Ohmic-Touch: 静電容量方式タッチサーフェス におけるオブジェクトを介した入力技法

池松 香 椎尾 一郎

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)を利用し、オブジェクトの高さ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.また、提案手法は OS に変更を加えることなく、市販のタッチサーフェスにて動作する実効的な入力手法である.本論文では提案手法の実現可能性を調査し、その結果をもとに作成した、タッチ入力のモダリティ拡張を可能とする 13 種類の応用例について報告する.

When an object is interposed between a touch surface and a finger/touch pen, the change in impedance caused by the object can be measured by the driver software. This phenomenon has been used to develop new interaction techniques. Unlike previous works that focused on the capacitance component in impedance, Ohmic-Touch enhances touch input modality by sensing resistance. Using 3D printers or inkjet printers with conductive materials and off-the-shelf electronic components/sensors, resistance is easily and precisely controllable than capacitance. We implement mechanisms on touch surfaces based on the electrical resistance of the object: for example, to sense the touching position on an interposed object, to identify each object, and to sense light, force, or temperature by using resistors and sensors.

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,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 拡張する研究は盛んに行われ [18][7][13][36], 一部は 商品化もされている^{†1}. 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 の抵抗成分が変化するオブジェクトを介した間接タッ

Ohmic-Touch: Extending Capacitive Touch Input by Indirect Touch through Objects

Kaori Ikematsu, お茶の水女子大学, 日本学術振興会, Ochanomizu University, JSPS.

Itiro Siio, お茶の水女子大学, Ochanomizu University. コンピュータソフトウェア, Vol.35, No.3 (2018), pp.19–31. [研究論文] 2018 年 1 月 22 日受付.

^{†1} http://www.appmatestoys.com/



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.

チ, "Ohmic-Touch"を提案する.これにより従来の タッチ入力に新しいモダリティを付加し,連続的な入 力へと拡張することを目指す.

一般的な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)から、オブジェクト の高さ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 ことが可能となる.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[6][28].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 1対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、 $T_x \ge R_x$ 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経由して、Z1とZ2 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 Z₅ を経由して接地される.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 5-7.5mm 程度であると推定され ており[39] [14], 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.また、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あり. パームリジェクションなどの機能がこれに該当する.

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[23]へ置き換えることが可能であり、 起電力に内部インピーダンス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、内部インピー ダンス 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.

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

グラウンドへ流出する信号と相関関係にある値(以 下,流出電流とする)を取得するメカニズムは, OS X や Android, Windows 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[31][12][8][19][35]. 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 インピーダンス抵抗成分の変化を利用した インタラクション

本論文においては、インピーダンス Z を変化させる ため、主に電気抵抗成分(抵抗値)を変えるアプロー チを取った、すなわち、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 せることで抵抗成分を変化させた、特定の電気抵抗分 布をもつオブジェクトは、3D プリンタで導電性フィ ラメントを用いることにより作成できる[15][20].ま た、3D プリンタの造形物と電子部品を組み合わせた オブジェクトの作成手法[33]や、インクジェットプリ ンタで導電性のインクを用いて導電性のパターンを 印刷する手法[17][16][11][25]が知られている.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・水位・角度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.さらに、導電性のイ ンクを多孔質の物体に染み込ませたオブジェクト[24] や、導電繊維を編み込んだ衣服[27]や手袋[42]の変形 を抵抗値の変化により検出する手法なども提案され ている.こうした近年のファブリケーションツール・ 手法の発展により、ユーザの入力を抵抗値変化に置き 換える機構の実現は比較的容易になっている.

3 予備調査

タッチサーフェスが計測するインピーダンス値は下 記の要因により変化すると考えられる.各要因による 変化を確認するための予備調査を行った.

- 1. オブジェクトとタッチサーフェスの接触面積
- 2. オブジェクトの抵抗値
- 3. タッチサーフェス上のタッチ位置

3.1 実験セットアップ

調査 (1) および (2) では直列に接続した抵抗器 (抵 抗値 15 k Ω) 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, 135 k Ω と線形的



図 2 予備調査にて使用したタッチペン型オブジェクト.
 9 つの 15 k Ω の抵抗器が直列にペン先と接続されている.

に変化する.調査 (3) では市販のタッチペン (Adonit Jot Pro 2.0, ペン先のディスクから末端までの抵抗値 10 Ω 程度) を使用した.本調査で使用するタッチサー フェスは, 13-inch MacBook Pro (トラックパッド領 域: 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^{†2} により実装した. 流出電流値と相関のある値はサード パーティによるオープンソースのライブラリ^{†3} により 取得した.本アプリケーションを用いて流出電流値お よびタッチ位置を記録した.全ての調査は 26-28°C の屋内にて,タッチサーフェスを木製の机の上へ置い た状態で実施した.

3.2 接触面積による流出電流への影響

タッチ入力時に反応するタッチサーフェス内電極の 交点数は、オブジェクトとタッチサーフェスの接触面 積によって変動する.各電極の幅は5-7.5mm 程度 である[39][14] ことから、これと同程度の接触面積で あれば安定した流出電流値を取得可能であると予想 され、また、これより小さくなった場合は十分な流出 電流が発生せずタッチ入力が検出されないと予想され る.一方で、接触面積が大きくなった場合には流出電 流値にどのような影響を与えるか検証し、適切な接触 面積の範囲を調査した.

図3に示すように、サイズの異なるディスク (直径 6,8,10,12mm)を銀ナノ粒子インク^{†4}を用いて銀 ナノ粒子インク専用 PET 用紙^{†5}に印刷し、インク 塗布領域のみのディスクとなるよう切断した.この



図 3 銀ナノ粒子インクを用いて印刷したディスク.

†2 Apple 社の private framework

- †4 NBSIJ-MU01, Mitsubishi Paper Mill
- †5 NB-TP-3GU100, Mitsubishi Paper Mill

ディスクをタッチペン型のオブジェクトのペン先に取 り付けオブジェクトとタッチサーフェスの接触面積を 変化させた.また,接地極付きコンセントのグランド へと接続したコネクタの一端をオブジェクトの各タッ チ箇所に取り付け,オブジェクトの抵抗値を変化させ た.タッチサーフェス中央部でのオブジェクトを用い たタッチ入力を各接触面積・抵抗値条件において10 回ずつ行った.タッチ開始/終了時のオブジェクトの 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,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,4(接触面積)×9(抵 抗値)×10(タッチ)=360回である.

図4に接触面積ごとの流出電流の測定結果の平均値 をエラーバー (標準偏差)とともに示す.6mm および 8mm のディスク使用時は全ての抵抗値において流出 電流の計測が可能だった.10mm は105kΩ,12mm は90kΩまで流出電流の計測が可能であり,6mm お よび8mm の場合と比較し計測可能な範囲が狭まっ た.また,10mm および12mm のディスク使用時は 6mm および8mm の場合と比較し,流出電流の変動 幅が大きくなった.これは、反応する電極交点の数が 増えたために生じた影響であると推察される.よって 本調査に使用するタッチサーフェスの接触面積の直径を 6-8mm 程度にすることが望ましいと言える.

また、タッチサーフェス (MacBook Air, トラック パッド領域: 105mm×62mm) を分解した様子を図 5 に示す. 本タッチサーフェスにおける電極幅は 5mm



図 4 接触面積ごとの流出電流の平均値.

^{†3} http://hci.rwth-aachen.de, MTDeviceDeclarationsのsizeプロパティを利用.



図 5 タッチサーフェスを分解し電極を表出させた様子. 電極幅はおよそ 5mm.

であった. これは実験で用いたタッチサーフェスとは 異なるものの同 Apple 社の製品であり,実験に用い たタッチサーフェスにおいても同様の電極構造を有し ていると考えられる.安定した流出電流値の取得が 可能な条件が直径 6-8mm という結果となったのは, 電極幅より僅かに大きいサイズであることからも妥 当であると考えられる.

3.3 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. 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. 前調査より、オブジェクトとタッチ サーフェスとの接触面積には直径 6mm のディスクを 用いた. 被験者は靴を脱ぎ、着席した状態でタスクを 実行した. 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. 前調査と同様に、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)×10(被験者)×3(タッチ)=270 回である.

図 6 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.このグラフ の横軸は,図 1 におけるインピーダンス Z 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 6 に示したグラフ内の実線は,測定結果を式 (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 Ω から内部インピーダ



図 6 抵抗値に対する流出電流の平均値. E は式 (1) に おける起電力を, R は内部インピーダンスを示す.

0.45	0.40	0.39	0.42	0.39	0.38	0.41	0.39	0.39	0.42
0.39	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.40
0.39	0.34	0.33	0.33	0.33	0.34	0.34	0.33	0.33	0.41
0.39	0.33	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.39
0.38	0.34	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.39
0.40	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.43
0.44	0.41	0.41	0.41	0.41	0.39	0.39	0.37	0.41	0.44

Trackpad: 105mm x 75mm

図 7 タッチ位置ごと (横 10×縦 7 分割)の 流出電流の平均値.

ンス値程度が Z の測定範囲の目安になるであろう.

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. 曲線当てはめの結果から内部 インピーダンス値 R は 64kΩであった. 実測の誤差 については、75kΩ以下の範囲で最大誤差は 3.8%で あった. よって本方式では 75kΩ以下において 96%程 度の精度で抵抗値を推定可能であると言える.

3.4 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 調査と同様に,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)=700回である.

タッチ位置ごとの流出電流の計測結果の平均値を図 7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.本実験に用いたラップトップ PC において, タッチサーフェスの縁周辺部は筐体の金属部と接して いる.そのため、タッチサーフェスの縁周辺でのタッ チ入力時には、タッチペンと筐体のカップリングに より流出電流が増加した可能性があると考えられる. また、タッチサーフェスの縁周辺部は中央部と比較し 電極の交点が少なく、この要因が流出電流の計測に影 響を与えた可能性がある.以上から、タッチサーフェ スの縁付近においては値の補正を行うことが望まし いと言える.

4 応用例

予備調査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 60Hz であり,過去 5 値を平均し平滑化した.本節で紹介するオブジェクト 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 (ZOR-TRAX) を用いた.図 8 (b) は銀ナノ粒子インクを用 い,銀ナノ粒子インク専用紙へ印刷した.

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、タッチサーフェスにおける AC アダプタ/バッテリーの使用切り替えなど、グラ ンド状況が変化した場合には再度キャリブレーション を行う必要がある.また、多くのタッチサーフェスに おいては意図しないタッチ入力や時間的に変化する電 気的なノイズをタッチ入力として検出しないことを目 的として、適応的なフィルタリングを内部的に行って いると考えられる[39][34].そのため、後述するセン シングオブジェクトのような、長時間タッチサーフェ スの上へ設置するオブジェクトについては、一定時間 ごとにキャリブレーションが必要であるといえる.



図 8 (a) 導電性 ABS フィラメント (表面抵抗率 10³Ω -10⁵Ω/sq) を用いて造形したタッチバー, (b) 銀ナノ粒子インク (表面抵抗率 0.2Ω/sq) を 用いて印刷したシート.

4.1 タッチ領域拡張インタフェース

図 8 (a) 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1点に接触させた状態で,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1次元パラメータ操作を可能 とする. 図 8 (b) 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列に設置すれば,ポインティ ング等の2次元的な操作へと拡張可能である.

また,図9(a)は半球体を,(b)は凸凹のある地形 を非導電性フィラメントにより造形し,その内部に, 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形状の異なる オブジェクトを乗せた際にもオブジェクトのタッチ箇 所の高さを推定することが可能となる.

図 10 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がいずれの円柱であるかお よび,タッチした円柱のタッチ箇所(高さ)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 タッチ箇所の情報が利用可能となる.

4.2 電子部品を組み込んだペイントツール

図 11 は様々な抵抗値の固定抵抗器を,図 12 (a) は 可変抵抗器を,(b) 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,(c) は可変抵抗器を組み



図 9 (a) 半球状のオブジェクトおよび (b) 内部構造, (c) 地形のオブジェクトおよび (d) 内部構造.



図 10 (a) 3 点のタッチ点を持つオブジェクト および (b) 内部構造.

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.図11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.また、本タッ チペンは複数人で用いればユーザの識別に利用するこ とも可能である.図12(a)は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、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.図12(b)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.図12(c)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.

4.3 インタラクティブな可変玩具

図 13 (a) は曲げセンサを,(b) 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. (a) は、人形をお辞儀させるように曲げることで,(b) 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.これらの人形の



図 11 固定抵抗器 (10 kΩ, 50 kΩ, 100 kΩ) を 内蔵したタッチペン.



図 12 (a) 可変抵抗器 (0kΩ-100kΩ) および
(b) 感圧センサ (FSR402, 10kΩ-10MΩ)
を内蔵したタッチペン;
(c) 可変抵抗器 (0kΩ-100kΩ) を内蔵した
ダイヤル型オブジェクト.



図 13 (a) 曲げセンサ (25 kΩ−60 kΩ) および (b) 感圧センサ (FSR402, 10 kΩ−10 MΩ) を内蔵した柔軟なオブジェクト.

変形具合をセンシング可能なアプリケーションを試作 した.

4.4 センシングオブジェクト

図 14 (a)(b) は、PUCs [39]の原理を応用したオブ ジェクトである.PUCs は、電気的に接続した 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.(a) 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



図 14 (a) 温度センサ (サーミスタ, 0.8 kΩ-330 kΩ) および (b) 光センサ (CdS Cell, 10 kΩ-1 MΩ) を内蔵したオブジェクト.

め, MediaCup [4] のように液体の存在の検知および 液体の温度が推定可能である. (b) 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について, タッチサーフェス上に置くだけでタッチサーフェスは 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 応用も検討可能である.

5 関連研究

5.1 流出電流値を利用したインタラクション

タッチサーフェスにおける流出電流値と相関のある 値を連続的に利用したインタラクション手法は多く 提案されている. これらは、指とタッチサーフェス間 の静電容量の変化に着目し、指の接触面積を推定す る [3] [1], 指の pitch · yaw 回転方向への連続的な動き を推定する[35],手や耳など身体の一部をタッチサー フェスへと接触させ、接触面全体の静電容量のデータ を個人認証に用いる[12][8]、スマートフォンなどの小 型のタッチサーフェスにおいて縁周辺部の計測する静 電容量のデータから、タッチサーフェスの把持状態を 推定する[19] などの目的で用いられている. これらの 手法のうち[35][12][8][19] は Android のカーネルを書 き換え、デバッグ用のインタフェースを用いることで タッチ時にグラウンドへ流出する高周波と相関のあ る値を取得している、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が. OS に変更を加えることなく取得可能な値を用いる点 において有用性が高い.

Flexibles [31] 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、タッチサー フェス上でこれに力を加え、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.提案手法においては、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言える。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 13 (a)(b) 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. さらに、Flexiblesの構造と提案手法を組み合わ せることで、より複雑な変形のセンシングが実現しう ると筆者らは考えている.

上記で挙げた先行研究においては、いずれも各 OS における流出電流値と相関のある値を取得することで 実現している.しかし、該当の値については静電容量 成分の与える影響についてのみ記載されており、該当 の値が流出電流値であることを確認し、明示的に利用 したという報告はされていない.本論文においては、 OS のタッチドライバから流出電流値と相関のある値 を取得可能であることを明らかにした上で、明示的 にインピーダンスの抵抗成分を用いたインタラクショ ン手法を提示した.

5.2 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[18][7][13][36]. これら は、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気的に接続された導 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することを利用している. また、 Off-Line Sensing[30] においては、内部に液体を注入 した絶縁体のオブジェクトの変形や回転の状態を取 得する手法が提案されている.これは、オブジェクト へのユーザ動作により内部の液体が移動することで、 オブジェクトに設置された2つの電極間が液体で満 たされ、通電することを利用している.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、タッチ点の 組み合わせ、オブジェクトの回転角、タッチサーフェ ス上での2次元座標に応じた操作およびタッチ発生 有無に応じた状態識別などに限定されている.提案 手法は、オブジェクトの電気的特性に応じ、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.す なわち、図10の応用例のように、前述した手法([18] [7] など)を拡張可能である.

5.3 タッチ領域の拡張

タッチ領域の拡張を目的とし、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][10][40][21] やシート[41] をタッチサーフェス上 で用いることでタッチ入力を発生させるインタフェー 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次元の入力を行うシー ト[41] ならば,図8(b) で示したように2次元の入力 が可能である。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[10][40] ならば,図9 で示したように高さ方向の値 が取得可能なため3次元の入力が可能である.

Clip-on Gadgets [37] は、前述したタンジブルなオ ブジェクトと同様のタッチ発生手法を用いた、タッ チサーフェス取付け型のウィジェットである.また、 筆者らの提案した Ohmic-Extension [38] においては、 タッチサーフェス上からグランドへと至る回路に抵 抗部品を組み込むことで Clip-on Gadgets のような ウィジェットにも Ohmic-Touch を適用可能であるこ とを確認している.

5.4 周波数特性の利用

生体インピーダンスの周波数特性を利用して,物 体の把持状態[29] やユーザ識別[9] を行う手法が提案 されている.これらの手法では,人がタッチする導電 体に周波数掃引した交流電圧を印加し,インピーダ ンスの周波数特性パターンを取得して分類している. 本研究では市販のタッチサーフェスのみを用い,単一 の周波数にてインピーダンス計測を行った.

6 議論

6.1 流出電流値の取得

本論文で報告したアプリケーションは、流出電流 と相関のある値を private framework を用いて取得 可能な macOS の開発環境にて実装した。同様の値は Synaptics のタッチドライバを搭載した Windows か らも取得可能であるが^{†6}, iOS においては一般に公 開されていない. Android においてはカーネルを書 き換え、デバッグ用のインタフェースを用いることで 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[31][12][8][19][35] が知られている. また, Android の公開 API における MotionEvent の size プロパティからも流出電流と相関のある値を取 得可能であり^{†7}.これを利用したインタラクション 手法も提案されている[32]. しかし、前述のカーネル ハックの手法においては画面をグリッド状に分割し, 各グリッドにおける流出電流と相関のある値を取得可 能であるのに対し. MotionEvent の size プロパティ からは OS によりタッチ点と認識された1点における 値のみを取得可能であるなどの制約がある.

静電容量と電気抵抗の双方がインピーダンスに影

^{*6} SynDeviceCtrl (Synaptics Device control) reference, ZRaw プロパティ. 筆者らは確認に Vaio Ultrabook SVT13139CJS を用いた.

^{†7} 確認には Samsun Galaxy SII SC-02C および Huawei Mate S(感圧タッチ非対応モデル)を用いた. 感圧タッチ対応のタッチサーフェス (Samsun Galaxy Note 8 など)においては、感圧に該当する値が size プロパティに割り当てられている場合があり、そうし た機種においては size プロパティから流出電流値を 取得することができない。

響することを考慮すると、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提案手法は広く適応可能と考えられる.また、筆者らは Microchip 社のタッチセンサ開発ツール (DM160219) においても提案手法が動作することを確認しており、本論文における実装・評価に用いた相互容量方式のタッチサーフェスにおいても適用可能であることを示唆している.

6.2 流出電流値に影響を与える諸要因

本論文における調査ではラップトップ型コンピュー タ1 機種のタッチサーフェスのみを対象に実施した. しかし,電極間の静電容量は電極のサイズ・形状,配 置間隔,電極間に存在する絶縁体の誘電率などによ り変化し[6][22],流出電流に影響を及ぼす.こうした 要素はタッチサーフェスごとに異なると推察されるた め,タッチサーフェスごとのキャリブレーションが必 要であると考えられる.

本論文における調査はグランド条件を統一し実施 した.しかし、被験者の姿勢(着席/起立)、被験者の 身体の一部が筐体に触れているか否か、靴の着脱状況 や PC の駆動状況 (AC アダプタ/バッテリー) などの グランド条件が、流出電流の計測に僅かに影響するこ とを確認している.多様な使用状況が想定されるモバ イルデバイスにおいては、グランド条件による影響が ラップトップ/デスクトップ PC と比較し大きくなると 推察される. グランド条件の変化による流出電流の値 は、デバイスの把持状態 [5] [26] の推定手法や歩行/着 席などの状況推定に基づき補正することで誤差を低減 できると考えられる. また、本論文の Ohmic-Touch で提案したインタフェースの機構はタッチサーフェス 上のタッチ点からグランドへと至る経路に人体を含む が、筆者らの提案する Ohmic-Extension [38] のよう に,経路に人体を含まずオブジェクトを直接筐体のグ ランドへと接続することで、流出電流値の推定精度を 高めることが可能であると確認している.

オブジェクトとタッチサーフェスおよび指の接触面 積は流出電流に影響することが観察された.オブジェ クトとタッチサーフェスの接触面積について、本論文 にて提案したオブジェクト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 ン先を利用し、一定の接触面積を保つ工夫を行った. また、複数の接触接点を持つオブジェクトは、各接点 の接触の条件を揃えるため、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 9 (a)(b)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.

オブジェクトと指の接触面積によって接触箇所の抵 抗値は変化する.例を挙げると,応用例で示したタッ チバーに指で軽く触れる場合と強く触れる場合では, 指の変形により接触面積が変化する.これに伴いタッ チバー表面および指の表皮の接触箇所における抵抗 値が変化する.流出電流値への影響を低減するにはオ 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,接触面積を一定に保 つ工夫が必要であると考えられる.

7 まとめと今後の展望

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可能であり、本論 文ではその応用例を 13 種類提示した.さらに、OS に変更を加えることなく、市販のタッチサーフェスに て動作する点において提案手法は高い有用性があり、 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.

今後はユーザ人体や筐体のグランド状況の与える流 出電流への影響調査を行い,詳細なキャリブレーショ ン条件を明らかにする.また,タッチサーフェス上の タッチ点からグランドへ至る経路に人体を含まない機 構を利用し,より高い精度で流出電流の推定を目指す とともに,提案手法を適用する際の諸条件を調査す る. さらに,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.

これまでに提案されてきた多くの静電容量方式タッ チサーフェスを用いたインタフェース [31] [2] [41] [40] は容量成分のみに着目し,直流抵抗成分の及ぼす影 響について十分な検討がなされていない.しかし,本 論文で解説したように,静電容量方式タッチサーフェ スは,タッチ点からグランドへ至る経路の容量成分の みでなく,直流抵抗成分を含めたインピーダンス値を 計測している.そのため,本来であれば直流抵抗成分 を含めたインタフェース設計が必須と言えよう.本論 文が今後の新たな"静電容量方式タッチサーフェスを 利用したインタフェース"を設計する上での参考とな ることを期待する.

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 17J02834 および 26330219 の助成を受けたものである.

参考文献

- [1] Boring, S., Ledo, D., Chen, X. A., Marquardt, N., Tang, A. and Greenberg, S.: The Fat Thumb: Using the Thumb's Contact Size for Single-handed Mobile Interaction, In *Proceedings of the 14th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '12, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 39–48.
- [2] 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, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 2189–2192.
- [3] FingerMgmt: http://blog.sendapatch.se/2009/ november/multitouch-on-unibody-macbooks.html.
- [4] Gellersen, H.-W., Beigl, M. and Krull, H.: The MediaCup: Awareness Technology Embedded in a Everyday Object, In Proceedings of the 1st International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing, HUC '99, London, UK, UK, Springer-Verlag, 1999, pp. 308–310.
- [5] Goel, M., Wobbrock, J. and Patel, S.: GripSense: Using Built-in Sensors to Detect Hand Posture and Pressure on Commodity Mobile Phones, In Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '12, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 545–554.

- [6] Grosse-Puppendahl, T., Holz, C., Cohn, G., Wimmer, R., Bechtold, O., Hodges, S., Reynolds, M. S. and Smith, J. R.: Finding Common Ground: A Survey of Capacitive Sensing in Human-Computer Interaction, In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 3293–3315.
- [7] 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, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 21– 26.
- [8] 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, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 59–62.
- [9] Harrison, C., Sato, M. and Poupyrev, I.: Capacitive Fingerprinting: Exploring User Differentiation by Sensing Electrical Properties of the Human Body, In Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '12, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 537–544.
- [10] Heller, F., Voelker, S., Wacharamanotham, C. and Borchers, J.: Transporters: Vision Touch Transitive Widgets for Capacitive Screens, In *Extended Abstracts of the 2015 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 1603–1608.
- [11] Holman, D., Fellion, N. and Vertegaal, R.: Sensing Touch Using Resistive Graphs, In *Proceedings of* the 2014 Conference on Designing Interactive Systems, DIS '14, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 195–198.
- [12] 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, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 3011–3014.
- [13] Ikematsu, K., Sasagawa, M. and Siio, I.: 2.5 Dimensional Panoramic Viewing Technique Utilizing a Cylindrical Mirror Widget, In *Proceedings of the* 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16 Adjunct, New York, NY, USA, ACM, 2016, pp. 145–146.
- [14] Ikematsu, K. and Siio, I.: Ohmic-Touch: Extending Touch Interaction by Indirect Touch Through Resistive Objects, In *Proceedings of the* 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp. 521:1–521:8.

- [15] Jesse, B., Nicholas, F., Paul, S. and Roel, V.: PrintPut: Resistive and Capacitive Input Widgets for Interactive 3D Prints, In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction*, INTERACT '15, 2015, pp. 332–339.
- [16] Karataş, C. and Gruteser, M.: Printing Multikey Touch Interfaces, In Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 169–179.
- [17] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B. S., Zhang, C. and Abowd, G. D.: Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices, In *Proceedings of the* 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '13, New York, NY, USA, ACM, 2013, pp. 363–372.
- [18] Kratz, S., Westermann, T., Rohs, M. and Essl, G.: CapWidgets: Tangile Widgets Versus Multitouch Controls on Mobile Devices, In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, New York, NY, USA, ACM, 2011, pp. 1351–1356.
- [19] 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*, Mobile-HCI '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 100:1–100:8.
- [20] Ledo, D., Anderson, F., Schmidt, R., Oehlberg, L., Greenberg, S. and Grossman, T.: Pineal: Bringing Passive Objects to Life with Embedded Mobile Devices, In *Proceedings of the 2017 CHI Conference* on Human Factors in Computing Systems, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 2583–2593.
- [21] Liang, R.-H., Chan, L., Tseng, H.-Y., Kuo, H.-C., Huang, D.-Y., Yang, D.-N. and Chen, B.-Y.: GaussBricks: Magnetic Building Blocks for Constructive Tangible Interactions on Portable Displays, In *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, New York, NY, USA, ACM, 2014, pp. 3153–3162.
- [22] Mayton, B., LeGrand, L. and Smith, J. R.: An Electric Field Pretouch system for grasping and comanipulation, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2010), pp. 831–838.
- [23] Moad, M. F.: On Thevenin's and Norton's Equivalent Circuits, In *IEEE Trans. on Educ.*, Vol. 25, No. 3(1982), pp. 99–102.
- [24] Nakamaru, S., Nakayama, R., Niiyama, R. and Kakehi, Y.: FoamSense: Design of Three Dimensional Soft Sensors with Porous Materials, In Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 437–447.
- [25] Oh, H., Ta, T. D., Suzuki, R., Gross, M. D.,

Kawahara, Y. and Yao, L.: PEP (3D Printed Electronic Papercrafts): An Integrated Approach for 3D Sculpting Paper-Based Electronic Devices, In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp. 441:1–441:12.

- [26] Ono, M., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Touch & Activate: Adding Interactivity to Existing Objects Using Active Acoustic Sensing, In Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '13, New York, NY, USA, ACM, 2013, pp. 31–40.
- [27] Parzer, P., Sharma, A., Vogl, A., Steimle, J., Olwal, A. and Haller, M.: SmartSleeve: Real-time Sensing of Surface and Deformation Gestures on Flexible, Interactive Textiles, Using a Hybrid Gesture Detection Pipeline, In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 565–577.
- [28] Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '02, New York, NY, USA, ACM, 2002, pp. 113–120.
- [29] Sato, M., Poupyrev, I. and Harrison, C.: Touché: Enhancing Touch Interaction on Humans, Screens, Liquids, and Everyday Objects, In *Proceedings* of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12, New York, NY, USA, ACM, 2012, pp. 483–492.
- [30] Schmitz, M., Herbers, M., Dezfuli, N., Günther, S. and Mühlhäuser, M.: Off-Line Sensing: Memorizing Interactions in Passive 3D-Printed Objects, In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp. 182:1–182:8.
- [31] 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, New York, NY, USA, ACM, 2017, pp. 1001–1014.
- [32] Takada, R., Isomoto, T., Yamada, W., Manabe, H. and Shizuki, B.: ExtensionClip: Touch Point Transfer Device Linking Both Sides of a Smartphone for Mobile VR Environments, In *Extended Abstracts* of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '18, New York, NY, USA, ACM, 2018, pp. LBW607:1–LBW607:6.
- [33] Umetani, N. and Schmidt, R.: SurfCuit: Surface-Mounted Circuits on 3D Prints, In *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol. 38, No. 3(2017), pp. 52–60.
- [34] Voelker, S., Cherek, C., Thar, J., Karrer, T., Thoresen, C., Øvergård, K. I. and Borchers, J.: PERCs: Persistently Trackable Tangibles on Capacitive Multi-Touch Displays, In *Proceedings of*

the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software Technology, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 351–356.

- [35] 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, New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 47–50.
- [36] Yu, N.-H., Chan, L.-W., Lau, S. Y., Tsai, S.-S., Hsiao, I.-C., Tsai, D.-J., Hsiao, F.-I., Cheng, L.-P., Chen, M., Huang, P. and Hung, Y.-P.: TUIC: Enabling Tangible Interaction on Capacitive Multi-touch Displays, In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, ACM, 2011, pp. 2995–3004.
- [37] 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, New York, NY, USA, ACM, 2011, pp. 367–372.
- [38] 池松香,尾崎保乃花,椎尾一郎: 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,情報処理学会インタラク ション 2018, pp. 998–1003.
- [39] 中島康祐, 伊藤雄一, Voelker, S., Thoresen, C. B., Øvergård, K. I., Borchers, J.: 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 2015, pp. 329–337.
- [40] 加藤邦拓,山中祥太,宮下芳明:2次元のタッチ操作 を可能とする 3D オブジェクト,情報処理学会論文誌 2018, pp. 670-680.
- [41] 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 2016, pp. 9–18.
- [42] 高田崚介, 志築文太郎, 高橋伸: GROVE: 導電繊維 編み込み手袋を用いた手形状計測手法, 日本ソフトウェ

ア科学会, インタラクティブシステムとソフトウェア研 究会, WISS2017, pp. 77-82.



池松 香

2015年3月お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科博士前期課 程修了.同年より同研究科博士後期 課程在籍.2017年4月より日本学術

振興会特別研究員 DC2. 情報処理学会および ACM 学生会員.



椎尾一郎

1979年3月名古屋大学理学部物理学 科卒業.1984年3月東京工業大学大 学院総合理工学研究科博士課程修了. 同年4月,日本アイ・ビー・エム株

式会社東京基礎研究所に入社. マルチメディアシス テム,オフィスシステムなどのユーザインタフェース の研究に従事. 1997 年 4 月玉川大学工学部助教授を へて 2002 年 4 月教授. 2001 年 4 月~2002 年 3 月 ジョージア工科大学客員研究員. 2005 年 4 月よりお 茶の水女子大学理学部情報科学科教授. 2007 年 4 月 組織変更によりお茶の水女子大学人間文化創成科学 研究科教授,実世界指向インタフェース,ユビキタス コンピューティングを中心に研究. 情報処理学会,ソ フトウェア科学会,ヒューマンインタフェース学会, ACM 各会員. 工学博士.