interactive 3D Prints. *IFIP INTER-ACT'15*, Vol.9296 of the series Lecture Notes in Computer Science, pp.332–339 (2015).
- [4] Géry Casiez, Daniel Vogel, Qing Pan and Christophe Chaillou. RubberEdge: reducing clutching by combining position and rate control with elastic feedback. In *Proc. of UIST'07*, pp.129–138 (2007).
- [5] Liwei Chan, Stefanie Muller, Anne Roudaut and Patrick Baudisch. CapStones and ZebraWidgets: sensing stacks of building blocks, dials and sliders on capacitive touch screens. In *Proc. of CHI'12*, pp.2189–2192 (2012).
- [6] David Espalin, Danny W. Muse, Eric MacDonald and Ryan B. Wicker. 3D Printing multifunctionality: structures with electronics. *Journal of Advanced Manufacturing*, Vol.72, No.5, pp.963–978 (2014).
- [7] Paul M. Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol.47, No.6, pp.381–391 (1954).
- [8] Timo Götzelmann and Daniel Schneider. CapCodes: Capacitive 3D Printable Identification and On-screen Tracking for Tangible Interaction. In *Proc. of NordiCHI'16*, Article No.32 (2016).
- [9] Jean Hergel and Sylvain Lefebvre. Clean color: Improving multi-filament 3D prints. *Journal of Computer Graphics Forum*, Vol.33, No.2, pp.469–478 (2014).
- [10] Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic and Jean-Daniel Fekete. Tangible remote controllers for wall-size displays. In *Proc. of CHI'12*, pp.2865–2874 (2012).
- [11] Rhys Jones, Patrick Haufe, Edward Sells, Pejman Ira-vani, Vik Olliver, Chris Palmer and Adrian Bowyer. RepRap - the replicating rapid prototyper. *Journal of Robotica*, Vol.29, No.1, pp.177–191 (2011).
- [12] Sven Kratz, Tilo Westermann, Michael Rohs and Georg Essl. CapWidgets: tangible widgets versus multi-touch controls on mobile devices. In *CHI'11 Extended Abstracts*, pp.1351–1356 (2011).
- [13] Kunihiro Kato and Homei Miyashita. 3D Printed Physical Interfaces that can Extend Touch Devices. In *Adjunct Proc. of UIST'16*, pp.47–49 (2016).
- [14] Rong-Hao Liang, Liwei Chan, Hung-Yu Tseng, Han-Chih Kuo, Da-Yuan Huang, De-Nian Yang and Bing-Yu Chen. GaussBricks: magnetic building blocks for constructive tangible interactions on portable displays. In *Proc. of CHI'14*, pp.3153–3162 (2014).
- [15] I. Scott MacKenzie Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Journal of Human-Computer Interaction*, Vol.7, No.1, pp.91–139 (1992).
- [16] Jun Rekimoto. SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proc. of CHI'02*, pp.113–120 (2002).
- [17] John Sarik, Alex Butler, Nicolas Villar, James Scott and Steve Hodges. Combining 3D printing and printable electronics. In *Proc. of TEI'12 Work in Progress*, pp.1–5 (2012).
- [18] Martin Schmitz, Mohammadreza Khalilbeigi, Matthias Balwierz, Roman Lissermann, Max Mühlhäuser and Jürgen Steimle. Capricate: A Fabrication Pipeline to Design and 3D Print Capacitive Touch Sensors for Interactive Objects. In *Proc. of UIST'15*, pp.253–258 (2015).
- [19] Saraha Ueno, Kunihiro Kato and Homei Miyashita. A Tangible Interface to Realize Touch Operations on the Face of a Physical Object. In *Adjunct Proc. of UIST'16*, pp.81–83 (2016).
- [20] Florens Wasserfall. Embedding of SMD populated circuits into FDM printed objects. In *Proc. of SFF'15*, pp.180–189 (2015).
- [21] Alexander Wiethoff, Hanna Schneider, Michael Rohs, Andreas Butz and Saul Greenberg. Sketch-a-TUI: low cost prototyping of tangible interactions using cardboard and conductive ink. In *Proc. of TEI'12*, pp.309–312 (2012).
- [22] Jacob O. Wobbrock, Kristen Shinohara and Alex Jansen. The effects of task dimensionality, endpoint deviation, throughput calculation, and experiment design on pointing measures and models. In *Proc. of CHI'11*, pp.1639–1648 (2011).
- [23] Neng-Hao Yu, Li-Wei Chan, Seng-Yong Lau, Sung-Sheng Tsai, I-Chun Hsiao, Dian-Je Tsai, Lung-Pan Cheng, Fang-I Hsiao, Mike Y. Chen, Polly Huang and Yi-Ping. TUIC: enabling tangible interaction on capacitive multi-touch displays. In *Proc. of CHI'11*, pp.2995–3004 (2011).
- [24] Neng-Hao Yu, Sung-Sheng Tsai, I-Chun Hsiao, Dian-Je Tsai, Meng-Han Lee, Mike Y. Chen and Yi-Ping Hung. Clip-on gadgets: expanding multi-touch interaction area with unpowered tactile controls, In *Proc. of UIST'11*, pp.367–372 (2011).
- [25] Shumin Zhai, Jing Kong and Xiangshi Ren. Speed-accuracy tradeoff in Fitts' law tasks: on the equivalency of actual and nominal pointing precision. *Journal of Human-Computer Studies*, Vol.61, No.6, pp.823–856 (2004).
- [26] 加藤 邦拓, 宮下 芳明. なでて操作するカードボード HMD. 第 23 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ論文集 (WISS'15), pp.13–18 (2015).
- [27] 加藤 邦拓, 宮下 芳明. 紙窓: カード内領域を独立したタッチパネルディスプレイのように扱うインタフェース. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.17, No.3, pp.245–254 (2015).
- [28] 加藤 邦拓, 宮下 芳明. ExtensionSticker: タッチパネルを拡張するインタフェース. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.18, No.1, pp.9–18 (2016).
- [29] 中島 康祐, 伊藤 雄一, Simon Voelker, Christian Thoresen, Kjell Ivar Øvergård, Jan Borchers. PUCs: 静電容量方式マルチタッチパネルにおけるユーザの接触を必要としないウィジェット検出手法. 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.1, pp.329–337 (2015).