

Ohmic-Extension: 筐体グランドへの接続を利用した 静電容量方式タッチサーフェス拡張ウィジェット

池松 香^{1,2,a)} 尾崎 保乃花^{1,b)} 椎尾 一郎^{1,c)}

概要: 我々は、静電容量方式タッチサーフェスの入力語彙拡張を目的とした簡易取付型のウィジェットを提案する。本ウィジェットは、内蔵の可変抵抗器/センサの抵抗値に応じ連続的な入力を実現する。さらに、ウィジェットの検出には人体の接触を必要としないため、ユーザ個人差やユーザ身体のグランド状況の影響を受けず、安定した入力が可能となる。本論文では、予備調査を行いグランド条件毎の抵抗値の推定精度を確認し、さらに、調査をもとに試作したウィジェットおよびウィジェットを用いた応用例について報告する。

Ohmic-Extension: Extending Capacitive Touch Surface Interaction Using Device Ground Connection

IKEMATSU KAORI^{1,2,a)} OZAKI HONOKA^{1,b)} SHIO ITIRO^{1,c)}

Abstract: We propose a simple attachment widget to extend input vocabulary for capacitive touch surfaces. This widget provides continuous input modality depending on the resistance value of the built-in variable resistor/sensor. Moreover, the widget detection method on the touch surfaces does not require human-contact, therefore, it is not affected by user individual differences or ground conditions of user bodies. In this paper, we report the feasibility study of our technique and based on the result of the feasibility study, we implemented prototype widgets and applications.

1. はじめに

近年、スマートフォン、タブレットPC、スマートウォッチ、トラックパッドなど、静電容量方式のタッチサーフェス（以下、タッチサーフェス）は広く一般に普及した。これらの多くはタッチ、マルチタッチ、ジェスチャ入力など、豊富な入力語彙を提供する。一方で、物理的なボタンやスライダ、ダイヤルノブといった入力と比較し触覚的な手がかりに乏しく、入力が成功裏に行われたことを確認するためには視覚的/聴覚的フィードバックを待つ必要がある。この課題に対し、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、タッチ入力に物理的な手がかりを付与する手法が多数提案されてきた [1], [3], [6]。これらは、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氣的に接続された導電部にユーザが触れることで、オブジェクトを介した入力を可能とするものである。しかし、これらの手法においてはタッチパターンを構成する底面タッチ点のタッチ/非タッチの離散的な状態のみを利用しており、取得可能な情報はタッチサーフェス上のオブジェクトの位置座標および回転角に限られている。

この課題に対し、我々はタッチサーフェス上でオブジェクトのインピーダンス値が取得可能であることを示し、オブジェクトの電氣的特性（抵抗率・誘電率）に応じ、連続的な操作が可能なオブジェクトを提案した [15]。しかし、タッチサーフェスが計測する値はオブジェクトのインピーダンスだけではなく、ユーザの身体を通じてグランドへと

¹ お茶の水女子大学
Ochanomizu University, Bunkyo, Tokyo, Japan

² 日本学術振興会
JSPS, Chiyoda, Tokyo, Japan

a) ikematsu.kaori@is.ocha.ac.jp

b) ozaki.honoka@is.ocha.ac.jp

c) shio@acm.org

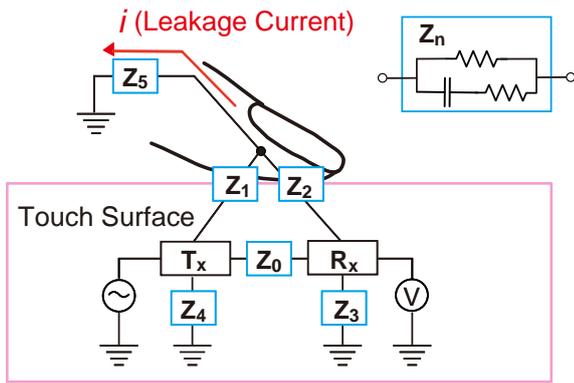


図 1 静電容量方式タッチサーフェス等価回路。

Fig. 1 Equivalent circuit for a capacitive touch surface.

至る経路全体のインピーダンス値である。そのため、身体の個人差（皮膚の乾燥度合い、生体インピーダンスなど）や身体のグラウンド状況（靴の着脱、着席姿勢など）によりわずかに誤差が生じる。

我々は、連続的な入力を可能とし、かつ人体非接触でタッチ検出を可能とすることでユーザの個人差等の影響を受けないタッチサーフェス拡張ウィジェットを、予備調査をもとに試作した。本論文ではこの内容を報告する。

2. 作成要件

連続的な入力を可能とし、かつ人体の個人差および人体のグラウンド条件に影響されないタッチサーフェス拡張ウィジェットの作成要件は下記のとおりである。

- (1) ウィジェットへの働きかけにより連続的な入力を可能とする。
- (2) ウィジェットの検出に人体の接触を必要としない。

本節では、一般的な静電容量方式タッチサーフェスの検出原理を説明した上で、ウィジェット作成要件を満たすための実現方法について述べる。

2.1 静電容量方式タッチサーフェスにおけるタッチ検出原理

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 [9]。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 に示す。Tx は送信電極、Rx は受信電極を示す。Zn 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する。Tx と Rx は、Z4 と Z3 を経由して接地されると共に、Z0 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、Tx と Rx の電気的結合は Z0 のみであり、Tx

から Rx へ、Z0 を介して信号が伝達される。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、Z1 と Z2 で Tx と Rx が接続される。それと同時に、人体などのインピーダンス Z5 を經由して接地される。これにより、Tx からの信号の一部 i（以降、流出電流とする）がグラウンドへと流出し、Rx 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する。

2.2 連続的な入力

タッチサーフェス上のタッチ箇所から接地へ至るインピーダンスが変化すると、流出電流はそれに伴い変化する。Ohmic-Touch [15] においては、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、オブジェクトのインピーダンス値の容量成分・抵抗成分それぞれの変化を、Flexibles [10] においては、オブジェクトの静電容量の変化を入力に利用可能であることを示した。本論文で提案するウィジェットにおいては、インピーダンスの抵抗成分を入力に用いることで連続的な入力を行うアプローチを選択した。安価でパッシブな可変抵抗器/センサは多く存在するため、これを用いることでユーザの操作を抵抗値に変換する機構を容易に作成可能である。例えば、ダイヤルの回転を入力として扱うポテンショメータや、ノブをスライドさせる動作を入力として扱うスライダ、感圧や光、温度などを抵抗値に変換する感圧センサ、光センサ、温度センサなどの利用が可能である。また、3D プリントにより造形するオブジェクト内部にこうした電子部品を組み込む手法も提案されている [11]。

流出電流と相関関係にある値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 [4], [5], [7], [13]。本ウィジェットにおいても同様に、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 筐体を通じたグラウンド接続による人体非接触のタッチ検出

多くのタッチサーフェスにおいて、筐体内部の電子基板のグラウンドと筐体は電気的に接続されている。そのため、導電体のオブジェクトの一端をタッチサーフェス上に、他端を筐体を通じグラウンドへと接続する（以下、筐体グラウンド）ことで、人体による接触が無い場合であっても十分な電流がグラウンドへと流出する。これによりタッチ入力を発生させることが可能である。本論文で提案するウィジェットにおいては、一部を導電性素材により作成し、タッチサーフェスとの接触箇所および、筐体グラウンドとの接触箇所を設ける。この 2 つの接触箇所を電気的に接続することで、人体の接触を必要としない筐体グラウンドへ接続する方

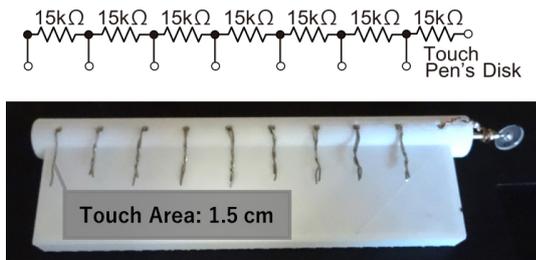


図 2 予備調査に用いたタッチペンの回路図. 9 個の抵抗 (15kΩ) とペン先が接続されている.

Fig. 2 The touch pen object used for feasibility study. A series connected resistors are connected with the tip portion.

法でタッチの検出を実現する.

3. 予備調査

タッチサーフェスに置いたオブジェクトからの流出電流が、抵抗値とグラウンド条件により変化する状況を測定する目的で予備調査を行った. オブジェクトのグラウンド条件は (1) 筐体グラウンドとの接続, (2) 人体との接続の 2 通りである.

3.1 実験セットアップ

本調査では直列に接続した抵抗器 (抵抗値 15kΩ) をペン先 (円形, 直径 6mm) 部分と導線で接続したタッチペン型のオブジェクト (図 2) を使用した. 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. グラウンド条件 (1) においては、図 3 のように筐体とオブジェクトを導線で接続した. 同条件 (2) においては、被験者 10 名 (22-67 歳, 男性 3 名, 女性 7 名) に本調査へ参加してもらい、利き手の人差し指をオブジェクト上のタッチ箇所へと触れることで人体へ接続した. 被験者は 26-28 °C の屋内にて靴を脱ぎ、着席した状態でタスクを実行した.

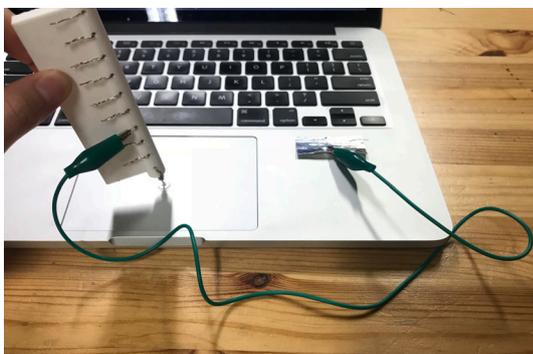


図 3 筐体にアルミニウム製のテープを貼り、筐体とオブジェクトを導線で接続している様子.

Fig. 3 Touching operations using the touch pen object connected to the device GND.

本調査で使用するタッチサーフェスは、13-inch MacBook Pro (タッチサーフェス: 105mm × 75mm, AC アダプタに接続) である. また、macOS 10.11 上で動作する調査用アプリケーションを C++ および MultitouchSupport.framework により実装した. 本アプリケーションを用いて流出電流 (MultitouchSupport.framework の size プロパティより取得) を記録した.

3.2 測定内容

測定では、オブジェクトのペン先に近い抵抗端子から順に、導線または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. 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、タッチ開始 1 秒後から 6 秒後までの 5 秒間を記録した. 条件 (1) においては、各抵抗値において 5 回、条件 (2) においては、各抵抗値において被験者一名あたり 3 回のタッチ操作を行った.

3.3 調査結果

図 4 にグラウンド条件ごとの抵抗値に対する流出電流変化の計測結果の平均値をエラーバー (標準偏差) と共に示す. このグラフの横軸はオブジェクトの抵抗値であり、縦軸は流出電流に比例する値 (前述の size プロパティ) である. 条件 (1) (2) において、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.

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 [8] へ置き換えることが可能である. 本調査でのオブジェクトを用いたタッチ入力の状態は、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状態と等価の状態と考えられ

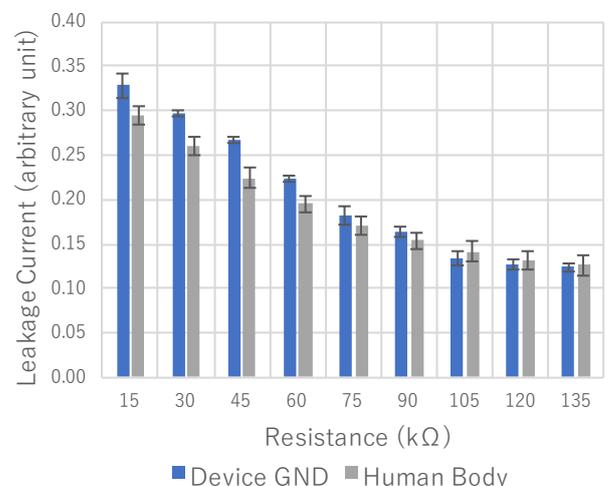


図 4 グラウンド条件毎の抵抗値に対する流出電流.

Fig. 4 Mean leakage current with standard deviations to each ground condition.

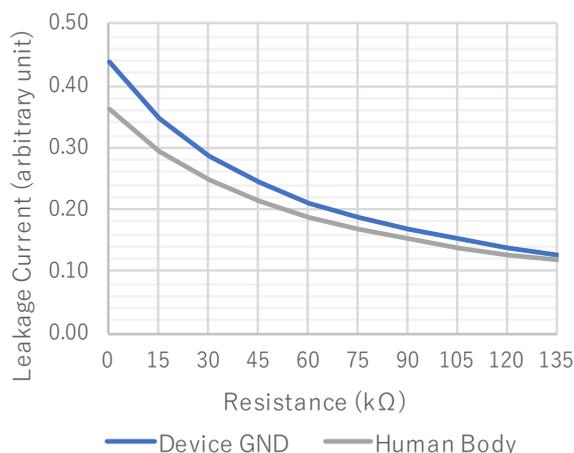


図 5 各グランド条件毎の抵抗値-流出電流のマッピング関数。

Fig. 5 The mapping function between leakage current and resistance.

るため、流出電流 i は下記のように表現できる [15].

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

$Z = 0$ のときに最大電流 $i = \frac{E}{R}$ を取り出せる一方、 $Z = R$ の時には最大電流の半分に低下するため、 0Ω 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。

図 5 は、実験結果について式 1 を用いて最小二乗法によりフィッティングした結果である。本結果より、グランド条件 (1) において、内部抵抗値 $R = 55\text{k}\Omega$ 、起電力 $E = 24$ 、条件 (2) においては $R = 64\text{k}\Omega$ 、 $E = 24$ であった。人体への接続は筐体への接続と比較し、接地に至る内部抵抗が高いことが確認された。実測の誤差については、条件 (1) においては $60\text{k}\Omega$ では $0.8\text{k}\Omega$ であった。この誤差は、抵抗値に対して 1% 程度の値であるため、 $60\text{k}\Omega$ 以下において 99% 程度の精度で抵抗値を推定可能である。条件 (2) においては $60\text{k}\Omega$ では $1.4\text{k}\Omega$ 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、 $60\text{k}\Omega$ 以下において 97% 程度の精度で抵抗値を推定可能である。条件 (1) は条件 (2) と比較し僅かに精度が高かった。筐体への接続は、人体の個人差 (皮膚の乾燥具合などによる生体インピーダンスの差異) が影響しないために精度が高いと考えられる。

4. 実装

本論文では、簡易に筐体グランドへ接続するため、筐体表面に金属などの導電部を持ち、かつその導電部が筐体内部の電子基板のグランドと接続されているタッチサーフェスとして、13-inch MacBook Pro (Apple, タッチサーフェス: $105\text{mm} \times 75\text{mm}$) および Magic Trackpad2 (Apple, タッチサーフェス: $160\text{mm} \times 115\text{mm}$) を用いた。MacBook Pro はパームレストを含むトラックパッド設置面が、Magic Trackpad2 は側部が電子基板のグランドと接続された導電体となっている。

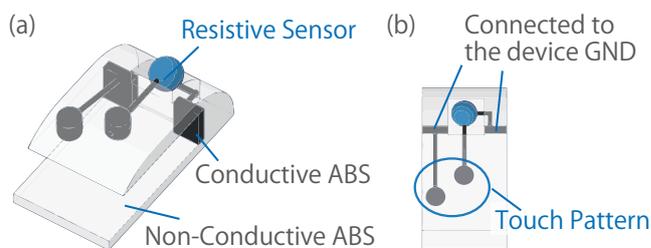


図 6 (a) ウィジェットの基本構造。タッチサーフェスとの接触箇所と筐体グランドとの接触箇所間に可変抵抗器/センサを組み込み、その抵抗値の値をタッチサーフェスが取得する。(b) 抵抗部品と接続されていないタッチサーフェスとの接触箇所と組み合わせて 2 点のタッチパターンを形成する。

Fig. 6 Basic structure of the widget. The widget incorporates a variable resistance component/sensor between the contact point with the touch surface and the contact point of the device ground. The touch surface is capable of estimating resistance values of a resistive component/sensor.

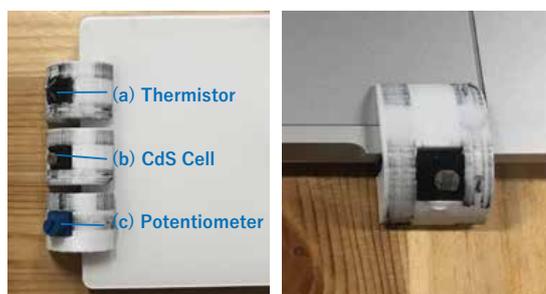


図 7 (a) 温度センサ (thermistor, $0.8\text{--}330\text{k}\Omega$) ; (b) 光センサ (CdS Cell, $10\text{k--}1\text{M}\Omega$) ; (c) 角度センサ (potentiometer, $0\text{--}100\text{k}\Omega$) を組み込んだウィジェットを Magic Trackpad2 および MacBook Pro に装着している様子。

Fig. 7 Widgets with built-in (a) temperature sensor (thermistor, $0.8\text{--}330\text{k}\Omega$) ; (b) Light sensor (CdS Cell, $10\text{k--}1\text{M}\Omega$) ; (c) angle sensor (potentiometer, $0\text{--}100\text{k}\Omega$) . These widgets are capable of attaching Magic Trackpad2 and MacBook Pro.

試作したウィジェットの基本構造を図 6 (a) に示す。ウィジェットは FDM (Fused Deposition Modeling) 方式の 3D プリンタ (Dreamer, Flash Forge) にて、導電性および非導電性の ABS フィラメントを用いて造形した。本ウィジェットは、導電性フィラメントにより作成したタッチサーフェス上のタッチ入力面との接触箇所 (円形、直径 6mm) および、筐体グランドとの接触箇所 ($10\text{mm} \times 10\text{mm}$) を備える。接触箇所がタッチサーフェス上のタッチ入力面および側部の筐体グランドへと接触するように、ウィジェットでタッチサーフェスを挟んで装着する (図 7)。図 6 の青い円で示された箇所には可変抵抗器/センサを組み込むことを想定している。接触箇所と可変抵抗器/センサは導線により相互に接続されている。また、導線は

タッチサーフェスから 2mm 以上離れるよう配置されている。これにより、タッチ入力面と筐体グラウンドは可変抵抗器/センサを通じ電氣的に接続され、タッチサーフェス上でタッチ入力が発生する。ウィジェット内部左側にタッチサーフェスとの接触箇所を設け、抵抗部品と接続されている接触箇所と組み合わせて 2 点のタッチパターンを形成する (図 6 (b))。アプリケーションは 2 点間の距離により、各ウィジェットを識別する。

図 7 (a) は温度センサ (thermistor) を、(b) は光センサ (CdS Cell) を、(c) はポテンショメータをタッチ入力面との接触箇所と筐体グラウンドとの接触箇所間に接続している実装例である。(a)、(b) を用いれば周囲の環境光および温度に応じて変化する抵抗値を、(c) はユーザがダイヤルを回転させ、回転角に応じた抵抗値を取得可能となる。

5. アプリケーション

試作したウィジェットを用いて、macOS 10.11 上で動作するデスクトップ常駐型のアプリケーションおよびエンターテインメントアプリケーションを実装した。実装には Objective-C、Unity および MultitouchSupport.framework を利用した。アプリケーションは、タッチサーフェスへの入力から、オブジェクトの抵抗値変化に応じた流出電流と相関のある値 (MultitouchSupport.framework の size プロパティ) を取得する。オブジェクトの抵抗値と流出電流の値の対応は、前節の予備調査の結果をもとに決定している。

デスクトップ常駐型のアプリケーションは、通常は OS 内のパラメータ値の設定に対して機能し、iTunes および Adobe Illustrator がアクティブなウィンドウとして選択されている場合には各アプリケーションに対応した操作を提供する。具体的には、ポテンショメータを組み込んだウィジェットのダイヤル回転操作により、iTunes にて音量や再生箇所の調整または、Illustrator にてオブジェクトの不透明度や線幅の調整などに割り当てることが可能となる。

図 8 は、ドールハウスを模したエンターテインメント用アプリケーションである。ドールハウス内の照明器具の明るさは、光センサを内蔵したウィジェットから取得する抵抗値に応じ、実世界の部屋の明るさを反映する。また、温度センサを内蔵したウィジェットにより、ドールハウス内のキャラクターたちは暑い/寒いなどの反応をする設計とした。

これらのアプリケーションにおいて、各ウィジェットはタッチパターンにより一意に識別可能なため、複数のウィジェットを同時に用いることも可能である。

6. 関連研究

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 [10] 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、

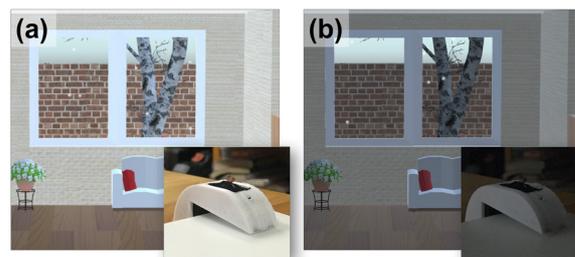


図 8 光センサ内蔵のウィジェットにより実世界の明るさを仮想世界内へと反映する。

Fig. 8 Reflect real-world brightness into virtual worlds by using the widget with built-in CdS cell.

これに力を加え、オブジェクトの変形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。Ohmic-Touch [15] 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、市販のパッシブな抵抗部品やセンサ、特定の抵抗値分布を持つ素材 (導電性のインク及び 3D プリンタ用フィラメント) の抵抗値をタッチサーフェス上での入力に利用可能であることを示した。本研究では Ohmic-Touch と同様に、抵抗値変化する部品をオブジェクトに組み込むことで連続的な入力を実現するが、オブジェクトの検出に筐体グラウンドを用いる点において異なる。

PUCs [12] 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。PUCs はタッチサーフェス上に置いてユーザが自由に移動し操作可能なオブジェクトの実現を目的としているが、我々は、タッチサーフェスの縁に取り付け、固定して使用するウィジェットを意図して設計した。

また、タンジブルなオブジェクトに備え付けられ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 [2], [3], [6], [14] が多数提案されており、一部は製品化もされている *1。Clip-on gadgets [14] は、タッチサーフェスの縁に取り付けるクリップ状のガジェットである。ガジェット上の導電性素材のボタンなどに人体が触れることでタッチ入力が発生させる。BYO* [3] は導電性素材によって作成したマルチタッチパターンによりオブジェクトを一意に識別し、固有の機能や情報を持たせる手法である。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

*1 AppMATEs: <http://www.appmatestoy.com/>
Fling analog joystick: <https://tenonedesign.com/fling>

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。本論文で提案するウィジェットは、オブジェクトの直流抵抗値に応じ、タンジブルなオブジェクトに連続的な入力モダリティを付加する。これは既存の TUI (Tangible User Interface) の操作語彙を拡張するものであるといえる。

7. 制約

市販されているタッチサーフェスにおいては同時に検出可能なタッチ点の数には上限がある*2。本論文で提案するウィジェットは、ウィジェット同士の識別のため、タッチサーフェスとの接触箇所を2点設置する必要がある。そのためタッチ点数の上限は同時に認識可能なウィジェット数を制限する。さらに、ウィジェット使用時にも、通常操作としてOSの提供するマルチタッチジェスチャを実行することを考慮すると、マルチタッチジェスチャの最大タッチ数とウィジェットのタッチ数の合計が同時検出可能なタッチ点数を超えることは望ましくない。

8. まとめと今後の展望

本論文では、静電容量方式タッチサーフェスにて、人体非接触で検出可能かつ、連続的な入力を可能とする簡易取付型のウィジェットの実現方法を示した。さらに、予備調査にもとづき実装を行いその応用例を示した。本論文で示したウィジェットは導線部に導電性のフィラメントを用いたが、今後はより抵抗値検出精度を高めるためプリント基板を組み込んだウィジェットの試作を行う。また、本論文の応用例として入力操作によって抵抗値が変化するジョイスティックやトラックポイントなどの機構を用い、タッチサーフェス上へ簡易取付可能なポインティングデバイスの作成を行う。

9. 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] Chan, L., Müller, S., Roudaut, A. and Baudisch, P.: CapStones and ZebraWidgets: Sensing Stacks of Building Blocks, Dials and Sliders on Capacitive Touch Screens, In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 2189–2192 (2012).
- [2] Götzelmann, T. and Schneider, D.: CapCodes: Capacitive 3D Printable Identification and On-screen Tracking for Tangible Interaction, In *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, NordiCHI '16, pp. 32:1–32:4 (2016).
- [3] Günther, S., Schmitz, M., Müller, F., Riemann, J. and Mühlhäuser, M.: BYO*: Utilizing 3D Printed Tangible

- Tools for Interaction on Interactive Surfaces, In *Proceedings of the 2017 ACM Workshop on Interacting with Smart Objects*, SmartObject '17, pp. 21–26 (2017).
- [4] Guo, A., Xiao, R. and Harrison, C.: CapAuth: Identifying and Differentiating User Handprints on Commodity Capacitive Touchscreens, In *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces*, ITS '15, pp. 59–62 (2015).
- [5] Holz, C., Buthpitiya, S. and Knaust, M.: Bodyprint: Biometric User Identification on Mobile Devices Using the Capacitive Touchscreen to Scan Body Parts, In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 3011–3014 (2015).
- [6] Kratz, S., Westermann, T., Rohs, M. and Essl, G.: CapWidgets: Tangible Widgets Versus Multi-touch Controls on Mobile Devices, In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, pp. 1351–1356 (2011).
- [7] Le, H. V., Mayer, S., Bader, P. and Henze, N.: A Smartphone Prototype for Touch Interaction on the Whole Device Surface, In *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '17, pp. 100:1–100:8 (2017).
- [8] Moad, M. F.: On Thevenin's and Norton's Equivalent Circuits, In *IEEE Trans. on Educ.*, Vol. 25, No. 3, pp. 99–102 (1982).
- [9] Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Free-hand Manipulation on Interactive Surfaces, In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pp. 113–120 (2002).
- [10] Schmitz, M., Steimle, J., Huber, J., Dezfuli, N. and Mühlhäuser, M.: Flexibles: Deformation-Aware 3D-Printed Tangibles for Capacitive Touchscreens, In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1001–1014 (2017).
- [11] Umetani, N. and Schmidt, R.: SurfCuit: Surface-Mounted Circuits on 3D Prints, In *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol. 38, No. 3, pp. 52–60 (2017).
- [12] Voelker, S., Nakajima, K., Thoresen, C., Itoh, Y., Ård, K. I. and Borchers, J.: PUCs: Detecting Transparent, Passive Untouched Capacitive Widgets on Unmodified Multi-touch Displays, In *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, pp. 101–104 (2013).
- [13] Xiao, R., Schwarz, J. and Harrison, C.: Estimating 3D Finger Angle on Commodity Touchscreens, In *Proceedings of the 2015 International Conference on Interactive Tabletops & Surfaces*, ITS '15, pp. 47–50 (2015).
- [14] Yu, N.-H., Tsai, S.-S., Hsiao, I.-C., Tsai, D.-J., Lee, M.-H., Chen, M. Y. and Hung, Y.-P.: Clip-on Gadgets: Expanding Multi-touch Interaction Area with Unpowered Tactile Controls, In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 367–372 (2011).
- [15] 池松 香, 椎尾 一郎: 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, 第25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 (WISS2017), pp. 71–76 (2017).

*2 例をあげると, iPad では最大で 11 点のタッチが同時に検出可能である。