

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

上野 新葉^{†1} 加藤 邦拓^{†2} 宮下 芳明^{†1,†2}

概要：本研究では、オブジェクト上でのタッチ入力を可能とするタンジブルインターフェースを提案する。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使用し、3Dプリンタによって縞模様状の導電部を持つオブジェクトを出力する。既存研究ExtensionStickerの手法により、オブジェクト上でのタップ、スクロール、スワイプ、回転操作など様々な入力を可能とする。また、従来のタッチパネル上で使用するタンジブルインターフェースのような、複数の導電部を介してマルチタッチを発生させる手法と併用することで、様々なインターフェースを実現できる。今回、市販されているタッチパネルデバイス上で使用するための条件についての簡単な調査を行い、それにもとづいた2種類のインターフェースを試作した。

A Tangible User Interface that Can Realize Touch Operations on the Physical Object

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

Abstract: In this paper, we propose a tangible user interface that can realize touch operations on the physical object. We printed physical object that have conductive striped patterns by multi-material 3D printing with conductive and non-conductive ABS materials. Using ExtensionSticker's method allows the user to generate a variety of touch operations such as tap, scroll, swipe and rotation on the physical object. Furthermore, using with a method that generate multi-touch inputs allow to realize a variety of tangible user interfaces. We tested to examine conditions to use our method on the touch panel devices.

1. はじめに

今日、スマートフォンやタブレット端末など、数多くの静電容量式タッチパネルを搭載したデバイスが普及している。これらのデバイスはマルチタッチ入力を可能とし、ディスプレイ内のインターフェースを直接手で触れることで、より直感的で分かりやすい入力を実現している。本稿第二著者らは、これまでにこうした静電容量式タッチパネルデバイスの入力インターフェースを拡張する手法として、ExtensionStickerを提案してきた[15]。ExtensionSticker

は導電性インクによって縞模様状のパターンを印刷したシートである。印刷された複数の導電性の線を指で触ることで、タッチ入力を発生させることができる。これにより特定箇所におけるタッチ入力だけでなく、スクロール操作のような連続的なタッチ入力を実現した。

本研究ではExtensionStickerの手法を応用し、オブジェクト上でのタッチ入力を可能とするタンジブルユーザインターフェースを提案する。提案手法では3Dプリンタによって導電性の縞模様パターンを持つオブジェクトを出力することで、タンジブルインターフェースを作成する。これにより既存研究で提案されているタンジブルインターフェース[4], [6], [8]のような、オブジェクトの位置や向きの認識だけでなく、インターフェース上でのタップ、スクロール、スワイプ、回転など様々な操作を可能とする。また、オブジェクト内部の導電性フィラメントの配線を工夫すること

^{†1} 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, Meiji University

^{†2} 明治大学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

で ExtensionSticker で提案したようなタッチ入力の拡張も実現することができる。オブジェクトの出力に 3D プリンタを活用することで、従来の ExtensionSticker で実現した事例に加え、より幅の広いインタラクションへの応用が実現できる。

今回、提案手法によるインターフェースが市販のタッチパネルデバイス上で動作することを示すため、異なる導電部の太さ・間隔、オブジェクトの高さのオブジェクトを出力し簡単な調査を行った。また、得られた結果をもとに、2 種類のタンジブルインターフェースを試作した。

2. 提案手法

本研究では導電性フィラメントと非導電性フィラメントを縞模様状に 3D プリントすることで、出力したオブジェクトを介しタッチ入力を発生させる手法を提案する。ユーザがタッチパネル上に置いたオブジェクトに触れるとき、その下部においてタッチ入力を発生させることができる。オブジェクトの上面（図 1 左上）や側面（図 1 左下）などの表面上で縞模様が露出していれば、任意の箇所でタッチ操作を行える。更に、縞模様上で指をスライドさせるように触ることで、スクロール操作のような連続タッチ入力を可能とした（図 1 右上、右下）。

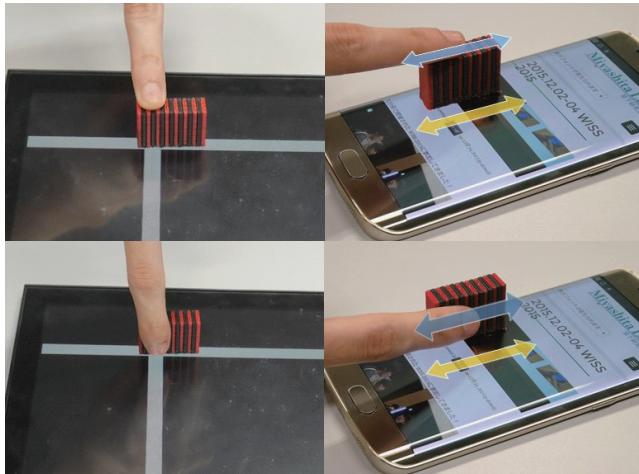


図 1 上面操作によるタッチ入力（左上）、上面操作による連続タッチ入力（右上）、側面操作によるタッチ入力（左下）、側面操作による連続タッチ入力（右下）

2.1 ExtensionSticker 技術の利用

提案手法では既存研究である 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 は導電性インクを用いて縞模様状のパターンを印刷したシートであり、タッチパネルディスプレイ上に貼り付けて使用する。ExtensionSticker の手法ではインクジェットプリンタによって印刷された、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

を発生させる。ユーザが ExtensionSticker 上で指をスライドさせる動作をすることで、指と接触している線が順にずれていく。これにより、発生させたタッチ入力を途切れさせることなく連続的なタッチ入力が実現する（図 2）。

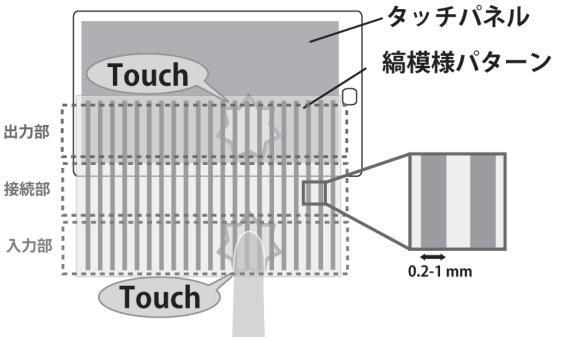


図 2 ExtensionSticker 原理（文献 [15] 図 2 より引用）

2.2 制作環境

本研究で使用したフィラメントは、それぞれ直径 1.75 mm の導電性 ABS フィラメント（株式会社ミジンコ製）と非導電性 ABS フィラメント（ボンサイラボ株式会社製）である。使用した導電性 ABS フィラメントの表面抵抗率は $1.00 \times 10^3 \sim 10^5 \Omega$ 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}（ボ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，最大造形サイズは幅 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、スライサー 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形温度はともに 230 度とした。図 1 のオブジェクト（高さ 20.0 mm）の場合、造形時間は 34 分 31 秒、フィラメント使用量は 2484 mm である。また出力オブジェクトの密度は 100 % とした。

2.3 形状

導電性の箇所と非導電性の箇所による、縞模様状のパターンを持つ 3D モデルを作成するため、フィラメントごとにモデリングを行う（図 3 左上、左下）。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同時に種類の異なるフィラメントで 3D プリントできる。

提案手法を用いた、オブジェクト上での操作によるタッチ入力の認識精度を調査するため、複数のタンジブルインターフェースの試作を行った。今回調査に使用するプロトタイプでは、ExtensionSticker で示されている条件をもとに出力を行った。以下、モデルの寸法に関する呼称を図 3 右の

^{*1} <https://www.bonsailab.asia/dual.html> (2015 年 12 月確認)

ように定義する。縞模様状に出力する導電性フィラメントの太さとそれら同士の間隔は、ともに 1.0 mm と設定した。これに加え、今回使用した導電性フィラメントは抵抗値が非常に高いことから、縞模様の太さを ExtensionSticker で示されている値より太くしてもタッチ入力を発生させられる、という仮説をたてた。そこで幅と間隔を 2.0 mm にしたものも用意し、それぞれについて検証を行う。

また、ExtensionSticker では、印刷する縞模様パターンの距離が長くなるにつれ、タッチ認識精度が下がることを報告している。そこで、タッチ入力を発生可能な距離（オブジェクトの高さ）についての調査を行うため、10.0 mm から 50.0 mm (5.0 mm 刻み) までの高さを持つオブジェクトを出力した。また出力するオブジェクトの横幅の寸法は、タッチする指 1 本分として 10.0 mm に設定し、縦幅の寸法は連続タッチ入力も可能な 30.0 mm で固定とした。結果、太さ及び間隔が 1.0 mm, 2.0 mm のいずれも場合でも高さが 30.0 mm 以下であれば安定してタッチ認識に成功した。

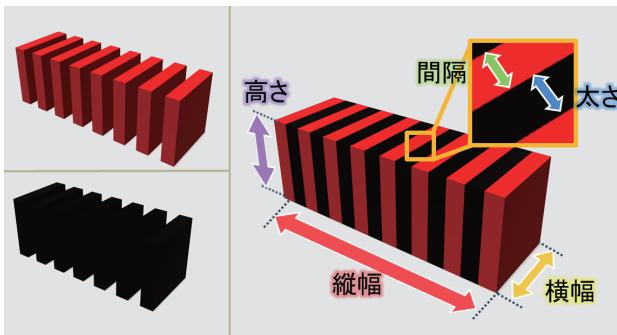


図 3 3D モデル：非導電部（左上）、導電部（左下）、寸法の定義（右）

3. オブジェクト上でのタッチ入力を可能とするタンジブルインタフェース

提案手法による縞模様パターンを持つ、タンジブルインタフェースを実装した。本手法では 3D プリンタによってインタフェースの出力を実現している（図 4）。そのため、ユーザのタッチ入力部とディスプレイ上でタッチ入力を発生させる箇所を接続する配線をオブジェクト内部に埋め込むことができるという特徴がある。従来の ExtensionSticker の手法では、全ての導電部が同一平面上に存在するため、タッチパネルディスプレイの端でしか使用できないという制約があった。提案手法によってタッチ入力を発生させるために必要な箇所のみをオブジェクト表面に露出させることができるために、タッチパネル上の任意の箇所で使用することができる。

また、ExtensionSticker と同様に、導電部の位置や形状、オブジェクト内部の導電部の配線を工夫することで、様々な操作方法を実現できる。図 5 は、ダイヤルインタフェース

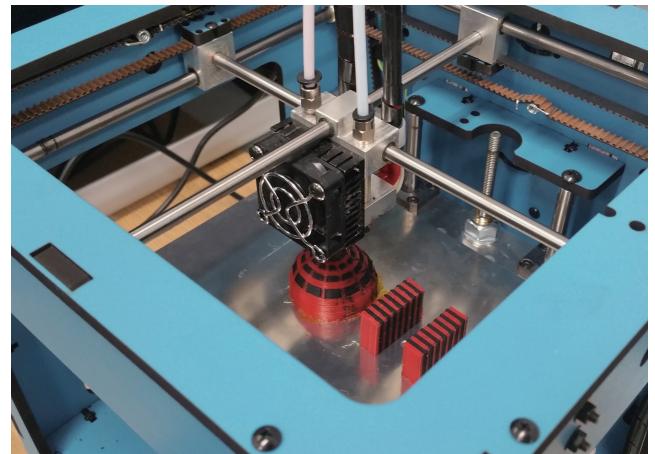


図 4 提案手法を用いたタンジブルインタフェースの出力

スを出力した例である。オブジェクト表面には円形に配置された複数の導電部を持つ。これらはオブジェクトの内部を通し、底面に配置された縞模様パターンの導電部に接続されている。これにより、オブジェクト表面上におけるユーザの回転操作をタッチパネル上のスクロール操作に変換することができる。

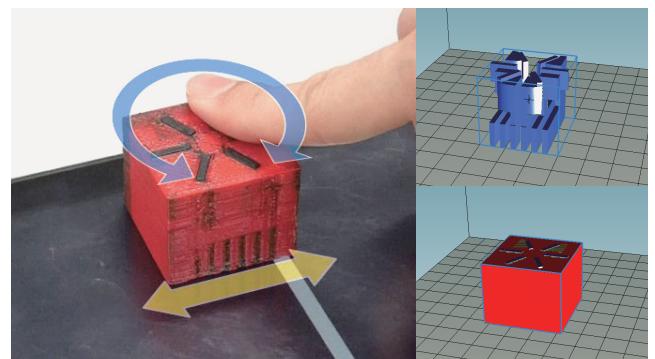


図 5 ダイヤルインタフェース外観。円形に配置された複数の導電部がオブジェクト内部を通して、底面の縞模様に接続される。

4. インタフェース作成例

図 6 a は、提案手法によって出力したオブジェクトを複数用いることでタンジブルインタフェースを実現した例である。円形状に複数配置することで、任意方向へのピンチ操作を実現することができる。

また提案手法によって出力したオブジェクトに対し Cap-Widgets [8] のように複数の導電部を配置する手法を併用することで、タッチパネル上でオブジェクト自体の位置・向きを認識可能なタンジブルインタフェースが実現する（図 6 b）。このオブジェクト表面は導電性フィラメントによって覆われており、内部を通してオブジェクト底面のマルチタッチパターンと接続される。このマルチタッチパターンの形状を変えることで、オブジェクトの識別も可能となる。キャラクタの形状をしたオブジェクトを出力することで、

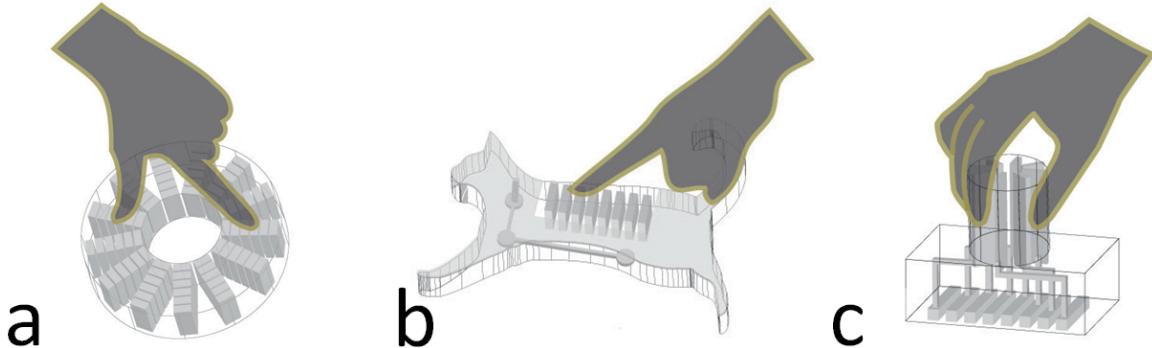


図 6 アプリケーション例: (a) ピンチ操作インタフェース, (b) マルチタッチパターンを併用したインタフェース, (c) つまみインタフェース

インタラクティブな玩具への応用などが考えられる。

図 6 c は図 5 に示したダイヤルインタフェースを応用し、つまみ型のインタフェースを実現した例である。円柱状のオブジェクト内部には導電部が円形に配置されており、これらの一端が円柱の側面上で露出されている。これらの導電部はオブジェクト内部を通し、底面部の縞模様パターンに接続されている。ユーザがこの円柱部側面をつまむことで底面部に接続された縞模様パターンが接地され、タッチ入力を発生させる。同様に静電容量式タッチパネル上につまみ型の物理インタフェースを実現する手法もこれまでに提案されているが、提案手法とは原理が根本的に異なっている [9], [11]。アプリケーション例としては、オーディオインターフェースなどへの応用が考えられる。マルチタッチパターンの配置によってオブジェクトの識別を行えば、タッチパネル上の任意箇所にユーザの好きなインターフェースを配置可能なオリジナルのシンセサイザなどが実現できる。

5. 関連研究

5.1 タッチパネル上で使用する物理オブジェクト

今日普及しているスマートフォンやタブレット端末などタッチパネルを搭載したデバイスの多くは、この静電容量式タッチセンサが採用されている。静電容量式タッチパネルの基本原理や、それを活用したインタラクションは SmartSkin にて提案された [2]。この手法では、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。SmartSkin の提案以降、この手法を用いることで物理的なオブジェクトを認識し、インターフェースとして使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 [8]。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。また、AppMATEs^{*2} のように既に製品として販売されているものもある。本研究で提案する手法では、こうしたオブジェクト自体を動かす操作に加え、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手法を実現している。

また、複数の導電部の距離や位置関係をタッチパネル上で認識させることで、オブジェクトの識別を行う手法も提案されている [6]。TUIC では 3 種類のオブジェクト識別手法が提案されている。複数の導電部を配置したパターンによる識別、特定の箇所に一定の周期でタッチ入力を与え続ける回路を実装しその周波数の違いによって認識する手法、これら 2 つを組み合わせた手法を実現している。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 [4]。ブロック状の物理オブジェクトを重ねることで、異なる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。また、本稿第二著者らの提案した紙窓では、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。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 [14]。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 [13]。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]。本研究で提案するタンジブルインターフェースはこうした、複数の導電部によるオブジェクトの識別や位置・向きの認識手法を併用することも可能である。

物理オブジェクトを活用したインタラクションに関する研究として、くるみるでは内側に穴を持つ杵型の物理オブジェクトを用いたインターフェーションを提案している [10]。

^{*2} www.appmatestoys.com (2015 年 12 月確認)

内側に穴の空いた枠型オブジェクトをタブレット端末に上に乗せ、枠の内側に表示された情報を閲覧しながらアプリケーションの操作を行う手法を提案している。くるみるの使用例として、枠型オブジェクトで囲むことによるディスプレイ上の情報選択や、オブジェクトを回す操作による画像の拡大・縮小操作など行っている。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を用いた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 [9]。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。

静電容量式タッチセンサは、一般的に接地された物体の接触によってタッチ位置を検出している。導電部を配置した物理オブジェクトをただタッチパネル上に置いただけではタッチ認識に必要な静電容量の変化を起こすことができない。そのため、ここまでに挙げた研究の殆どはユーザ自身がオブジェクトの導電部に触れたまま使用することを前提としている。この問題を解決する手法として、PUCs ではユーザがインターフェースの導電部に直接触れずとも、オブジェクトの位置をタッチパネル上で認識させる手法を提案している [17]。PUCs 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使用している。タッチパネル内部に格子状に配置されている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。

5.2 タッチ操作を可能とする物理オブジェクト

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]。磁力によって複数のオブジェクトを組み合わせることで、様々な形状のインターフェースを実現している。GaussBricks の応用例の 1 つとして、オブジェクト上での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。前節で述べた手法と同じく複数の導電部を持ち、ユーザはこの導電部上をタッチすることでタッチパネル上でのタッチ入力を発生させている。GaussBricks の論文内では、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を示している。GaussBricks ではオブジェクト上でのなでる操作を行っているが、これは前節で述べたような、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、本稿では 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。また、Ficon では光ファイバの束を用いたオブジェ

クトによって、ディスプレイとしての役割も果たすタンジブルデバイスを提案している [16]。赤外線カメラによってデバイスの識別や、位置の認識を行っている。また、ペン先に赤外線 LED を持つポインティング用のペンを用いることで、ユーザの指を用いた直接タッチではないが、物理オブジェクト上からの入力を実現している。

5.3 3D プリンタによるオブジェクトの出力

Capricate 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。導電性フィラメントと非導電性の ABS 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 [5]。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。同様に 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を出力している。このブロックの静電容量を計測することで、ブロックの積み重ねを認識している [18]。Printed Optics は、3D プリンタによって出力した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 [3]。Ficon と同様に、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を果たす。また、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。

6. まとめと今後の課題

本稿では、オブジェクト上でのタッチ入力を可能とするタンジブルインターフェースを提案した。導電性、及び非導電性の 2 種類のフィラメントを 3D プリンタによって縞模様状のパターンを持つオブジェクトを出力する。既存研究 ExtensionSticker の手法を利用することで、オブジェクト上でのタッチ、スクロール、スワイプなどの様々な入力を可能とした。従来の静電容量式タッチパネル上で使用するタンジブルインターフェースのような、マルチタッチパターンと併用することも可能とし、より幅の広いインタラクションが実現できる。また、市販のタッチパネルデバイスでの動作を確認するため、縞模様パターンの出力に使用する導電部の太さ、間隔、オブジェクトの高さについて簡単な調査を行った。その結果、オブジェクトの高さ 30.0 mm 以下であれば安定してタッチ入力ができる事を示した。今後、提案手法によってタッチ入力を安定して発生させるために最適なパラメータを調査するためのより詳細な定量的評価を行う。

また、現在提案手法によるタンジブルインターフェースは全て著者がモデリングを行っている。今後はこうしたインターフェースをデザインするためのモデリングツールの実装も検討する。本稿第二著者らが提案した ExtensionSticker

のデザインツール [12] や、Capricate [5] で提案されたモデリングツールのように、インターフェースの始点と終点を設定し、内部の配線を自動で行うシステムを検討している。

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. of TEI'12*, pp.309-312, 2012.
- [2] Jun Rekimoto. SmartSkin: An Infrastructure for Free-hand Manipulation on Interactive Surfaces, In *Proc. CHI'02*, pp.113-120, 2002.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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, Yi-Ping. TUIC: Enabling Tangible Interaction on Capacitive Multi-touch Display, In *Proc. CHI'11*, pp.2995-3004, 2011.
- [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] 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.
- [9] Yvonne Jansen, Pierre Dragicevic, Jean-Daniel Fekete. Tangible Remote Controllers for Wall-Size Displays, In *Proc. CHI'12*, pp.2865-2847, 2012.
- [10] 青木 良輔, 宮下 広夢, 井原 雅行, 大野 健彦, 千明 裕, 小林 稔, 鏡 慎吾. くるみる: 複数導電部をもつ枠型物理オブジェクトを用いたタブレット操作, 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-144, pp.1-8, 2011.
- [11] 岩島 伊織, 赤羽 亨, 小林 茂, 鈴木 宣也. タッチパネル上にのせる触知認知可能なコントロールインターフェースの提案とプロトタイプ「つかみどころ」の制作, インタラクション 2012 論文集, pp.989-993, 2012.
- [12] 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. WISS 2014, 第 22 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 2014) 論文集, pp.151-152, 2014.
- [13] 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.
- [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. (印刷中)
- [16] 高田 悠太, 中林 隆介, 福地 健太郎. Ficon: 立体映像表示が可能なタンジブルデバイスの提案, インタラクション 2014 論文集, pp.100-107, 2014.
- [17] 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ェット検出手法, 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.1, pp.329-337, 2015.
- [18] 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.