

# サーフェスにおける引っ張り入力を実現する インタフェースの検討

前田 竜矢<sup>1,a)</sup> 伊藤 弘大<sup>1,b)</sup> 桑山 佳汰<sup>2,c)</sup> 藤田 和之<sup>3,d)</sup> 伊藤 雄一<sup>1,e)</sup>

**概要：**現在、多くの機器の入力インタフェースとして、タッチサーフェスが利用されている。タッチサーフェスの多くは、出力画面に触れることで入力ができるため、直感的な操作が可能であるという利点があるが、入力面の柔軟性は低く、入力可能な操作はタッチやスワイプなどの平面的なものに限られている。これに対し、HCI の分野では、入力可能なインタラクションを増やす研究が盛んである。しかし、これらの多くは、押し込み操作に限られていた。そこで、本研究では、既存の静電容量方式のタッチサーフェスに取り付けることで引張操作を可能とする、ゴムチューブインタフェースを提案する。このインタフェースは、ゴムの引張強度に応じて内部の抵抗値が変化するため、タッチサーフェスの計測する流出電流値の変化を計測することで、引張動作の検知が可能となる。今回は、実装したインタフェースを用いて、引張強度推定精度と引張方向推定精度を評価した。その結果、4段階の引張強度分類と、平均誤差 4.73° での引張方向推定が可能であることが示された。

## 1. はじめに

スマートフォンやタブレット端末、スマートウォッチといったタッチサーフェスの普及は著しく、今日の日常生活においてなくてはならないものとなっている。しかし、現在一般的に使用されているタッチサーフェスは柔軟性がない平面上のものが多く、サーフェスに対して可能な操作は平面上での入力に留まっている。したがって、3次元の情報扱うのは困難であり、日常のものに対して行う、「押す・引く・つまむ・曲げる」等の操作を直接サーフェスに対して行うことはできない、といった課題が存在している。

これに対し、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション (HCI) の分野では、一般的なタッチサーフェスに対して、認識可能な入力操作の追加や入力可能な領域を拡張することで、上記課題の解決を図る研究が盛んである。特に、タッチサーフェスに様々な物理的・物理的特性を持つ拡張機器を、タッチサーフェスに取り付けることで、拡張機器の物理的特性を活かした入力を可能とする研究が数多く検討されている。これにより、入力領域の拡張や、操作

時に力覚フィードバックのあるボタン、アイソメトリックなジョイスティック、圧力の入力、曲げの入力、せん断力の入力が可能となっている [1-6]。特に、Schmitz らが提案した Flexibles では、導電性の素材を含んだインタフェースを静電容量式タッチスクリーン上で操作することで、インタフェースへの押し込み操作以外に、つまむ動作や、入力面に対して水平な方向に傾ける動作の検出を可能としている。こういった研究により、既存のタッチサーフェスへの入力モダリティは大きく拡張されているが、これらのほとんどが入力面に対して圧力がかかる操作、つまり、押し込み操作に限られていた。

これに対し、本研究では入力面から垂直な方向に遠ざかる力をタッチサーフェスへの入力として扱うことを考える。なかでも、ドアを引く、ペットとの散歩でリードを引くなど日常でも一般的な動作である、「引っ張る」操作に着目する。タッチサーフェスに引張操作を入力可能とする。デジタル空間内で上記のような引張操作を行う際に、日常で行う時と同じような感覚（引張に応じた力覚フィードバック）を与えることが可能となる。また、現在のコンピュータの操作において引張や吸出しのようなメタファはあまり使われておらず、ドラッグ&ドロップのような既存の動作にこのような操作を追加することで、より直感的な作業が可能になると考えられる。そこで本研究では、既存の投影型静電容量方式のタッチサーフェスに取り付けることで、入力面に対して垂直手前方向への引張操作

<sup>1</sup> 青山学院大学 大学院理工学研究科

<sup>2</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科

<sup>3</sup> 東北大学 電気通信研究所

a) maeda.tatsuya@x-lab.team

b) kodai.ito@it.aoyama.ac.jp

c) kuwayama.keita@ist.osaka-u.ac.jp

d) k-fujita@riec.tohoku.ac.jp

e) itoh@it.aoyama.ac.jp

を可能とするインタフェースを提案する。インタフェースは引張を可能とするためのゴムと、タッチサーフェスにインタフェースを固定するための吸盤を組み合わせたものとなっており、引張時のインタフェースの電気的特性（抵抗値）の変化を、静電容量方式タッチサーフェスのセンサで捉えることで、引張操作の認識を可能にする。

本稿では、既存のタッチサーフェスに取り付けることで引張操作を可能とするゴムチューブインタフェースを提案、実装し、このシステムを用いて、引張強度推定精度と引張方向推定精度の評価を行う。

## 2. 関連研究

### 2.1 タッチサーフェスの入力モダリティを拡張する研究

タッチサーフェスは今日もっとも一般的な入力インタフェースの1つである。タッチサーフェスは入力面への指やスタイラスの接触を検知するが、その検知手法は様々である。例として、抵抗膜方式や光学方式、圧力検知方式などがあげられるが、多くのタッチサーフェスで採用されているのが、投影型静電容量方式である。HCIの分野では、投影型静電容量方式のタッチサーフェスの入力モダリティを拡張する研究が盛んである。その例として、サーフェス内部のタッチセンサのセンサ値やそれらの2次元パターンを利用することで、追加のインタフェースなどを一切用いずに、認識可能なインタラクションを増やす研究が存在する。Kumarらは、CNN（畳み込みニューラルネットワーク）を利用して静電容量画像とタッチ位置の関係を学習することで、元々実装されているタッチ推定よりも、タッチ位置推定の精度を23.0%を向上させた[7]。Streliらは、CNNに加えてGAN（敵対性生成モデル）を用いた学習を行い、タッチ位置だけでなく、サーフェスに接触するタッチ面を推定している[8]。また、Mayerらは生物学や天文学の分野で用いられてきた、画像の高解像度化技術を利用することで、細かいタッチ領域の検出を可能としている[9]。これらの研究はタッチの位置や領域、角度やタッチした物体の性質など、入力の詳細な情報を手に入れることに成功しているものの、タッチサーフェスの形状や材質等を物理的に変更しているわけではないため、入力可能な操作は、柔軟性のない2次元平面上で行えるものに限られている。

これに対して、底面に導電パターンを配したタンジブルオブジェクトを置くことで、そのオブジェクトの動きを入力として用いたり、置かれたオブジェクトが何であるかを識別する研究が存在する。Kratzらは静電容量方式タッチサーフェス上でスライドや回転をさせることでコントローラとして用いることが可能なノブ型のタンジブルウィジェットである、CapWidgetsを提案している[10]。CapWidgetsの底面には通常の指によるタッチと識別可能な導電パターンを配しており、このパターンの位置や動きを検出することで、通常のタッチとは別の操作を割り当

て、様々なインタラクションを可能にしている。Voelkerらは、人がタッチしていなくてもサーフェス上で認識可能なPUCsというTUI（タンジブルユーザインタフェース）を提案している[11]。PUCsには複数のタッチ点が存在しており、あるタッチ点がサーフェスによってセンシングされている時には他のタッチ点がGNDとなるという機構を有している。そのため、人体によるタッチがなくとも、オブジェクトのみでのタッチ認識を可能にした。

これらの研究が示すように、指以外のオブジェクトもタッチサーフェスで認識可能にする研究は盛んであり、インタラクションの幅が広がっていることも分かる。しかし、これらの研究では、サーフェス上のオブジェクトに対して可能なインタラクションは少なく、オブジェクトへのタッチや、オブジェクトのスライドといった操作以外はほとんど不可能であった。これに対し、様々な物理的・物理的特性を持つタンジブルオブジェクトを既製のタッチサーフェスに配置、または装着することで、そのオブジェクトを新たな入力空間とする研究も存在する。Katoらの研究では、タッチ入力を転送できるストライプパターンのステッカー、Extension Stickerを提案している[1]。このステッカーをタッチパネルに貼ると、ステッカー上でのタッチ入力やスクロールといった動作を可能にする。Ikematsuらは、タッチサーフェス上に配置したタンジブルオブジェクトの抵抗成分が、サーフェスからオブジェクトを通してGNDに流出する電流値に影響を与えていることに着目し、サーフェス上に配置したタンジブルオブジェクト表面へのタッチ入力を実現している[3,4]。

これらのように、タッチサーフェスの入力モダリティを拡張する研究は多くあるものの、これらのほとんどが入力面に対して圧力をかける操作であり、サーフェス面から垂直に遠ざかる方向に力がかかるインタラクションには、これまで焦点が当てられてこなかった。堀らは指を他の指で擦り上げることで、スポイトによる吸出しのような操作を実現したが[12]、入力面から遠ざかる方向のインタラクションは、吸出しの他にも引っ張る操作などが考えられる。引張は、日常でも一般的な動作であり、ドアを引く、ベットとの散歩でリードを引く、弓を構えて引くなど様々な場面で行うものである。引張のほかにも、曲げやひねりなど、リジッドなサーフェスでは行えないインタラクションは多い。

### 2.2 フレキシブルなUIに関する研究

先述のような問題を解決するため、坂本らが提案した、ゴムをつまんだり、ひねったりする操作を可能にしたWrinkleSurfaceや[13]、BoemらのNon-Rigid HCI[14]、そして1章でも述べたFlexiblesなど[5]、柔軟な素材を用いて製作されたフレキシブルなユーザインタフェースを適用する研究が盛んに行われている。これらのフレキシブルな

インタフェースにより、マウスやキーボード、タッチサーフェスといったリジッドなユーザインタフェースでは不可能である、曲げる、ひねる、押し込む、引っ張るといった操作が可能となる。フレキシブルなインタフェースは、リジッドなインタフェースと比較して、入力可能な空間を拡張し、現実で物体を操作するときのメタファを、デジタル空間とのインタラクションで利用できるといった利点がある。また、ゴムなどの柔軟性ととも弾性を持つ素材を用いて作成されたインタフェースは、操作時に操作強度に応じた力覚フィードバックがあるため、アイソメトリックな入力デバイスに向いていたり、操作時に視覚的な注意を払わなくても操作しやすくなる。

本研究と同様に、柔軟な素材の引張を検出する研究には、Shahmiri らが提案した、Serpentine がある [15]。Serpentine は、さまざまな入力を感じ取可能な、柔軟なコード型のセンサである。ねじる・伸ばす・巻く・つまむなど柔軟な構造を活かした 6 種類の操作が可能となっている。他にも、Vanderlock らは、圧力をかけた際の変形を認識可能な柔らかなオブジェクト、Skweezees を提案している [16]。Skweezees の内部は柔らかい導電性の詰め物で満たされており、外部とつながる電極が多数配置された構造となっている。また、Sugiura らは IR LED とフォトトランジスタを利用して、ストッキングなどの薄い布の伸縮を検出する手法を提案した [17] が、これらはセンシングのために専用のコントローラや外部装置、外部電源が必要となる。そこで、本研究では日常的に使用しているスマートフォンをセンシング用の機器として用い、専用のコントローラ等が必要とならず、バッテリーも必要としないインタフェースの作成を目指す。

### 3. 提案手法

#### 3.1 提案システムの概要

本研究では、タッチサーフェス上で引張インタラクションを可能とするためのシステムを提案する。本システムの概要を図 1 に示す。本システムは、投影型静電容量方式のタッチサーフェスと、吸盤を用いてサーフェスに固定して引張操作を行うゴムチューブインタフェースの 2 つから成る。タッチサーフェスは、サーフェス内部のセンサが計測する流出電流値を用いて、タッチを検出している。このサーフェスと GND 間にある物体のインピーダンスが変化すると、センサが計測する流出電流値の値も変化する [3]。

ゴムチューブインタフェースの概要を図 2 に示す。ゴムチューブインタフェースは引張可能な部分であるゴムチューブと、サーフェスにインタフェースを固定するための吸盤から成っている。ゴムチューブの中には導電性インクが充填されており、ユーザの指から、吸盤のサーフェスに接触する面まで、電氣的に接続されている。充填されている導電性インクは、ある一定の電気抵抗率  $\rho$  を持つお

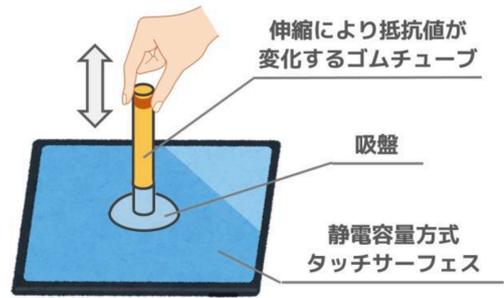


図 1 システムの概要

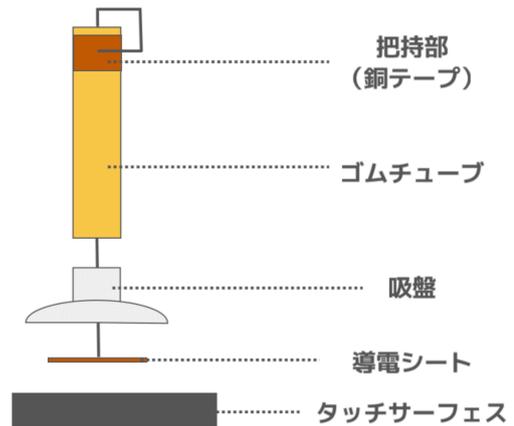


図 2 ゴムチューブインタフェースの概要



図 3 引張に伴う抵抗値の変化

り、ゴムチューブの穴の断面積を  $S(m^2)$ 、ゴムチューブの長さを  $L(m)$  とすると、ゴムチューブ内のインクによって形成される抵抗  $R(\Omega)$  は  $R = \rho \frac{L}{S}$  と表すことができる。ここでゴムチューブを  $L'(m)$  の長さまで引張ると、断面積は  $S$  よりも小さな  $S'(m^2)$  となる。この時点での抵抗  $R'$  は  $R' = \rho \frac{L'}{S'}$  となる。導電性インクの圧縮率は小さく、ゴムチューブの両端は塞がれているため、その体積はほとんど変化しないと考えられ、 $SL = S'L'$  と見なすことができる。これらの式から  $\frac{R'}{R} = (\frac{L'}{L})^2$  という関係性が得られる。つまり、抵抗  $R$  の変化率は、長さ  $L$  の変化率の 2 乗によって得られると考えられる。この変化の概念図を図 3 に示す。このように引張強度に従ってゴムチューブインタフェース内部の抵抗値が変化することにより、サーフェスで得られる流出電流値が変化する。この流出電流値の値を利用することで、引張操作の検知を可能にする。

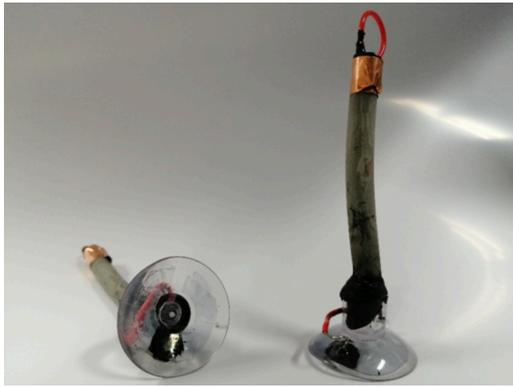


図 4 ゴムチューブインタフェースのプロトタイプ

### 3.2 プロトタイプの実装

上記の構成を元の実装したゴムチューブインタフェースのプロトタイプを図 4 に示す。ゴムチューブには内径 5mm, 外径 7mm のものを使用し, 導電性インクには Bare Conductive の SKU-0001 を用いた。導電性インクを充填する部分の長さは 5cm とした。ゴムチューブの両端から導線を挿入し, ゴム溶剤系接着剤で穴を塞いだ。このゴムチューブを 3cm の吸盤と組み合わせ, 接着剤で接着した。ゴムチューブの上部に銅テープを巻きつけて固定し, この銅テープとチューブの穴から伸びた導線をはんだ付けして, ゴムチューブ内部と電氣的に接続した。ゴムチューブインタフェースを操作する際はこの部分を把持することとした。だが, この状態では, ゴムチューブ内部の導電インクと吸盤の内側 (吸盤のサーフェスと接する側) が電氣的に接続されていない。そこで, 吸盤に導電シートを接着させ, その導電シートに吸盤の横穴から入れた導線を接続することで, 電氣的に接続するようにした。使用した導電シートは片側のみが導電性を持っているため, この導電面を吸盤側に向けて, 吸盤に接着した。また, 導電シートの面に導電性インクを塗ることで, 接続部分の接触抵抗を下げている。吸盤に接着した導電シートは, 内径 1.6cm, 外径 2.4cm のドーナツ形状のものを使用した。

今回のプロトタイプで使用したゴムチューブの長さや太さは, 予備実験より最も引張強度や引張方向推定の精度が高くなるように設定した。また, 導電シートの形状は, 予備実験により「2点」「3点」「四角」「円」「十字」「ドーナツ」の 6 形状の内から, サーフェスに対する垂直軸でのどの回転角度で固定してもタッチパターンが同じであり, 計測流出電流値を得られた「ドーナツ」形状を採用した。なお, 「円」形状も回転角度によらず同一のタッチパターンが得られるが, 予備実験では正常な流出電流値を得ることができなかった。これは静電容量方式のタッチサーフェスの仕様と関係しており, タッチ点が複数の平行する電極群を横断すると, 電流が意図しない経路で流出してしまい, 正常に流出電流値が計測できないことがあるとされている。これは PUCs [11] でも報告された現象で, PUCs では先述

した「3点」の形状で解決していた。今回の「ドーナツ」では中央部分が空いていることで, この問題が回避できたのだと考えられる。導電シートの大きさに関しては, 予備実験の結果から, 内径が 1.6cm 以上である必要があり, 外径が大きいくほど引張強度推定や引張方向推定の精度が高くなることが分かったため, 外形は吸盤に接着することができる最大の 2.4cm, 内径は 1.6cm のものを使用した。なお, このパラメータは 3.3 節で述べるタッチサーフェスで検証したものであり, タッチサーフェスの仕様, 特にキャパシタの配置密度によって異なると思われる。

### 3.3 使用したタッチサーフェス

本研究では, ゴムチューブインタフェースの操作を入力するための静電容量式タッチサーフェスとして, LG エレクトロニクス社製の Nexus5 を用いた。Nexus5 内部のタッチセンサ (ClearPad 3350) は縦横に送信電極, 受信電極が配置されており, 合計で 405 個 (15×27) のキャパシタが形成されている。これにより, 1つのキャパシタによって約 4mm 四方の平面的なタッチセンサを構成している。静電容量方式タッチセンサの生データは, Nexus5 のカーネルを書き換えることで取得した。

### 3.4 引張強度と引張方向の推定手法

まず, 引張強度推定の手法について説明する。3.1 節で記述した通り, サーフェスと GND 間にある物体のインピーダンスが変化すると, センサが計測する流出電流値が変化するため, タッチサーフェスと接地された導電体 (指) の間に, 「引張強度に応じて抵抗値が変化するゴムチューブインタフェース」を使用することで, サーフェスから得られる流出電流値を元に, インタフェースの引張強度を推定できる。具体的には, ゴムチューブインタフェースは, 引張強度が強いくほど内部の抵抗値が増加し, サーフェスで得られる流出電流値は減少するため, この値を利用することでインタフェースの引張強度を推定できる。

次に, 引張方向推定の手法について説明する。引張強度推定ではインタフェースの抵抗値による流出電流値の変化を利用したが, 引張方向推定では, 流出電流値だけでなく, その 2次元マップである静電容量画像を利用する手法を提案する。静電容量画像とは, センサの流出電流値を 2次元マップ化した画像のことで, タッチサーフェスを用いた様々なインタラクション取得手法に利用されている [5]。本研究で使用するタッチサーフェスでは, 3.3 節で述べたように横 15 個 × 縦 27 個のキャパシタが配置されており, 1つのキャパシタあたり約 4mm 四方の範囲をカバーしている。これらのキャパシタごとに, 流出電流値が -255~255 の値で得られる。本手法では, これを静電容量画像として利用する。インタフェース使用時に得られる静電容量画像の例を図 5 に示す。



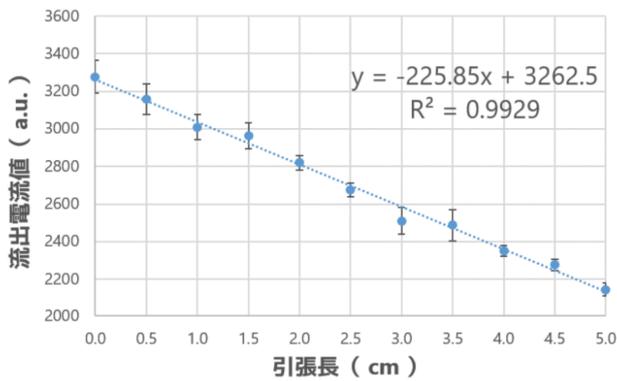


図 6 ゴムチューブの引張強度とサーフェスの流出電流値

#### 4.2.1 実験手順

実験は以下の手順にて行った。まず、ゴムチューブインタフェースをタッチサーフェスの中央部に取り付け、ゴムチューブインタフェースを把持し、キャリブレーションする。次に、ゴムチューブインタフェースを把持して、入力面に添って倒した状態で水平方向に引張り、引張した5秒間の流出電流値の平均値と、静電容量画像から得られる推定引張角度を記録した。引張方向は、サーフェスの入力面と正対した時の右方向を0度として、反時計回りに315度まで、45度刻みで8方向に引張を行った。また、引張する長さは、2cm、5cm、8cmの3種類である。同じ角度・同じ長さでの引張は各5回ずつ行い、総試行回数は120回(5回×8方向×3種類)であった。

#### 4.2.2 結果

実験結果を表1に示す。実験結果から、引張強度が大きくなるほど、推定角度の正確さは向上し、標準偏差は小さくなっていくことが確認できた。また、推定平均誤差は引張長が2cm、5cm、8cmの時それぞれ、16.94°、4.73°、2.31°であった。次に、引張した時の流出電流値の平均値は、2cm、5cm、8cmの時それぞれ、3203.6、2815.4、2373.2であり、標準偏差は73.5、36.4、45.5であった。ゴムチューブの長さは5.0cmであるため、入力面平行方向に2cm、5cm、8cm引張した時、ゴムチューブはそれぞれ、0.39cm、2.07cm、4.43cm伸びることになる。これらのゴムチューブの伸びによる流出電流値と、引張強度の実験で、入力面と垂直方向にゴムチューブを伸ばしたとき流出電流値を図7に示す。ゴムチューブインタフェースを入力面と水平に伸ばしたときの流出電流値の変化が、入力面と垂直に伸ばしたときの流出電流値の変化と、近い変化をしていることが分かる。つまり、引張方向によって静電容量画像内で流出電流値の分布は変化するが、その合計値はあくまでゴムチューブおよび導電性インクの引張強度のみに依存していると考えられる。したがって、本研究で提案したゴムチューブインタフェースは、その引張強度と引張方向を同時に推定可能であり、これらの複合操作も認識可能であることが分かった。また、これらの機序から、引張強度と引張方向の

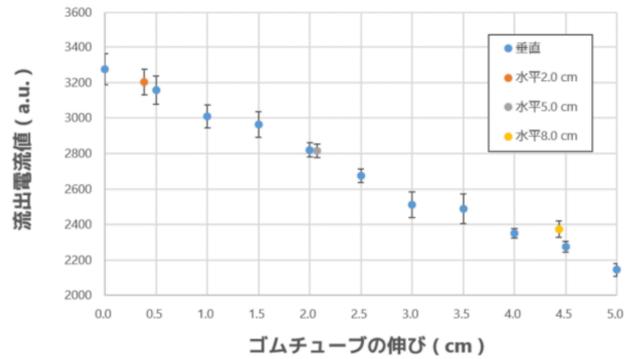


図 7 入力面水平方向に引張した際の流出電流値

操作順序によらず、どの順序で操作を行っても同様の結果が得られると考えられる。

## 5. 議論

### 5.1 提案手法について

今回提案したゴムチューブインタフェースは、吸盤の底面に接着させる素材として、任意の大きさや形状への加工のしやすさやメンテナンスの容易さから、導電シートを採用した。だが繰り返し使用すると、吸盤の底面に接着した導電シートがはがれてしまい、それにより吸盤の吸着力が落ちてしまうことが分かった。この問題の対処法として、新たな底面素材を検討することや、導電シートの接着方法を変更することが考えられる。

また、本手法は3.3節で述べたタッチサーフェスで検証を行っている。タッチサーフェスの静電容量画像の解像度やリフレッシュレートが低い場合、それに伴って本手法の精度も低下すると予想されるが、一般的な流出電流値が取得できるタッチサーフェスであれば、基本的には本手法が適用可能だと考えられる。

### 5.2 応用アプリケーションについて

本インタフェースの応用として、日常の引張インタラクションを模した操作の入力が考えられる。例として、パチンコや弓のような、弦を弾いてモノを飛ばすといった操作をゴムチューブインタフェースで行い、タッチサーフェスの画面内で射撃をするゲームが考えられる。本手法では、ほぼリアルタイムに引張強度や引張方向が認識可能であるため、弾を射出する強度や、方向も制御することもできる。これにより、ユーザーに対して引張に応じた力覚フィードバックを与えることが可能となる。

また、もう1つの応用として、引張インタラクションをメタファとして利用することで、タッチサーフェス画面内の情報を操作するアプリケーションが考えられる。例として、引張インタラクションを情報の吸引(すなわち、コピー操作)として使用することが挙げられる。何らかのファイルが存在する位置にゴムチューブインタフェースを

表 1 ゴムチューブインタフェースの推定角度と標準偏差

角度 (°)		0	45	90	135	180	225	270	315
2cm	推定角度 (°)	329.08	59.89	129.70	150.20	186.15	231.94	281.82	305.05
	標準偏差 (°)	10.68	10.77	17.72	6.50	6.80	10.46	9.29	4.71
5cm	推定角度 (°)	355.86	40.32	85.62	140.37	177.08	218.76	270.15	325.00
	標準偏差 (°)	2.22	3.17	7.85	3.43	3.74	2.95	4.72	2.73
8cm	推定角度 (°)	357.34	43.34	87.09	137.19	179.81	222.66	272.37	319.23
	標準偏差 (°)	1.83	2.24	4.19	2.09	3.63	2.10	3.91	1.97

固定して引張することで、そのファイルをコピーする。その後ゴムチューブインタフェースを取り外し、別の画面にゴムチューブインタフェースを取り付けることで、先ほどコピーしたデータをペーストするなど、物理的なメタファを用いた直感的な操作を割り当てることで、作業スピードの向上が可能になると考えられる。

### 5.3 人体インピーダンスの影響

本研究の評価実験は、筆者のうちの1人によって実施した。しかし、タッチサーフェスにタッチした際の静電容量変化は、サーフェスと人のGND状態や、タッチの状態（圧力や接地面積）の他、人体インピーダンスにも影響を受ける。そのため、同じGND状況、タッチ状態であっても、実験参加者ごとに流出電流値は異なる値となることが予想される。本研究では、同一ユーザが本インタフェースを用いた時のインタラクション精度の評価を目的としたため、同一人物によるデータを比較した。今後、異なる人体インピーダンスを持つ実験参加者でも同様に引張操作が認識可能であることを検証する予定である。

### 5.4 複合的な操作・その他の操作の可能性

今回提案したシステムでは、サーフェス平面に垂直な方向への引張の強度と、サーフェス平面に水平な引張の方向の2種類の操作の認識に留まっている。本研究の今後の方向性としては、引張以外の操作（例えば「ゴムをギュッとつまむ」「ゴムをひねる」といった操作）を可能にするというモダリティ拡張が考えられる。これにより多様な入力が可能になり、応用の範囲も広がる。これらの動作は他手法でも実現されているが、本手法を用いることで、引張強度の推定を同時に行うことができると考えられる。ただし、複合的な操作によって正しく推定できなくなる可能性がある。例えば、一部分を強くつまんだ状態と、全体を伸ばした状態を混同してしまうなどが考えられる。必要なインタラクションに合わせて、今回のような1つの一様なゴムチューブだけでなく、引張される部分の形状や、サーフェスに接触する部分の形状を工夫する必要がある。また、今回の引張強度・方向推定では、タッチサーフェス内部のセンサが計測した流出電流値とそこから得られた静電容量画像を用いていたが、これに加えて、SVMやDeepLearningといった機械学習によって、単純な処理では見つけられな

かった特徴量を利用することで、先述した複合的な入力モダリティの拡張を目指す。

### 5.5 オクルージョン

本研究で提案したゴムチューブインタフェースは、サーフェスへの固定に吸盤を用いている。ゴムチューブインタフェースをサーフェス表面に固定したとき、吸盤で画面が覆い隠されてしまう、オクルージョンの問題が発生する。画面の情報の視認性は悪くなり、さらに吸盤があることによって、この範囲の通常のタッチ入力も妨げられる。現在、ゴムチューブインタフェースの吸盤内に配置している導電シートは、ドーナツ形状になっている。予備実験の結果から、この内径は1.6cm以上である必要があり、外径が大きいほど引張強度推定や引張方向推定の精度が高くなるということが分かっているため、ドーナツ形状の導電シートを用いたゴムチューブインタフェースのこれ以上の縮小化は難しいと考えられる。導電シートの大きさをこれよりも小さくするための方法の1つは、より最適な導電シート形状を選定することが考えられる。様々な形状パターンを探索することで、少ない面積で本インタフェースの機構を再現可能なパターンが見つかる可能性がある。

## 6. まとめ

本研究では、既存の静電容量方式タッチサーフェスに取り付けることで、タッチサーフェス面から垂直に遠ざかる方向への引張力を入力可能にするシステムを提案した。提案するゴムチューブインタフェースは、その引張強度に応じて抵抗値が変化するように設計されており、この抵抗値の変化をタッチサーフェスからの流出電流値によって認識する。この流出電流値の大きさと、インタフェースを入力面に固定することによって生まれる静電容量画像を利用することで、新たなセンサや電源を用いることなく、入力面に取り付けられたインタフェースの引張強度および、引張方向の入力を可能にする手法を提案した。そして、実装したインタフェースを用いて、インタフェースの引張強度推定と引張方向推定の精度を調べる実験を行った。その結果、引張強度推定では1.5cm区切りの4段階の強度計測を高精度で推定可能であることが分かり、引張方向推定では、入力面と水平に5.0cmの引張時に、平均誤差4.74°の精度で推定することができた。さらに本手法では、多方向への引

張時でも、引張強度推定の機能を保持できることを確認できた。今後の展望としては、ゴムチューブインタフェースを利用した応用アプリケーションの開発や、認識可能なインタラク션을拡張することが挙げられる。今回提案したシステムでは、サーフェス平面に垂直な方向への引張強度と、サーフェス平面に水平な引張方向を推定することに留まっている。これを拡張して、引張以外の操作（例えば「ゴムをギュッとつまむ」「ゴムをひねる」といった操作）を可能にすることで、より多様な入力が可能になる。これらの動作は他手法でも実現されているが、本手法を用いることで、引張強度の推定も同時に行えると考えられ、応用の範囲も広がると考えられる。今回の引張強度・方向推定では、タッチサーフェス内部のセンサが計測した流出電流値とそこから得られた静電容量画像を用いていたが、今後はこれに加えて、SVMやDeepLearningといった機械学習を利用することで、上に述べたような入力モダリティの拡張を目指す。

**謝辞** 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H04228 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Kato, K. and Miyashita, H.: Extension Sticker: A Method for Transferring External Touch Input Using a Striped Pattern Sticker, *Adjunct Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14 Adjunct, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 59–60 (online), DOI: 10.1145/2658779.2668032 (2014).
- [2] 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, *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 367–372 (online), DOI: 10.1145/2047196.2047243 (2011).
- [3] Ikematsu, K., Fukumoto, M. and Siio, I.: Ohmic-Sticker: Force-to-Motion Type Input Device That Extends Capacitive Touch Surface, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1021–1030 (online), DOI: 10.1145/3332165.3347903 (2019).
- [4] Ikematsu, K. and Siio, I.: Ohmic-Touch: Extending Touch Interaction by Indirect Touch through Resistive Objects, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–8 (online), DOI: 10.1145/3173574.3174095 (2018).
- [5] Schmitz, M., Steimle, J., Huber, J., Dezfuli, N. and Mühlhäuser, M.: Flexibles: Deformation-Aware 3D-Printed Tangibles for Capacitive Touchscreens, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1001–1014 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025663 (2017).
- [6] Huang, M., Fujita, K., Takashima, K., Tsuchida, T., Manabe, H. and Kitamura, Y.: ShearSheet: Low-Cost Shear Force Input with Elastic Feedback for Augmenting Touch Interaction, *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 77–87 (online), DOI: 10.1145/3343055.3359717 (2019).
- [7] Kumar, A., Radjesh, A., Mayer, S. and Le, H. V.: Improving the Input Accuracy of Touchscreens Using Deep Learning, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–6 (online), DOI: 10.1145/3290607.3312928 (2019).
- [8] Strelj, P. and Holz, C.: CapContact: Super-Resolution Contact Areas from Capacitive Touchscreens, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3411764.3445621 (2021).
- [9] Mayer, S., Xu, X. and Harrison, C.: Super-Resolution Capacitive Touchscreens, *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3411764.3445703 (2021).
- [10] Kratz, S., Westermann, T., Rohs, M. and Essl, G.: CapWidgets: Tangible Widgets versus Multi-Touch Controls on Mobile Devices, *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1351–1356 (online), DOI: 10.1145/1979742.1979773 (2011).
- [11] Voelker, S., Nakajima, K., Thoresen, C., Itoh, Y., Øvergård, K. I. and Borchers, J.: PUCs: Detecting Transparent, Passive Untouched Capacitive Widgets on Unmodified Multi-Touch Displays, *Proceedings of the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 101–104 (online), DOI: 10.1145/2512349.2512791 (2013).
- [12] 堀竜慈, 志築文太郎, 田中二郎: タッチパネル面に伝わる固体音の SVM を用いた解析によるスポイト操作の実時間認識, *日本ソフトウェア科学会大会論文集*, Vol. 27, pp. 1–7 (2010).
- [13] 坂本侑一郎, 吉川拓人, 大江龍人, 志築文太郎, 福本雅朗, 田中二郎: WrinkleSurface: しわを作って入力できる柔らかいマルチタッチインタフェース, *the 19th Workshop on Interactive Systems and Software*, WISS 2011, pp. 7–12 (2011).
- [14] Boem, A. and Troiano, G. M.: Non-Rigid HCI: A Review of Deformable Interfaces and Input, *Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference*, DIS '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 885–906 (online), DOI: 10.1145/3322276.3322347 (2019).
- [15] Shahmiri, F., Chen, C., Waghmare, A., Zhang, D., Mittal, S., Zhang, S. L., Wang, Y.-C., Wang, Z. L., Starner, T. E. and Abowd, G. D.: Serpentine: A Self-Powered Reversibly Deformable Cord Sensor for Human Input, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–14 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300775 (2019).
- [16] Vanderloock, K., Vanden Abeele, V., Suykens, J. A. and Geurts, L.: The Skweezee System: Enabling the

Design and the Programming of Squeeze Interactions, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 521–530 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502033 (2013).

- [17] Sugiura, Y., Inami, M. and Igarashi, T.: A Thin Stretchable Interface for Tangential Force Measurement, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 529–536 (online), DOI: 10.1145/2380116.2380182 (2012).