

表面でのタッチ操作が可能なタンジブルインタフェースの 3D プリント手法

上野 新葉^{†1} 加藤 邦拓^{†2} 宮下 芳明^{†1,†2}

概要：本稿では表面でのタッチ操作が可能なタンジブルインタフェースの 3D プリント手法を提案する。提案手法では、導電性と非導電性の 2 種類のフィラメントを用いてインタフェースを出力する。オブジェクト内部に配線を行うことでタッチ操作だけでなく、ユーザの回転操作による画面スクロールなど、入力・出力操作の変換が可能である。本稿では、提案したタンジブルインタフェースの造型手法について評価を行った。またその結果をもとに、インターフェースの試作を行った。

A 3D Printing Technique to Create a Tangible Interface with Touch Function

UENO SARAH^{†1} KATO KUNIHIRO^{†2} MIYASHITA HOMEI^{†1,†2}

Abstract: In this paper, we propose a 3D print technique to create a tangible interface by multi-material 3D printing. Our method allows the user to operate touch-panel devices by touching on the surface of the tangible interface. By shaping the structure of conductive wiring inside a 3D object allows the user not only to generate touch input but also to change the form of touch operations such as scroll-rotation conversion. This paper also reports of evaluation experiments about the touch function of tangible interfaces by our method. And, we made a variety of prototypes of tangible interfaces using a result of this evaluation.

1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末の普及に伴い、静電容量式のタッチパネル上で使用するタンジブルインタフェースの研究が盛んに行われ、こうした玩具やデバイスも発売されるようになってきた。また近年 3D プリンタは低価格化と普及が進み、こうしたインターフェースをプロトタイピングするためのツールとなっている。

本稿では、熱溶解積層方式 (FDM) の 3D プリンタを用いることで、表面でのタッチ操作が可能なタンジブルインタフェースを制作する手法を提案する（図 1）。導電性と

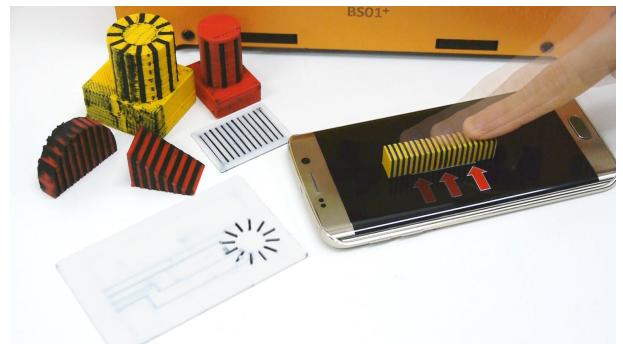


図 1 表面でのタッチ操作が可能なタンジブルインタフェース

^{†1} 現在、明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科
Presently with Department of Frontier Media Science, Faculty of Interdisciplinary Mathematical Sciences at Meiji University

^{†2} 現在、明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻
Presently with Programs in Frontier Science and Innovation, Graduate School of Science and Technology, Meiji University

非導電性のフィラメントを用いて出力した縞模様状のオブジェクトの表面を、指で触れることでタッチ入力を発生させることができる。これにより、タップだけでなく画面スクロール操作のような連続的なタッチ入力を可能とした [15]。オブジェクト内部に配線を行うことができるため、

入力・出力操作の変換が可能になる。これによりユーザの回転操作による画面スクロールなどが実現可能となる。オブジェクト内で配線が接触するのを確実に防ぐためには、線がより細く、線同士がより離れている必要がある。その制約を満たす最良の認識精度を実現するパラメータを評価実験により導出した。

従来のタングブルインターフェースはディスプレイ上での位置や角度が検出できる。それに加え、本稿で提案するような表面でのタッチ操作を発生できるオブジェクトのプロトタイプにより、新たなタングブルインターフェースを生み出す研究の加速へつながると考えられる。

2. 関連研究

2.1 導電性フィラメントを用いたファブリケーション

導電性フィラメントを用いたファブリケーションに関する研究は数多く行われている。Capriate では、静電容量タッチセンサを持つ 3D オブジェクトのデザインシステムを提案している [6]。導電性と非導電性の 2 種類のフィラメントを用いることで、ボタンやスライダなどのインターフェースや、タッチセンサを持つウェアラブルデバイスなどを実現している。Capacitive Blocks は静電容量センサを活用したブロックシステムを提案している [17]。FDM 方式 3D プリンタを用いることで、コンデンサの役割を持つブロックの出力を行う。このブロックの静電容量を計測することで、積み重ねられたブロックの計数を行う。MonoTouch では、複数ジェスチャの判別が可能な単一電極タッチセンサを提案している [16]。3D プリントした電極の静電容量で、タップ、上下左右スワイプなど複数ジェスチャの判別が行える。

2.2 ファブリケーションによるインターフェースの作成

本稿第二著者らの紙窓では、導電性インクによって導電部を印刷し、紙製のインターフェースを作成する手法を提案した [14]。紙窓では印刷した導電部の配置を識別することで、異なるアプリケーションを紙製インターフェース内部に表示させる。この紙製インターフェースには穴が開けられており、ユーザはこの穴を通してタッチパネル上に表示されたアプリケーションを操作することができる。他にも、導電部を印刷した紙を折り曲げることで、立体的な折り紙インターフェースの作成する手法の提案も行っている [12]。同様に、Sketch-a-TUI でも導電性インクを用いたインターフェースの作成を行っている [1]。紙製のタングブルインターフェースに導電部を手書きすることで、タッチパネル上の認識を行っている。

Printed Optics は、3D プリンタによって光ファイバのようなパイプを出力することでインタラクティブなデバイスの作成を行っている [4]。赤外線センサを用いることでユーザのタッチ入力を可能とするタッチインターフェース

や、スライダ、ダイヤルなど様々な入力インターフェースも実現している。また光ファイバの特性を利用することで、ディスプレイとしての役割も果たしている。

Touchplates では、穴の空いたアクリル製のプレートをディスプレイの上に乗せ、その穴を通してディスプレイをタッチ操作する手法を提案している [8]。

2.3 タッチパネル上で使用可能なタングブルインターフェース

近年、市販されているスマートフォンやタブレット端末の多くは、静電容量式タッチパネルを搭載している。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、金属などの導電体を介することでもタッチ入力を行うことができる。こうした静電容量によるタッチ検出手法は SmartSkin によって提案された [3]。それ以降、タッチパネル上に置いた物理的オブジェクトを認識し、インターフェースとして活用する研究が数多くなされている。

CapWidgets では、つまみ型オブジェクトを用いた操作手法を提案している [9]。CapWidgets 底面には 2 つの導電部が配置されており、オブジェクト自体を動かしたり、つまみを回す操作によるアプリケーションの操作を行っている。CapStones も同様に複数の導電部を配置することでオブジェクトの識別を行っている [5]。ブロック状の物理オブジェクトを重ねることで、異なったマルチタッチパターンを生成可能な機構を提案している。

GaussBricks 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ーフェースを提案している [7]。その応用例の 1 つとして、静電容量式タッチパネルを利用したオブジェクト上でタッチ操作を可能とするインターフェースを示している。またオブジェクトの形状に合わせてキャラクタが表示され、オブジェクト上をなでる操作によってキャラクタが反応するというアプリケーションも示している。GaussBricks ではオブジェクト上でタッチ操作を行っているが、これは特定箇所においてタッチ入力を発生させる導電部を順番に触れることで実現している。これに対し、提案手法では ExtensionSticker の手法を用いることで、スクロール操作のような連続的タッチ入力を可能とし、より細かな精度での入力が実現できる。Tangible Remote Controllers では、タブレット端末上に設置した物理オブジェクトによる大型ディスプレイでの作業のためのインターフェースを提案している [10]。複数の導電部を配置したボタンやスライダ、ダイヤルなどのインターフェースを実装しており、それらを乗せたタブレット端末自体をコントローラとして使用している。スライダ、ダイヤルのインターフェースは左右または円形に動かすことのできる機構を持ち、それらに配置された導電部によってインターフェースの操作を認識している。

3. 提案手法

本稿では表面でのタッチ操作が可能なオブジェクトを、導電性フィラメントと非導電性フィラメントを用いて3Dプリントする手法を提案する。既存研究であるExtensionStickerの手法を利用し、縞模様状のパターンを3Dプリントすることでタッチ入力を可能とする[15]。ユーザはタッチパネル上に置いたオブジェクトの表面上に触れるとき、その下部においてタッチ入力を発生させることができ。オブジェクトの表面上で縞模様が露出していれば、上面や側面などの任意の箇所でタッチ操作を行える。さらに、縞模様上で指をスライドさせるように触れるとき、スクロール操作のような連続タッチ入力をも可能とした。また、オブジェクト内部に配線を行うことで、タッチ操作だけでなくユーザの回転操作による画面スクロールなど、入力・出力操作の変換を可能とした。

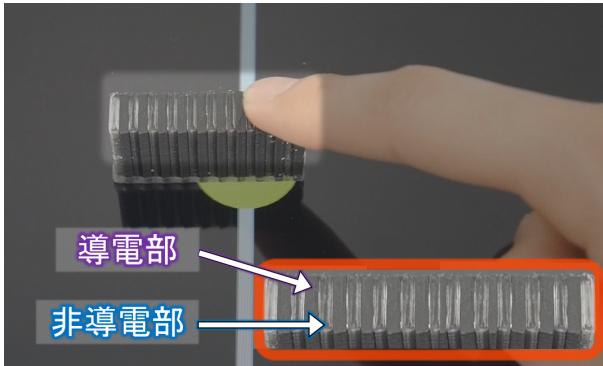


図 2 提案手法によるタッチ入力の発生

3.1 ExtensionSticker 技術の利用

提案するタッチインターフェースでは、本稿第二著者らの提案したExtensionStickerの手法を使用することで、スクロール操作のような連続的タッチ入力を実現する。ExtensionStickerは導電性インクによって縞模様状のパターンが印刷されたシートである。スマートフォンやタブレットなどの端末上に貼り付けるだけで、タッチインターフェースを拡張することができる。

ExtensionStickerの手法では複数の導電性の線を指でまたいで触ることでタッチ入力を発生させており、このパターンの形状を変えることで様々なインターフェースを実現している。また、指をスライドさせるような操作を行うことで、縞模様パターン上の指と接触している箇所が順にずれていき、タッチ入力を途切れさせることなく発生させることができる。

3.2 オブジェクト内部での配線

提案手法では、3Dプリンタを用いたインターフェースの

出力を行う。これによりユーザが操作を行う箇所（入力部）と、デバイスに接続する箇所（出力部）をつなぐ配線をオブジェクト内部に埋め込むことができる。ExtensionStickerの手法では配線が同一平面上に印刷されているため、この入出力部をつなぐ接続部分において誤操作が発生する可能性がある。そのためデバイスの端でしか使用できないという制約があった。これに対し提案手法では、タッチ入力の発生箇所のみを、オブジェクト表面へ露出させることができる（図3）。

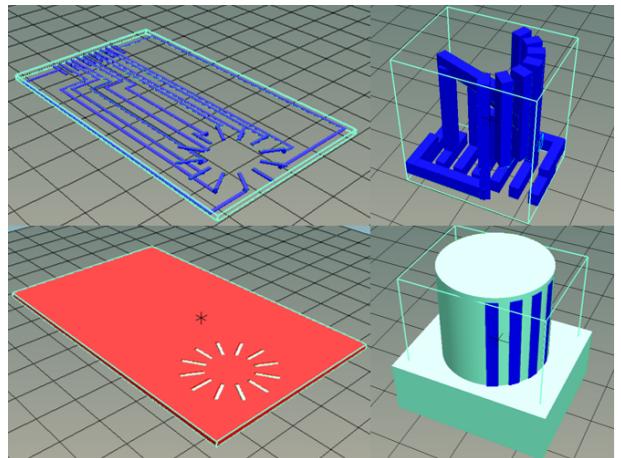


図 3 オブジェクト内部の配線

3.3 3D プリント手法

導電性と非導電性の箇所を同時に3Dプリントするために、使用するフィラメントごとに3Dモデルを作成する。作成した2つのモデルを読み込み、それぞれにフィラメント設定を施すことで、図2に示すようなオブジェクトを種類の異なるフィラメントを用いて出力できる。

この際、導電性フィラメントによって3Dプリントする箇所である縞模様状のパターンを構成する配線同士が接触してはいけない、という制約がある。

一方で、提案手法で使用するような2つのホットエンドを持つFDM方式3Dプリンタを用いた出力の際、造型品質が低下してしまう問題も報告されている[2]。こうした問題の原因である、待機中のプリントヘッドからフィラメントが溢れ出ることにより発生する汚れや、フィラメントの出力時の滲み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。

これらの問題は、スライサソフト上での品質設定や、フィラメントの出力量のパラメータ調節によってある程度解決可能である。本研究ではこれに加え、導電性フィラメントによって出力する縞模様パターンの「配線を極力細く」し、かつ「配線同士の間隔を極力広げる」ことで前述したような制約を満たすオブジェクトの出力を実現する。

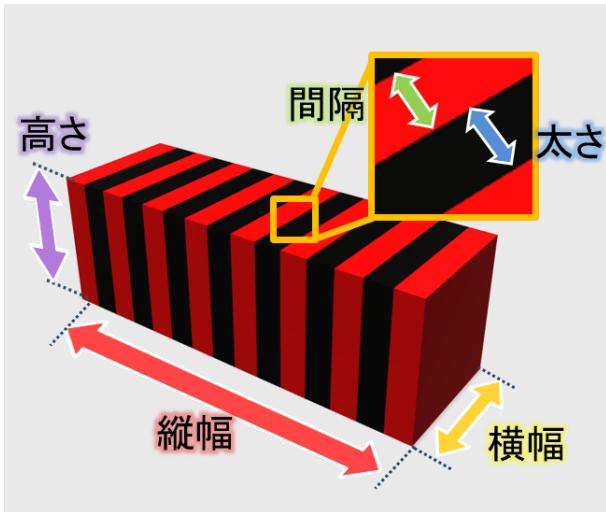


図 4 3D モデルの寸法の定義

4. 評価実験

3.3 節で述べた制約を満たすようなタンジブルインターフェースを出力するための評価を行った。以降オブジェクトの寸法を図 4 のように定義する。

4.1 実験概要

配線の太さを 0.5 mm と固定し、出力したインターフェースによるタッチ操作の認識精度を調査するための評価実験を行った。間隔を 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm の 4 種類、さらに高さによる認識率の違いを調査するため高さを 10.0 mm, 50.0 mm の 2 種類とし、それらを組み合わせた 8 種類のオブジェクトを使用した。そのほかオブジェクトの横幅は操作を行う人間の指先程度を想定し 10.0 mm、縦幅はスクロール操作が可能な長さとして 50.0 mm で固定とした。

タップ操作実験では、ディスプレイに貼りつけたオブジェクトの中心部を、20 回ずつタップ操作を行う。この際ディスプレイに認識されなかった回数をエラーとし、認識率を求める。

またスクロール操作実験では、ディスプレイに一定の速度で移動するバーを表示させる。このバーの位置を目安に、被験者はディスプレイに貼りつけたオブジェクト上でスクロール操作を行う。移動するバーが開始地点から終了地点に移動する間にタッチ入力が途切っていた時間をエラーとし、認識率を求める。試行回数は、各オブジェクトに対して 10 回とした。

被験者は 5 名で、全員がスマートフォンなどのタッチパネル端末の使用経験のある大学生および大学院生である。実験環境には、Microsoft Surface Pro 3 (解像度 2160 × 1440, 12 インチ) を用いた。実験では、オブジェクトの位置を固定するため幅 10.0 mm の両面テープ(ニチバン株式会社 NW-10, 厚さ 0.09 mm) を用いてディスプレイに貼り付けた。使用したフィラメントは、それぞれ直径 1.75 mm

の PLA ベース導電性素材 (Graphene 3D Lab 製) と非導電性 ABS 素材 (ポンサイラボ株式会社製) である。また使用した導電性フィラメントの体積抵抗率は $0.6 \Omega \cdot \text{cm}$ である。提案手法では 2 種類のフィラメントを出力可能な 3D プリンタが必要となるため、FDM 方式である 3D プリンタ BS01 + ABS/PLA モデル Dual 完成版^{*1} (ポンサイラボ株式会社製) を使用した。ホットエンド口径は 0.40 mm、最大造型サイズは幅 150 mm、奥行 130 mm、高さ 100 mm である。3D プリントするためのソフトウェアに Repetier-Host を用い、スライサソフトは Slic3r を用いた。なお、導電性、非導電性フィラメントの造型温度はそれぞれ 175 度、220 度とした。

4.2 結果

それぞれの実験結果を図 5 に示す。高さ 10.0 mm では、間隔 1.0 mm, 2.0 mm の場合 100 % の精度でタップ操作の認識に成功した。スクロール操作では、間隔 1.0 mm の場合 100 % の精度で認識し、間隔 2.00 mm のとき 90 % 以上の精度であった。また高さ 50.0 mm では両操作とともに、間隔 1.0 mm のとき 80 % を超える認識率であった。

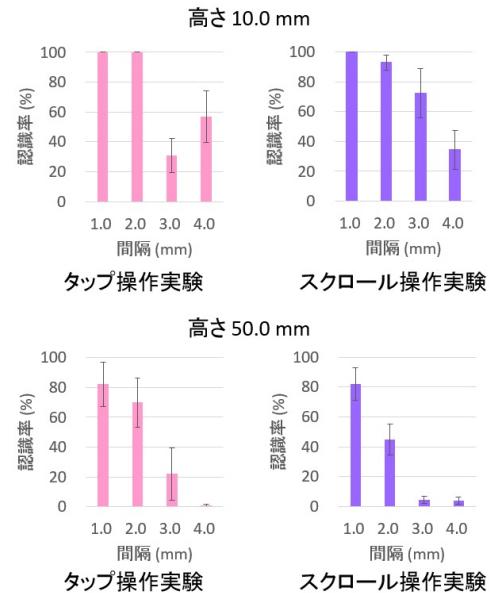


図 5 実験結果：高さ 10.0 mm (上), 高さ 50.0 mm (下)

4.3 考察

タップ、スクロール操作のいずれも、オブジェクトが高く間隔が広いほど認識精度は下がる傾向にあることが分かった。間隔 3.0, 4.0 mm の高さ 10.0 mm のオブジェクトや、間隔 1.0, 2.0 mm の高さ 50.0 mm のオブジェクトなどの認識率はばらつきが生じた。調査を行った太さ 0.5 mm では、間隔 1.0 mm のオブジェクトが最適である。
*1 <https://www.bonsailab.asia/dual.html> (2016 年 2 月確認)

た高さを 50.0 mm 以上に設定すると、さらに精度が下がることが想定されるため、今回とは異なる太さの検証を行う必要がある。

5. インタフェース作成例

評価実験結果をもとに、スクロールインタフェース、ダイヤルインタフェース、つまみインタフェースの 3 種類を試作した。

5.1 スクロールインタフェース

スクロールインタフェースは、オブジェクト表面の縞模様をスライドさせることで画面スクロールが可能になるインターフェースである。オブジェクトの上面だけでなく、側面でもスクロールすることができる。さらに評価実験で使用した直方体型だけでなく、縞模様が表面に露出するようなオブジェクトであれば、半円型（図 6 上）や三角型（図 6 下）のような様々な形状のインターフェースが作成可能である。

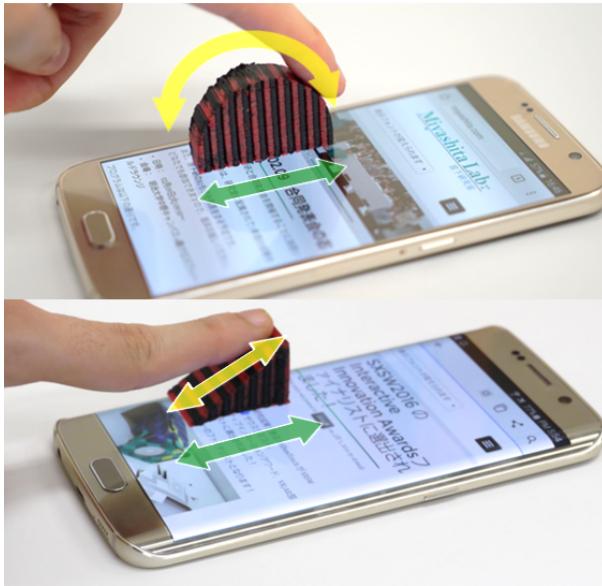


図 6 半円型（上）と三角型（下）のスクロールインタフェース

5.2 ダイヤルインタフェース

ダイヤルインタフェースは、ユーザの回転操作を画面スクロール操作に変換するインターフェースである（図 7）。円形に配置された複数の導電部から底面の縞模様へ、オブジェクト内部を通して配線を行う。内部の配線は表面に露出していないため、このインターフェースはタッチパネルの任意の箇所で使用可能である。

5.3 つまみインタフェース

つまみインタフェースは、つまみを回すような操作で画

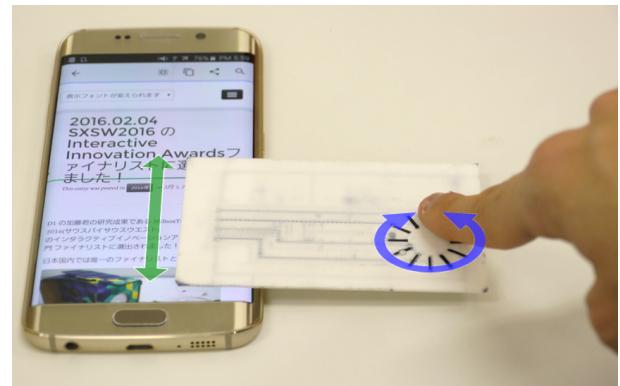


図 7 ダイヤルインタフェース

面スクロールが可能になるインターフェースである。CapWidgets[9] の操作手法では、つまみ型オブジェクト自体を動かすことでアプリケーションの操作を行っていた。提案手法を用いたインターフェースでは、オブジェクト上で操作が実現可能である。図 8 のインターフェースは、円柱の側面に配置された導電部から底面の縞模様へ、オブジェクト内部で配線を行っている。このインターフェースを音楽アプリケーションへ活用し、音量などを調整することができる。



図 8 つまみインタフェース

6. 展望

提案手法を用いて出力したいくつかのインターフェースの 3D モデルは、現在全て著者がモデリングを行っている。今後はユーザが簡単にインターフェースをデザインできるようなモデリングツールの実装を検討している。本稿第二著者らが提案した ExtensionSticker のデザインツール [13] や、Capricate[6] のモデリングツールは、内部の配線を自動で行うデザイン支援を提案している。これに加え、3.3 節で述べた制約を満たす最適な配線を行うシステムの実装を検討している。

また、3D プリンタを用いた提案手法を応用することで、触覚フィードバックのあるタンジブルインターフェースを作成することができる。これにより触覚でインターフェースの

識別を行うことも可能となる。

ほかにもタッチパネルデバイスに提案手法を用いたインターフェースを乗せると、その箇所の画面を見ることはできないという問題がある。今後は透明なフィラメントを用いてオブジェクトの出力を行うことや、Printed Optics[4]のように光ファイバでオブジェクト自体をタッチパネルディスプレイとして使用するなどが考えられる。

また CapWidgets [9] や紙窓 [14] のようなマルチタッチパターンを配置する手法も、提案手法を用いたオブジェクトに応用可能である。これによってインターフェースごとに異なる機能を、割り当てることも検討している。

7. おわりに

本稿では表面でのタッチ操作が可能なタンジブルインターフェースの3Dプリント手法を提案した。提案手法では、導電性と非導電性の2種類のフィラメントを用いてインターフェースを3Dプリントする。別々にモデリングを行った導電部と非導電部へフィラメント設定を施すことで、異なるマテリアルを用いた出力が可能である。オブジェクト内部に配線を行うことでタッチ操作だけでなく、ユーザの回転操作による画面スクロールなど、入力・出力操作の変換を可能とした。また表面に露出させる箇所をタッチパネルデバイスを操作するのに必要な箇所のみにすることができた。

これに加え、提案したタンジブルインターフェースの造型手法についての評価を行った。調査を行った太さ0.5mmでは、間隔1.0mmのオブジェクトが最適であった。またタップ、スクロール操作のいずれも、オブジェクトが高く間隔が広いほど認識精度は下がる傾向にあることが分かった。またその結果をもとに、複数のインターフェースの試作を行った。

従来のタンジブルインターフェースはタッチパネル上での位置や角度が検出できる。さらに本稿で提案したような「表面でのタッチ操作を発生できるオブジェクト」のプロトタイプにより、より多様なインタラクションを提供できるようになるはずである。

3Dプリンタで作品を作り出すことは、もはやプロだけができることではなくなりました。自分好みの色やデザインをすることで、オリジナルのものを簡単に出力できる。例えばスマートフォンの場合、多くのアプリケーションは右利きの人が操作を行うのに適したインターフェース設計がされている。左利きの人からすれば、不便で使いづらいインターフェースとなる。そこでスマートフォンカバーに提案手法を応用することで、ユーザが左端で操作を行うと、右端でデバイスを操作できるような、オリジナルのインターフェース作成することが可能となる。またカバー内部に配線を行うことができるため、外観に影響が出ることはない。3Dプリンタで自分だけのものが作れることと提案手法を応用

することで、オリジナルのインターフェース作成が簡単に行えるようになる。こうした作成支援のためにも、提案手法を用いた前提としたモデリングツールの開発を行なっている。

謝辞

本研究は、JST、COIの支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Alexander Wiethoff, Hanna Schneider, Michael Rohs, Andreas Butz, Saul Greenberg. Sketch-a-TUI: low cost prototyping of tangible interactions using cardboard and conductive ink, In *Proc. TEI'12*, pp.309-312, 2012.
- [2] Hergel, J. and Lefebvre, S. Clean color: Improving multi-filament 3D prints. Computer Graphics Forum, volume 33, pp. 469-478, 2014.
- [3] Jun Rekimoto. SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, In *Proc. CHI'02*, pp.113-120, 2002.
- [4] Karl D.D. Willis, Eric Brockmeyer, Scott E. Hudson, Ivan Poupyrev. Printed Optics: 3D Printing of Embedded Optical Elements, In *Proc. UIST'12*, pp.589-598, 2012.
- [5] Liwei Chun, Stefanie Muller, Anne Roudaut, Patrick Baudisch. CapStones and ZebraWidgets: Sensing Stacks of Building Blocks, Dials and Sliders on Capacitive Touch Screens, In *Proc. CHI'12*, pp.2189-2192, 2012.
- [6] Martin Schmitz, Mohammadreza Khalilbeigi, Matthias Balwierz, Roman Lissermann, Max Mühlhäuser, Jürgen Steimle. Capricate: A Fabrication Pipeline to Design and 3D Print Capacitive Touch Sensors for Interactive Objects, In *Proc. UIST'15*, pp.253-258, 2015.
- [7] Rong-Hao Liang, Liwei Chan, Hung-Yu Tseng, Han-Chih Kuo, Da-Yuan Huang, De-Nian Yang, Bing-Yu Chen. GaussBricks: Magnetic Building Blocks for Constructive Tangible Interactions on Portable Displays, In *Proc. CHI'14*, pp.3153-3161, 2014.
- [8] Shaun K. Kane, Meredith Ringel Morris, Jacob O. Wobbrock. Touchplates: low-cost tactile overlays for visually impaired touch screen users, In *Proc. ASSETS'13*, pp.22:1-8, 2013.
- [9] Sven Kratz, Tilo Westermann, Michael Rohs, Georg Essl. CapWidgets: Tangible Widgets versus Multi-Touch Controls on Mobile Devices, In *Proc. CHI'11*, pp.1351-1356, 2011.
- [10] Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic, Jean-Daniel Fekete. Tangible Remote Controllers for Wall-Size Displays, In *Proc. CHI'12*, pp.2865-2874, 2012.
- [11] 上野 新葉, 加藤 邦拓, 宮下 芳明. オブジェクト上でのタッチ操作を実現するタンジブルインターフェース, インタラクション 2016 論文集, 2016.
- [12] 加藤 邦拓, 宮下 芳明. 導電性インク複合機を用いたマルチタッチパターン生成手法, 情報処理学会研究報告 HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告 HCI-157, pp.1-6, 2014.
- [13] 加藤 邦拓, 秋山 耀, 宮下 芳明. タッチ入力の柔軟な再配置を可能としたインターフェースの作成支援, 第22回インタラクティビティシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2014) 論文集, pp.151-152, 2014.
- [14] 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ーフェース, ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol.17, No.3, pp.245-254, 2015.

- [15] 加藤 邦拓, 宮下 芳明. ExtensionSticker: タッチパネルを拡張するインターフェース, ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol.18, No.1, 2016.
- [16] 高田 嶽介, 志築 文太郎, 田中 二郎. MonoTouch : 複数ジェスチャ判別が可能な単一電極タッチセンサ, 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 (WISS 2015) 論文集, pp.91-96, 2015.
- [17] 吉田 有花, 志築 文太郎, 田中 二郎. Capacitive Blocks: 静電容量に基づくブロックシステム, 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 (WISS 2015) 論文集, pp.1-6, 2015.