

# Ohmic-Touch: 静電容量方式タッチサーフェス上における オブジェクトを介したインタラクション手法

池松 香<sup>\*†</sup> 椎尾 一郎<sup>\*</sup>

**概要.** 市販されている静電容量方式のタッチサーフェスの多くは、タッチ/非タッチの離散的な段階のみをタッチ入力の状態として識別する。これに対し我々はタッチ入力の状態を連続的に扱い、インタラクションする手法を提案する。指などの接地された導電体とタッチサーフェスとの間に何らかのオブジェクトを介在させると、直接タッチと比較してタッチサーフェスが計測するインピーダンス値が変化する。提案手法は、介在させるオブジェクトの電気的特性（抵抗率・誘電率）を利用し、オブジェクトの厚みおよびオブジェクト上のタッチ位置識別、さらには光や圧力のセンシングを可能とする。本論文では提案手法の実現可能性を調査し、その結果をもとにタッチ入力のモダリティ拡張のための試作アプリケーションについて報告する。

## 1 はじめに

トラックパッド、スマートフォン、タブレット PC など、静電容量方式のタッチ入力機器（以下、タッチサーフェス）が広く普及し、もっとも一般的な指示装置となった。こうした市販のタッチサーフェスの多くは、指先やタッチペンによるタッチ/非タッチのみ、あるいはこれにホバー（近接）を加えた離散的な段階をタッチ入力の状態として識別する。

一方、タッチサーフェスの上にタンジブルなオブジェクトを乗せることで、タッチ入力のモダリティを拡張する研究は隆盛を見せている [2, 10, 3]。こうした手法は、オブジェクト底面に導電性素材の複数タッチ点からなるタッチパターンを設置し、タッチパターンと電気的に接続されたオブジェクトの導電部にユーザが触れることで、オブジェクトを介したタッチサーフェスへのタッチ入力を可能とする。さらに固有のタッチパターンにより、座標だけでなく各オブジェクトの識別や回転角の取得を行える。しかし、これらの手法においてもタッチパターンを構成する底面タッチ点のタッチ/非タッチの 2 状態のみを利用しており、依然として離散的な入力モダリティに限定されている。

本論文では、静電容量方式のタッチサーフェスを利用したインタラクション手法として、インピーダンス値が変化するオブジェクトを介した間接タッチ、“Ohmic-Touch”を提案する。これにより従来は離散的に用いられてきたタッチ入力の状態を連続的に拡張することを目指す。一般に普及している静電容量方式のタッチサーフェスでは、人間の指などの接地された導電体の接触/近接によりタッチを検出する。タッチサーフェスと接地された導電体との間に

オブジェクトを介在させると、タッチサーフェスが計測するインピーダンスの値が変化する。提案手法はこの原理を応用し、介在させるオブジェクトの電気的特性（抵抗率・誘電率）から、オブジェクトの厚みやタッチ位置の識別を可能にする。また、パッシブな電気抵抗部品（抵抗器、可変抵抗器、感圧・温度・光・曲げセンサ）をオブジェクトに組み込むことで、より豊富なインタラクションを無電源で提供する。このようにパッシブなオブジェクトのみを用いて、従来のタッチ入力に新たなモダリティを付加することを可能とする。本論文では、提案手法が市販のタッチサーフェス上で実行可能であることを予備調査にて確認し、提案手法を用いたアプリケーションについて報告する。

## 2 Ohmic-Touch

本節では一般的な静電容量方式（相互容量方式）タッチサーフェスにおけるタッチの検出原理を述べ、その上で提案手法の動作原理を説明する。

### 2.1 タッチ検出原理

タッチサーフェスは、透明な線形電極を格子状に並べた構造を有している。一方が送信電極群であり、他方はこれらと直交する受信電極群である。タッチサーフェスは微量の高周波信号を送信電極に順番に流し、受信電極でこれを受信する。送信電極と受信電極の一对が交差する部分における等価回路を図 1 (a) に示す。 $T_x$  は送信電極、 $R_x$  は受信電極を示す。 $Z_n$  で示すブロックはタッチサーフェス周囲にある物質のインピーダンスであり、図 1 に示すような抵抗とコンデンサからなる等価回路として表現できる。 $T_x$  と  $R_x$  は、 $Z_4$  と  $Z_3$  を経由して接地されると共に、 $Z_0$  により相互に接続している。

電極交点に指などの接地された導電体がタッチしていない状態では、 $T_x$  と  $R_x$  の電気的結合は  $Z_0$  のみであり、 $T_x$  から  $R_x$  へ、 $Z_0$  を介して信号が伝達

Copyright is held by the author(s).

\* お茶の水女子大学大学院

† 日本学術振興会

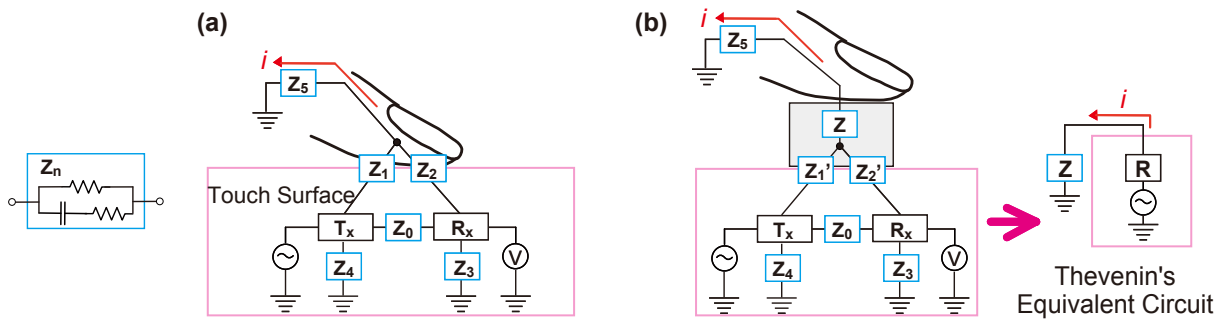


図 1. (a) 静電容量方式タッチサーフェスの等価回路, (b) オブジェクトを挿入した際の等価回路.

される. 次に, この交点に指がタッチすると, タッチサーフェス表面ガラスと指の表面などを經由して,  $Z_1$  と  $Z_2$  で  $T_x$  と  $R_x$  が接続される. それと同時に, 人体などのインピーダンス  $Z_5$  を經由して接地される. これにより,  $T_x$  からの信号の一部  $i$  がグラウンドへと流出し,  $R_x$  にて検出される信号は減衰する. タッチサーフェスのドライバは, この減衰量が一定の閾値を上回るか否かにより, タッチ/非タッチの状態を判別している. 現在市販されている主要なタッチサーフェスにおいては, 各電極の幅は 5mm 前後である [14]. そのため, 人の指先など, 電極幅より大きい導電体が近接した場合は, 1つ以上の電極の交点における信号の変化が生じることから, タッチサーフェスと導電体との接触面積に対しても閾値を設ける場合が多い.

## 2.2 オブジェクトのインピーダンス推定

タッチ部分から接地へ至るインピーダンスが変化すると, グラウンドへ流出する信号  $i$  はそれに伴い変化する. そのため, タッチサーフェスと接地された導電体との間にオブジェクトを介在させると, 通常のタッチと比べて検出信号が変化する (図 1 (b)). さらに, 介在させるオブジェクトの電気的特性 (誘電率・抵抗率) により信号の値は異なる. 一般に, 起電力を有する要素と抵抗を組み合わせた任意の回路はテブナンの定理の等価回路 [11] へ置き換えることが可能であり, 起電力に内部抵抗が直列に接続された回路へと単純化できる. そこで, 起電力  $E$ , 内部抵抗  $R$  の電源にインピーダンス  $Z$  の負荷が接続されていると考えると,  $i$  は下記のように表現できる.

$$i = \frac{E}{(R + Z)} \quad (1)$$

グラウンドへ流出する信号と相関関係にある値 (以下, 流出信号とする) を取得するメカニズムは, OS X や Android などにて利用可能であり, インピーダンスの容量成分を計測する目的で HCI 研究分野で広く用いられている [12, 5]. 提案手法においても同様に, 市販のタッチサーフェス内蔵のメカニズムを用いる.

## 2.3 Ohmic-Touch 動作原理

本論文においては, インピーダンス  $Z$  を変化させるため, 静電容量成分 (コンデンサ容量) を主に変

えるアプローチと, 電気抵抗成分 (抵抗値) を主に変えるアプローチを行なった. 前者の静電容量を変えるアプローチでは, 指やタッチペンとタッチサーフェスとの間に紙やプラスチックの絶縁体オブジェクトを介在させた. 静電容量はオブジェクトの誘電率に比例し, 電極間 (ここでは指・タッチペンなどの導電体とタッチサーフェスの透明電極) の距離に反比例する. すなわち, オブジェクトの厚みおよび誘電率に応じてインピーダンス  $Z$  が変化する. これにより, オブジェクトが介在しているか否かおよび, その厚みを推定することが可能となる.

一方, 後者の抵抗値を変えるアプローチでは, 導電性素材により作成したオブジェクトや, 電子部品で作成した抵抗回路を介在させた. 特定の電気抵抗分布をもつオブジェクトの作成は, 3D プリントにて導電性フィラメントを用いる [7], インクジェットプリンタにて導電性のインクを用いる [4] など, 近年のファブリケーションツールの発展により比較的容易に行えるようになった. こうした導電性素材のオブジェクトを介してタッチサーフェスへのタッチ入力を行った場合, 抵抗値はタッチサーフェスからタッチ位置までの距離に比例するため,  $Z$  からタッチ位置を推定することが可能である. また, 抵抗値は電子部品で容易に設定できることに加え, センサ結果を抵抗値で返す安価で安定したセンサ部品も多数存在する. 市販の抵抗器, 可変抵抗器, 感圧・温度・光・曲げセンサなどを利用したインタラクションが実現可能である.

## 3 予備調査

介在させるオブジェクトの電気的特性およびタッチサーフェス上のタッチ位置による, インピーダンスの変化を確認するための予備調査を行った. 調査には被験者 8 名 (22-67 歳, 男性 3 名, 女性 5 名, 全員が日常的にタッチサーフェスを利用) に参加してもらった. 実験器具として 13-inch MacBook Pro (OS X 10.11, タッチサーフェス: 105mm × 75mm) および, ディスク付きタッチペン (Adonit Jot Pro 2.0, ディスク直径: 6mm, ペン先のディスクから末端までの抵抗値  $10\Omega$  程度) を用いた. また, OS X 10.11 上で動作する調査用アプリケーションを C++, openFrameworks および Multitouch-

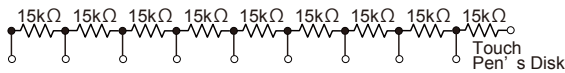


図 2. 予備調査に用いたタッチペンの回路図. 9 個の抵抗 (15kΩ) とペン先が接続されている.

Support.framework により実装した. 本アプリケーションを用いてタッチサーフェス上のタッチ位置・流出電流 (MultitouchSupport.framework の size プロパティより取得) を記録した. 被験者は 26–28 °C の屋内にて靴を脱ぎ, 着席した状態で AC アダプタに接続された MacBook Pro を用い, 下記に記す一連のタスクを実施した.

### 3.1 絶縁体厚さに対する流出電流

オブジェクトの静電容量変化に対する流出電流を調査した. オブジェクトの素材には, 入手しやすく厚さをコントロールしやすい絶縁体として, 紙 (コピー用紙, 比誘電率 2.5) と ABS (acrylonitrile butadiene styrene, 比誘電率 4.0) を選定した. ABS は 3D プリンタのフィラメントとして用いられるため様々な形状への加工が容易である. これらを 100mm × 71mm に切断し, 厚さ 0.3–3.0mm までの 0.3mm 刻みのオブジェクトをそれぞれ作成した. この際, 紙は 0.1mm, ABS は 0.3mm の厚みのものを束ねて固定し, 任意の厚さのオブジェクトを作成した. 被験者は, タッチサーフェス上へ薄いものから順にオブジェクトを一つずつ乗せ, タッチペンによりオブジェクト上の中央部へタッチする操作を各素材, 厚みに対して 3 回ずつ行った. タッチ開始/終了時のタッチペンの近接状態のデータを除外するため, 1 回のタッチは 7 秒間継続してもらい, タッチ開始 1 秒後から 6 秒後までの 5 秒間を記録した. 総試行回数は, 2 (素材) × 10 (厚み) × 3 (タッチ回数) × 8 (被験者) = 480 (試行) となる.

### 3.2 抵抗値に対する流出電流

次に, オブジェクトの抵抗値変化に対する流出電流を調査した. 図 2 のように, 直列に接続した抵抗 (抵抗値 15kΩ) をペン先部分と導線で接続したタッチペン型のオブジェクトを作成した. このオブジェクトは, 抵抗同士を接続する導線部分がそれぞれタッチ箇所になっており, ペン先に近いタッチ箇所から順に, オブジェクトの抵抗値は 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135kΩ と線形的に変化する. 被験

者は, ペン先に近いタッチ箇所から順に, 指をタッチ箇所へ接触させつつタッチサーフェス中央部にペン先でタッチした. 前実験と同様に, タッチ開始 1 秒後から 6 秒後までの 5 秒間を記録した. 総試行回数は, 9 (抵抗値種類) × 3 (タッチ回数) × 8 (被験者) = 216 (試行) となる.

### 3.3 タッチ位置の影響

タッチ位置による電流計測への影響を調査した. タッチサーフェスの領域を横 10 × 縦 7 分割し, 分割した各領域の中央部へタッチペンによりタッチした. 前実験と同様に, タッチ開始 1 秒後から 6 秒後までの 5 秒間を記録した. 総試行回数は, 70 (領域) × 10 (タッチ回数) = 700 (試行) となる.

### 3.4 結果と考察

図 3 (a) に絶縁体厚さに対する流出電流を, (b) に抵抗値に対する流出電流の測定結果の平均値をエラーバー (標準偏差) と共に示す. これらのグラフの横軸は, 図 1 におけるインピーダンス  $Z_5$  に相当し, 縦軸はそれに流れる電流  $i$  に比例する値である. 図 3 (a, b) に示したグラフは, 実験結果を式 1 へ当てはめた曲線である.  $Z = 0$  のときに最大電流  $i = \frac{E}{R}$  を取り出すことができる一方,  $Z = R$  の時には最大電流の半分に低下するため,  $0\Omega$  から内部抵抗値程度が  $Z$  の測定範囲の目安になるであろう.

絶縁体厚さに対する流出電流の計測結果について述べる. 紙は 2.1mm (21 枚) まで, ABS は 2.4mm (8 枚) まで, タッチ時の流出電流が取得可能だった (図 3 (a)). それ以上の厚さの場合, 流出電流が微弱すぎるため検出されなかった. 上記の曲線当てはめの結果から等価回路の内部抵抗値  $R$  は, 厚さ 0.75mm の紙, 0.80mm の ABS に相当するインピーダンスであることがわかった. 実測の誤差については, 紙・ABS ともに 0.6mm (紙: 6 枚, ABS: 2 枚) の厚みで 0.02mm, 0.9mm (紙: 9 枚, ABS: 3 枚) の厚みで 0.04mm であった. この誤差は, 厚みに対して 4% 程度の値であるため, 本方式では 0.9mm 以下において 96% 程度の精度で厚みを推定可能である.

抵抗値に対する流出電流の計測結果について述べる. 135kΩ までの全抵抗値においてタッチ時の流出電流が取得可能だった (図 3 (b)). 曲線当てはめの結果から内部抵抗値  $R$  は 64kΩ であった. 実測の誤

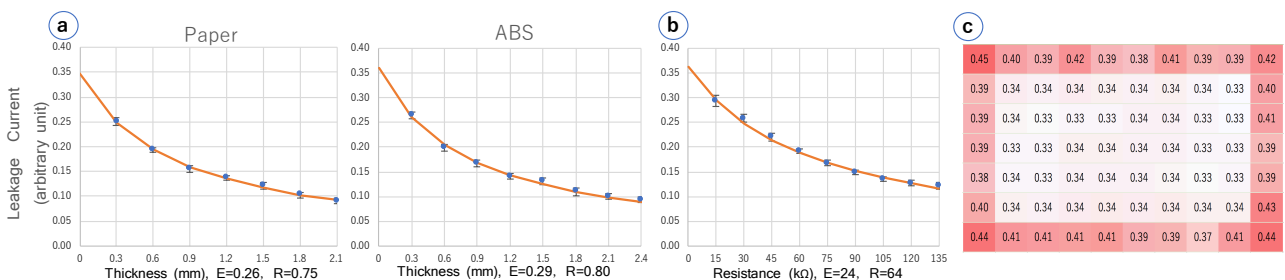


図 3. (a) 絶縁体厚さに対する流出電流, (b) 抵抗値に対する流出電流, (c) タッチ位置ごとの流出電流.



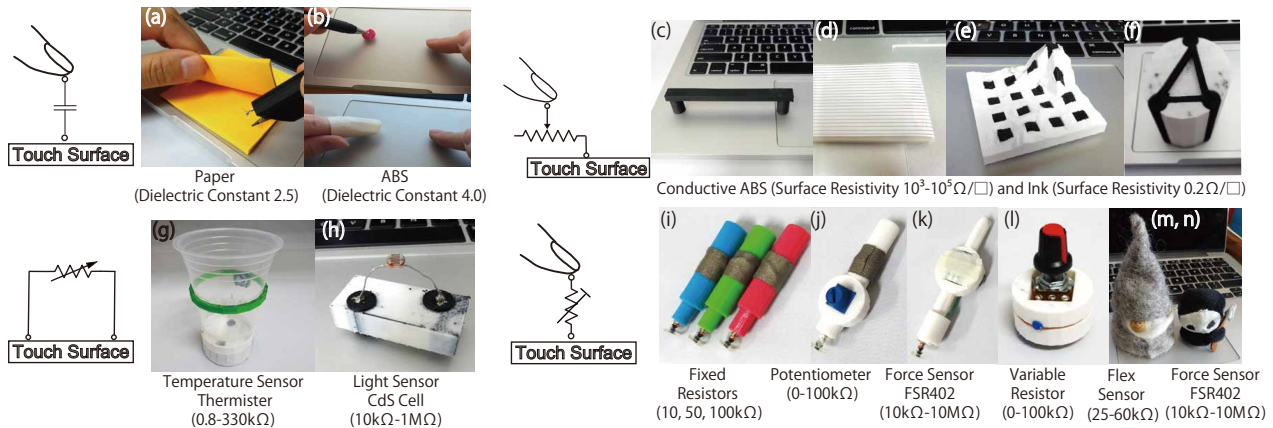


図 4. 提案手法を用いたアプリケーションにて用いるオブジェクト。

差については、 $60\text{k}\Omega$ では $1.4\text{k}\Omega$ 、 $75\text{k}\Omega$ では $2.6\text{k}\Omega$ であった。この誤差は、抵抗値に対して3%程度の値であるため、本方式では $75\text{k}\Omega$ 以下において97%程度の精度で抵抗値を推定可能である。

タッチ位置ごとの流出電流の計測結果の平均値を図3(c)に示す。タッチサーフェスの縁に近いエリアは、内側のエリアと比較し僅かに流出電流が増加する傾向にあった。縁付近においてはこの特性を考慮し値の補正を行うことが望ましい。

#### 4 応用例

予備実験をもとにアプリケーションを試作した。流出電流のサンプリングレートは $60\text{Hz}$ であり、過去5値を平均し平滑化を行った。図4のオブジェクトは熱溶解積層方式の3Dプリンタ(ZORTRAX, M200およびFLASHFORGE, Dreamer)、インクジェットプリンタ(EPSON, PX-S160T)などを用いて作成した。3Dプリンタでは導電性ABSフィラメント(Mijinko)および非導電性ABSフィラメント(ZORTRAX)を用いた。図4(d)は銀ナノ粒子インク(三菱製紙株式会社, NBSIJ-MU01)を用い、銀ナノ粒子インク専用紙へ印刷し作成した。

全てのオブジェクトについて、アプリケーション実行前にキャリブレーションを行う必要がある。7秒間のオブジェクトを介したタッチ入力を3回実施し、タッチ開始1秒後から6秒後までの5秒間の平均値を基準値として用いる。

##### 4.1 静電容量を用いた例

**ポストイットインタフェース。** 図4(a)は、鉛筆とタッチペンを組み合わせたペン型オブジェクトである。タッチサーフェス上に置いた紙の上で使用すれば、コンピュータアプリケーションと紙の双方に同時に手書きを行える。ここではこのオブジェクトを使用して、タッチサーフェス上に積み重ねたポストイットに書き込むアプリケーションを作成した。ポストイットをタッチサーフェス上に置き、ペン型オブジェクトによりタッチすると、アプリケーションは流出電流の減少によりポストイットの存在を感

知する。そして、カーソルの移動モードを相対座標系から手書き入力に適した絶対座標系へと変更し、アプリケーションへの描画を行う。ユーザがポストイットをめくって厚さを変えると、アプリケーション側では描画レイヤーを切り替え、新しいレイヤーへ書き込みを行う。

**両手インタフェース。** 非導電性フィラメントを用いて指/タッチペン用のキャップを造形した。図4(b)では、これを非利き手側の指/タッチペンに装着している。キャップが介在することで流出電流が減少するため、利き手による直接タッチとキャップを装着した非利き手のタッチを区別可能である。従来、両手インタフェースを実現するためには、入力機器を複数用いる[1]、もしくは入力領域を分割する[6]などの工夫が必要であったが、提案手法では安価な素材のキャップを装着するだけでこれを実現した。また、厚みの異なるキャップを複数用意し、複数人のタッチの識別に用いることも可能である。

##### 4.2 抵抗を用いた例

**タッチ領域拡張インタフェース。** 図4(c)は導電性フィラメントを用いて造形したタッチバーである。タッチバーの一端をタッチサーフェス上の一点にて接触させた状態で、ユーザがタッチバーに触れると、アプリケーションは流出電流の変化からタッチ箇所を推定する。これにより、画面外へ拡張したタッチ領域での一次元パラメータ操作を可能とする。(d)は導電性インクを用いて印刷した導電性のパターンをもつシートである。このように導電性素材のバーを縞状に一行に設置すれば、ポインティング等の二次元的な操作へと拡張可能である。また、(e)は凹凸の地形を非導電性フィラメントにより造形し、その内部にて、グリッド状に導電性フィラメントを配置したオブジェクトである。導電性フィラメントの長さにより流出電流は変化するため、アプリケーションはタッチした位置の二次元座標だけでなく高さを推定する。(f)は非対称な3点により構成されるタッチパターンを底面にもつオブジェクトである。オブ

ジェクト側面にて円柱状の導電部が一部表出しており、ユーザがこの表出箇所に触れることで、アプリケーションはユーザのタッチした円柱および円柱上のタッチ箇所を推定する。これにより、オブジェクトの位置や回転角に加えタッチ箇所の情報をアプリケーション内で利用可能となる。

**センシングオブジェクト.** 図4 (g) (h) は、PUCs [14] の原理を応用したオブジェクトである。PUCs は、電氣的に接続した2点以上のタッチ点を持つオブジェクトである。これをタッチサーフェスに置くと、1つのタッチ点が走査されているときに、他のタッチ点が接地になり、人がタッチし続けることと等価の状態を維持する。ここではPUCsの2点のタッチ点の間に、パッシブな可変抵抗センサを接続し、センサの抵抗値に応じたインタラクションを提供した。(g) は温度センサを設置したコップ型オブジェクトである。液体をコップへ注ぐと、液体温度に応じてセンサの抵抗値が変化するため、液体の存在の検知および液体の温度を推定可能である。(h) は光センサ (CdS セル) を組み込んだオブジェクトである。タッチサーフェス上へ本オブジェクトを置くだけで周囲の明るさをセンシングする。これらのオブジェクトは、タッチサーフェス上に置くだけで抵抗値を読み取ることができるため、電子部品やセンサの働きを理解する、それを組み合わせてプログラミングするなどの、教育的なアプリケーションとしての応用も検討できる。

**電子部品を組み込んだタッチペンおよびダイヤル.** 図4 (i) は様々な抵抗値の固定抵抗器を、(j) はポテンションメータを、(k) は感圧センサを組み込んで試作したタッチペンである。また、(l) は可変抵抗器を組み込んだダイヤル型オブジェクトである。これらのオブジェクトを利用可能なペイントアプリケーションを実装した。(i) はそれぞれ値が異なる抵抗を用いているため、タッチペン同士の識別が可能である。これにより、各ペンに対応した色で描画を行う。(j) はポテンションメータのつまみを回転させ抵抗値を変化させることで、その抵抗値に応じ、アプリケーション内の描画オブジェクトの拡大縮小を行う。(k) はペンを握る力に応じて感圧センサの抵抗値が変化する。これにより線幅を連続的に変更することができる。(l) 可変抵抗器のつまみを回転させ抵抗値を変化させることで、アプリケーション内の描画オブジェクトの透明度の調整を行う。

**インタラクティブな可変玩具.** 図4 (m) は曲げセンサを、(n) は感圧センサを組み込みフェルトで作成した人形のオブジェクトである。(m) は、人形をお辞儀させるように曲げることで、(n) は、人形の側部から圧縮するように力を加えることで内蔵したセンサの抵抗値が変化する。これらの人形に対応するキャラクターと画面上でインタラクション可能なアプリケーションを実装した。

## 5 関連研究

### 5.1 タンジブルなオブジェクト

タッチサーフェス上にタンジブルなオブジェクトを置き、オブジェクトの操作によって入力モダリティを拡張する研究が行われている。Flexibles [12] は、柔軟な絶縁体素材内部に導電性素材を埋め込んだオブジェクトを用意し、これに力を加え、曲げる・押す・絞るなどの動作に対応するインタラクションを提供している。オブジェクトの変形によって生じる、導電性素材とタッチサーフェスとの距離、または導電性素材と指との距離の変化を、タッチサーフェスが返す静電容量の値の変化から検出している。本研究では硬いオブジェクトを用いてタッチサーフェスとオブジェクトの距離を推定している。さらに提案手法は、静電容量のみでなく、直流抵抗値を含めたインピーダンスに着目した動作原理を提案しており、Flexibles の概念を拡張したインタラクション手法といえる。直流抵抗回路は既存の電子部品、センサ部品によって容易に構成可能であり、多様なインタラクションが可能である。例えば、図4 (m) (n) で示したように、柔軟なオブジェクト内部に曲げセンサや感圧センサを埋め込み、歪曲や押下に応じた抵抗値を読み取ることで、Flexibles と同様のインタラクションを実現できる。

また、オブジェクト底面に導電性素材のタッチパターンを設置し、タッチパターンと電氣的に接続された導電部へユーザが触れることで、タッチサーフェス上でタッチ入力が発生させる手法が多数提案されている [10, 3]。これらの手法は、いずれもタッチ入力の発生有無を2値で取得しているのみであり、提供するモダリティは、オブジェクトの回転角およびタッチサーフェス上での二次元座標に応じた操作などに限定されている。提案手法は、オブジェクトの電氣的特性に応じ、タンジブルなオブジェクトに新たなモダリティを付加する手法である。さらに、提案手法は前述の手法 [10, 3] などと併用可能であり (図4 (f))、既存の TUI (Tangible User Interface) の操作語彙を拡張するものである。

### 5.2 タッチ領域の拡張

細い導電性素材を縞状、もしくは柱状に並べた機構を持つオブジェクト [2, 9, 13] やシート [8] をタッチサーフェス上で用いるインタフェースが提案されている。ユーザがオブジェクト/シートの表面をなぞるようにタッチすることで、タッチサーフェス上でのタッチ箇所が移動することを利用し、スクロールや拡大縮小などの操作を実現するものである。提案手法を用いれば、導電性素材の抵抗値からオブジェクト上のタッチ位置を検出することができるため、入力におけるインタラクション領域の次元を1次元増やすことが可能となる。例えば、細いフィルム状の導電体を簾のように並べ、1次元の入力を行うオブジェクト [13] やシート [8] ならば、図4 (d) で

示したように2次元の入力が行える。また、柱状の導電体を多数並べて直方体を構成し、その上面で2次元入力を行うオブジェクト [9] ならば、図4 (e) で示したように高さ方向の値を取得可能なため、3次元の入力が行える。

## 6 議論と今後の課題

本論文では、市販の静電容量方式のタッチサーフェス上において、連続的に変化するパラメータを利用し、タッチ入力のモダリティを拡張する Ohmic-Touch を提案した。提案手法においては、入手しやすく安価な素材や電子部品を用いたオブジェクトにより、無電源で豊富なインタラクションを提供する。そのため、タッチサーフェスにおける入力へ新たなモダリティを付与するための実用的な技術となりうる。

本論文における調査ではラップトップ型コンピューター機種のためのタッチサーフェスについて実現可能性を調査したが、スマートフォンやタブレット PC など、一般の静電容量方式のタッチサーフェスにおいても提案手法は広く適応可能と考えられる<sup>1</sup>。しかし、タッチサーフェスごとに電極のサイズ・配置間隔は異なると推察されるため、タッチサーフェス毎のキャリブレーションが必要である。

安定した流出電流の値を計測するためにはオブジェクトをタッチサーフェスと密着させる必要がある。本論文にて提案したオブジェクトにおいては、角度を変えてもある程度安定して接触可能なディスク付きスタイラスのペン先を利用する、もしくは接触面を電動サンダーにより平滑化するなどの工夫を行った。しかし、図4 (d) (e) のように多数の接触接点を持つオブジェクトは、全体を均一に接触させることが困難なため、流出電流の誤差が大きくなることが分かった。これは、垂直方向にのみ通電する性質を持つ導電性両面テープ (M3, 9703) を接触面に貼るなどの工夫により低減可能と考えられる。

介在させる導電体のオブジェクトに指で触れる際、流出信号はオブジェクトと指の接触面積による影響を受けることが観察された。本論文における実験ではタッチ箇所が細い導線だったため誤差は小さかったが、応用例にて示したタッチバーなどにおいては、オブジェクト上に表出する導電体部分のタッチ箇所を指幅より小さいサイズにするなどの工夫が必要であると考えられる。今後は指とオブジェクトのタッチ接触面積の差異による流出電流への影響調査を行い、より精密なパラメータ設定を行う。また、スマートフォンやスマートウォッチを対象に、本手法の特徴を生かした実効的なアプリケーションの提案・開発を行う。

**謝辞。** 本研究の一部は JSPS 科研費 17J02834,

26330219 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] E. A. Bier, M. C. Stone, K. Pier, W. Buxton, and T. D. DeRose. Toolglass and Magic Lenses: The See-through Interface. In *Proc. of SIGGRAPH'93*, pp. 73–80, 1993.
- [2] L. Chan, S. Müller, A. Roudaut, and P. 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.
- [3] S. Günther, M. Schmitz, F. Müller, J. Riemann, and M. Mühlhäuser. BYO\*: Utilizing 3D Printed Tangible Tools for Interaction on Interactive Surfaces. In *Proc. of SmartObject'17*, pp. 21–26, 2017.
- [4] D. Holman, N. Fellion, and R. Vertegaal. Sensing Touch Using Resistive Graphs. In *Proc. of DIS '14*, pp. 195–198, 2014.
- [5] C. Holz, S. Buthpitiya, and M. Knaust. Bodyprint: Biometric User Identification on Mobile Devices Using the Capacitive Touchscreen to Scan Body Parts. In *Proc. of CHI '15*, pp. 3011–3014, 2015.
- [6] K. Ikematsu and I. Siio. An Input Switching Interface Using Carbon Copy Metaphor. In *Adjunct Proc. of UIST'16*, pp. 93–95, 2016.
- [7] B. Jesse, F. Nicholas, S. Paul, and V. Roel. PrintPut: Resistive and Capacitive Input Widgets for Interactive 3D Prints. In *Proc. of INTERACT '15*, pp. 332–339, 2015.
- [8] K. Kato and H. Miyashita. ExtensionSticker: A Proposal for a Striped Pattern Sticker to Extend Touch Interfaces and Its Assessment. In *Proc. of CHI '15*, pp. 1851–1854, 2015.
- [9] K. Kato and H. Miyashita. 3D Printed Physical Interfaces That Can Extend Touch Devices. In *Adjunct Proc. of UIST '16*, pp. 47–49, 2016.
- [10] S. Kratz, T. Westermann, M. Rohs, and G. Essl. CapWidgets: Tangible Widgets Versus Multi-touch Controls on Mobile Devices. In *CHI '11 Extended Abstracts*, pp. 1351–1356, 2011.
- [11] M. F. Moad. On Thevenin's and Norton's Equivalent Circuits. *IEEE Trans. on Educ.*, 25(3):99–102, Aug. 1982.
- [12] M. Schmitz, J. Steimle, J. Huber, N. Dezfuli, and M. Mühlhäuser. Flexibles: Deformation-Aware 3D-Printed Tangibles for Capacitive Touchscreens. In *Proc. of CHI '17*, pp. 1001–1014, 2017.
- [13] S. Ueno, K. Kato, and H. 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.
- [14] S. Voelker, K. Nakajima, C. Thoresen, Y. Itoh, K. I. ård, and J. Borchers. PUCs: Detecting Transparent, Passive Untouched Capacitive Widgets on Unmodified Multi-touch Displays. In *Proc. of ITS '13*, pp. 101–104, 2013.

<sup>1</sup> Android のカーネルを書き換えることにより、タッチ時にグラウンドへ流出する高周波と相関のある値を取得する方法 [12, 5] が知られている。