

# 防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いた タッチ圧力取得手法

高田 峻介<sup>1,a)</sup> 林 威<sup>1,b)</sup> 安藤 宗孝<sup>2,c)</sup> 志築 文太郎<sup>3</sup> 高橋 伸<sup>3</sup>

**概要:** 防水機能を有するタッチパネル端末（以下、防水端末）において、画面タッチ時の圧力を取得する手法を示す。本手法は気密性を有する防水端末にタッチした際に端末内部の気圧が上昇し、端末に内蔵された気圧センサの出力値が変化する現象を利用する。同じ圧力にてタッチした際の防水端末の気圧の変化量は、タッチ位置によって異なる。我々は実験により、タッチ位置ごとの気圧の変化量、ならびにタッチ圧力と気圧の変化量の関係を調査した。本稿にてその調査結果および考察を示す。

## 1. はじめに

スマートフォンやタブレットのようなタッチパネルを搭載した端末が普及している。これらの端末は、マルチタッチやホバーを利用することにより入力語彙を拡張可能である。また iPhone 6s にて、タッチ圧力をセンシングする「3D Touch」機能が搭載され、タッチ圧力を用いたインタラクションが利用されるようになった [1]。これにより、ソフトウェアキーボードとトラックパッドをタッチの圧力によって切り替える、ペイントアプリの筆の大きさをタッチ圧力によって変えるといった操作が可能である。しかし、3D Touch によりタッチの圧力を検出するためには専用のセンサを搭載する必要がある。すでに端末に内蔵されているセンサのみを用いてタッチ圧力を取得することができれば、専用のセンサを搭載していないタッチパネル端末にて同様のインタラクションを利用することができるようになる。そこで、本稿にて防水性能を有するタッチパネル端末（以下、防水端末）に内蔵された気圧センサを用いてタッチ圧力を取得する手法である「BaroTouch」を示す。

BaroTouch は防水端末のタッチパネルを指を用いて押下

した際に端末表面がたわみ、防水端末に内蔵された気圧センサのセンサ値（以下、気圧値）が変動する現象を用いてタッチ圧力を取得する手法である。BaroTouch は気圧を用いるため、周囲の気圧の影響を受ける。この影響を無くすために気圧値が更新されるたびに前の値との差分（以下、差分値）を用いることとした。さらに、端末上の押下位置および押下圧力によってどのような特性を示すか調査した結果、端末中央部の感度が高いことが分かった。また、Android OS にはタッチパネルに触れた指の接触面積に基づく、タッチ圧力検出手法が存在するため、本手法との感圧特性の違いも述べる。

## 2. 関連研究

BaroTouch はタッチ圧力を検出することによってタッチ操作を拡張する手法である。本手法以外にもタッチパネル端末において、タッチした際の圧力や指形状をセンシングし、タッチ操作を拡張する研究は多くなされている。本節にてスマートフォンに外部装置を組み合わせることによりタッチ操作を拡張する研究、スマートフォンに内蔵されたセンサのみを用いてタッチ操作を拡張する研究、およびスマートフォン以外の端末にてタッチ圧力を検出し、操作を拡張する研究について述べる。

### 2.1 スマートフォンのタッチ入力を拡張する研究

スマートフォンと外部装置もしくは内蔵センサを用いてタッチ操作の拡張を行っている研究を述べる。

#### 2.1.1 外部装置を組み合わせる研究

スマートフォンの外部にセンサもしくは装置を組み合わせることによりタッチ操作の拡張を行う手法が提案され

<sup>1</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻

Department of Computer Science, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

<sup>2</sup> 筑波大学情報学群情報メディア創成学類

College of Media Arts, Science and Technology, School of Informatics, University of Tsukuba

<sup>3</sup> 筑波大学システム情報系

Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

a) rtakada@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) linwei@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

c) ando@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

ている。Nakai らはゲルを用いてスマートフォンとスマートフォンケースを接続し、タッチパネルを押下した際のゲルの張力および指のスライド量の関係性を用いて、タッチ圧力を検出している [12]。Acoustruments はスマートフォンのマイクおよびスピーカー間に管をつなげることにより、管を押下した際の圧力を認識可能である [10]。Force Gestures はスマートフォンに圧力センサを取り付けることにより、タッチパネルにタッチした際の圧力を計測し、タッチの強弱を利用したタッチジェスチャの提案を行っている [5]。Ono らはマイクおよびスピーカを貼り付けたカバーをスマートフォンに装着することにより、反響した音を計測し、タッチパネルを押下した際の圧力を認識している [14]。本手法はスマートフォンに内蔵された気圧センサのみを用いる点において、これらの研究と異なる。

スマートウォッチを用いることにより、スマートフォンへのタッチ操作を拡張する研究もある。Touch+はスマートウォッチを装着した側の手にてスマートフォンを操作した際に、タッチに用いた指の部位を識別している [8]。Expressy はスマートウォッチを付けた腕にてスマートフォンを操作した際に、タッチした指の角度を識別している [17]。本手法はスマートフォンのみを用いてタッチ操作の拡張を行う点において、これらの研究と異なる。

### 2.1.2 内蔵のセンサを用いる研究

スマートフォンに内蔵されているセンサのみを用いてタッチ操作の拡張を行う手法が提案されている。ForceTap はスマートフォンをタップした際の端末に内蔵された加速度センサのセンサ値を基に、タップの強弱を識別している [6]。TapSense は端末に内蔵されたマイクを用いてタップした際の音を取得し、タップした指の部位を識別している [4]。GripSense はタップした際の端末に内蔵されたジャイロセンサのセンサ値を周波数解析することによりタッチの強弱を識別している [3]。PseudoButton は端末に内蔵されたスピーカおよびマイクを用いて、端末のマイクが搭載されている穴を指にて押下した際のタッチ圧力を検出している [9]。PreTouch は指のホバーを検出可能なタッチパネル端末を用いることにより、ユーザがタッチパネルを押下する前の指の位置を検出している [7]。本手法はスマートフォン内蔵のセンサのみを用いる点においてこれらの研究と同じであるが、気圧センサを用いてタッチ圧力を取得する点にてこれらの研究と異なる。

## 2.2 スマートフォン以外の端末にてタッチ圧力を検出する研究

スマートフォン以外のタッチパネル端末や物体を押下した際に、圧力をセンシングする手法が提案されている。Nakai らはゲルシートに小さな粒子を埋め込み、ゲルを押下した際の粒子の変形をカメラを用いてセンシングすることにより、タッチ圧力および圧力がかかっている方向を認

識している [13]。Expressive Touch は大画面タッチパネル端末にて、画面の四隅に取り付けたマイクを用いて測定した画面をタップした際の音の大きさを用いて、タップの強弱を検出している [15]。Dietz らはメンブレンキーボードのキー押下時に、内部の電極シートの接触面積が変わり、抵抗が小さくなることを利用してキー押下圧力を検出している [2]。PreSenseII は圧力センサを組み込んだボタンを用いて、指の押下圧力を検出している [16]。Pressing the Flesh は板を指を用いて押下した際の、指の腹ならびに爪の色の変化をカメラを用いてセンシングすることによりタッチ圧力を認識している [11]。本手法はセンサを用いて圧力を検出する点においてこれらの研究と同じであるが、スマートフォン上にて圧力検出を可能にした点にてこれらの研究と異なる。

## 3. 提案手法: BaroTouch

BaroTouch は防水端末のタッチパネルを指を用いて押下した際に端末表面がたわみ、内部の体積が変化することによって防水端末の気圧値が変動する現象を用いてタッチ圧力を取得する手法である。以下に防水端末押下時の気圧値の変化について述べる。BaroTouch はタッチ圧力検出に気圧を用いるため、周囲の環境の気圧の影響を受ける。この問題を解決する手法について述べる。また、Android OS にはタッチパネルに触れた指の接触面積に基づく、タッチ圧力検出手法が存在する。この指の接触面積に基づくタッチ圧力検出手法と本手法との違いについて述べる。

### 3.1 防水端末押下時の気圧値の変化

タッチパネルの左上の端および中央にて、タッチ圧力が同程度となるように、指を用いて防水端末 (Xperia Z3 Compact SO-02G) を 2 回ずつ押下した際の気圧値の変化を図 1 に示す。タッチ圧力が少しずつ強くなるように、指を用いて防水端末の中央付近を 4 回押下した際の気圧値の変化を図 2 に示す。図 1 および図 2 の折れ線グラフは押下した際の気圧値をプロットしたものであり、塗り潰された区間は端末に指が接触してから離れるまでを Android OS のタッチイベントから取得しプロットしたものである。図 1 からタッチパネル端よりも中央にて押下した場合の方が気圧値の変化が大きいことが分かる。また、図 2 からタッチ圧力に応じて気圧値が変化していることが分かる。

また図 1 および図 2 より、防水端末に指が接触し始めた際は気圧値が上昇し、その後気圧値が減少、防水端末から指を離した際は気圧値が減少してから、元の気圧値に戻ることが分かる。これは図 3 に示すように、端末押下直後は防水端末がたわむことによって変形し内部の気圧が上昇するが、その後、防水端末のマイク穴やイヤホンジャック等の僅かな隙間を通じて空気が内外にて交換され、元の気圧値に戻るためである。また防水端末から指を離した際も変

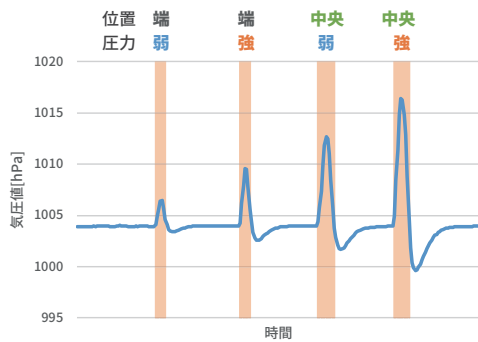


図 1 異なる位置にて端末を押下した際の気圧値および指の接触期間  
Fig. 1 Barometer graph and touching time of touches on different places.

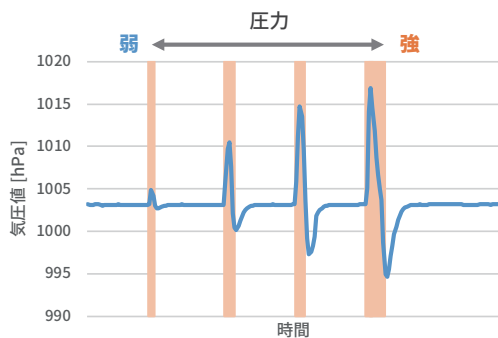


図 2 異なる圧力にて端末を押下した際の気圧値および指の接触期間  
Fig. 2 Barometer graph and touching time of different pressure touches.

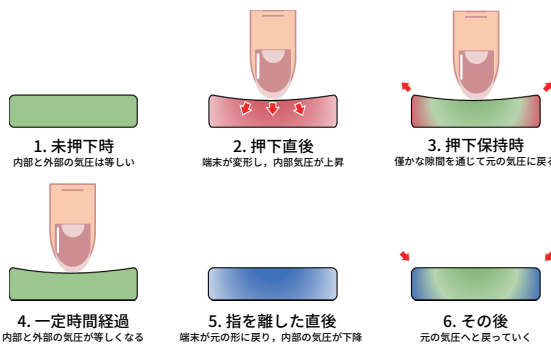


図 3 防水端末押下時の端末内部気圧の変化

Fig. 3 Change of inner barometric pressure when a water proof device is pressed.

形した防水端末が元の形へと戻るため内部の気圧が減少し、その後同様の現象が起きる。このことから、BaroTouchは押下した瞬間の防水端末のタッチイベントを手掛かりに、タッチ圧力を検出することができる。

### 3.2 気圧値の処理方法

防水端末の気圧値は天候、ユーザが居る場所の海拔ならびに建物の内外等によって変化する。図 4 に建物の 1 階と 10 階にて防水端末を押下した際のグラフ、ならびにそれぞれの階をエレベータにて昇降しながら防水端末を押下し

た際の気圧値のグラフを示す。図 4 に示すとおり、気圧値がユーザが居る場所の高さによって変化していることが分かる。このユーザが居る環境ごとの影響を減らすために、気圧値が更新された際に最新の気圧値とひとつ前の気圧値との差分を利用することを考案した。図 5 に図 4 の気圧値を差分値に変換したグラフを示す。図 5 から、ユーザが居る環境ごとの基準となる気圧値の変化の影響を少なくし、タッチした際の圧力変化を抽出できていることが確認できる。このことから BaroTouch においては、タッチ圧力検出に差分値を利用することとした。

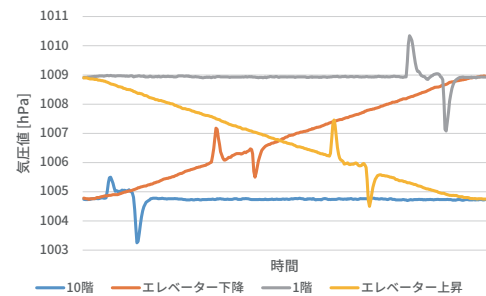


図 4 建物の階ごとおよびエレベータ昇降時に防水端末を押下した際の気圧値

Fig. 4 Barometer graph when a water proof device is pressed on each floor and while the elevator is going up/down.

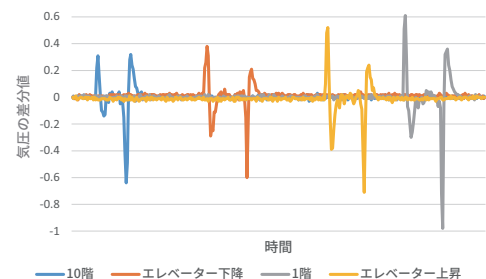


図 5 建物の階ごとおよびエレベータ昇降時に防水端末を押下した際の差分値

Fig. 5 Barometer Difference graph when a water proof device is pressed on each floor and while the elevator is going up/down.

### 3.3 タッチ面積を用いる手法との違い

Android OS において、指が端末のタッチパネルにタッチした際に、指のタッチ面積からタッチ圧力を取得する機能が提供されている。指の先端は柔らかいため、タッチパネルを指にて押下した際の押下圧力に応じて指の先端が変形しタッチ面積が大きくなる。そのため、このタッチ面積からタッチ圧力を取得することが可能である。しかし、指のタッチ面積はタッチパネルに触れた際によって異なり、例えば指を立てた状態にて強く端末を押下した状態

を検出することができない。BaroTouch は端末を押下した際に端末内部の気体が圧迫される現象を、気圧センサを用いて計測しているためこの問題を解決することができる。

図 6 に異なる角度（指を立てた状態および寝かせた状態）、異なる圧力にて端末を押下した際の気圧値とタッチ面積のグラフを示す。図 6 において、まず指を立てた状態にて端末に押下し、その後より強い力にて端末に押下した。その後、指を寝かせた状態にて同様に押下した。図 6 から指を寝かせた状態において、気圧値およびタッチ面積は押下圧力に応じて変化していることが分かる。しかし、指を立てた状態において、気圧値は押下圧力に応じて指を寝かせた場合と同様に変化しているが、タッチ面積の変化は寝かせた場合に比べて少ないことが分かる。このことから、BaroTouch はタッチ面積を用いる手法に比べて、指の角度に関係なくタッチ圧力を取得することができることが分かる。また、BaroTouch およびタッチ面積を組み合わせることにより指の角度および押下圧力を同時に計測するといったことが考えられる。

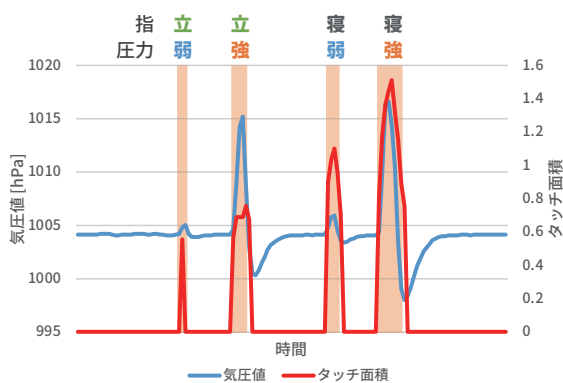


図 6 異なる角度、異なる圧力にて端末を押下した際の気圧値とタッチ面積

Fig. 6 Touch area size and barometer graph when a water proof device is pressed in different finger angles and pressure.

## 4. 実験

BaroTouch の感圧特性を明らかにするため、タッチ位置およびタッチ圧力と差分値の関係を調査する 2 つの実験を行った。実験には防水端末として Xperia Z3 Compact SO-02G (防水性能: IPX5/8, 防塵性能: IP6X) を用いた。

### 4.1 タッチ位置ごとの感圧特性調査実験

BaroTouch は端末を押下した際に端末表面に力が加えられることによってたわみ、内部の気体が圧迫される現象を用いて押下圧を取得する手法である。また押下した位置によって端末表面のたわみ具合は異なる。例えば同圧力であっても、端末の端を押下した場合よりも中央を押下した場合の方が端末表面は大きくたわむ。この防水端末の押下

位置および気圧値の関係を調査するために、端末のタッチパネルを同圧力にて押下した際に、差分値が位置によりどう異なるか実験を行った。以下に実験を行う手法、環境、結果および考察を示す。

#### 4.1.1 実験手法

我々は異なる位置にて同じ圧力による押下を行うために、先行研究である Expressive Touch [15] を参考に、端末に同じ高さからサラミソーセージを投下した。この時のサラミソーセージは先行研究と直径および重量が同じもの（直径 11 mm, 長さ 200 mm, 重さ 20 g）を利用した。また、同じ位置および同じ高さから複数回投下するために専用の治具を 3D プリンタ (FLASHFORGE 社製, Dreamer) を用いて製作し使用した。実験に用いた治具を図 7 および図 8 に示す。治具は図 7 に示す通り、蓋部、筒部および枠部からなる。蓋部は穴を有しており、この穴は端末のタッチパネルを図 9 に示すように横 4 分割 (1.425 cm/分割) × 縦 7 分割 (1.4429 cm/分割) した際の任意の位置に対応する。蓋部は上下逆さまにすることにより、分割された全ての領域に対応できるように設計した。また、サラミソーセージおよび筒部の内側には摩擦の影響を減らすために食用油を均一に塗布した。

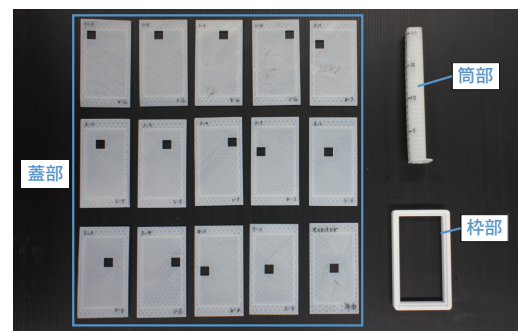


図 7 実験に用いた治具

Fig. 7 Jig parts.

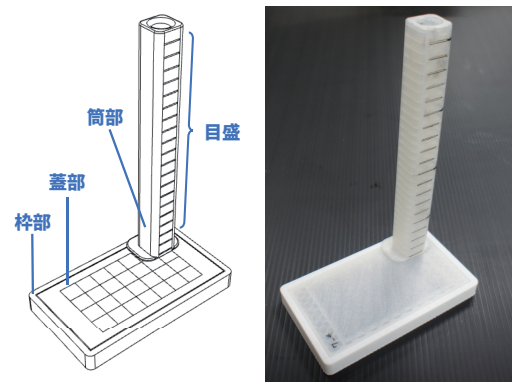


図 8 組み立て後の治具

Fig. 8 Assembled jig.

我々はまず、端末を机の上に静置し、10 秒間差分値の記

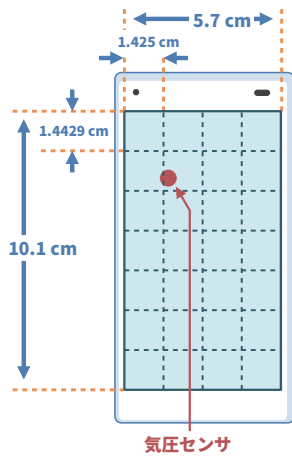


図 9 Xperia Z3 Compact の画面分割および気圧センサの位置  
Fig. 9 Display separate line and Barometer sensor location of Xperia Z3 Compact.

録を行い、期間中最も大きい差分値をしきい値とした。その後、図 8 に示す治具を用いて、10 cm の高さからサラミソーセージを端末のタッチパネルに投下した。これを 28 分割された領域それぞれに 10 試行ずつ行った。サラミソーセージを投下した際の差分値、差分値の絶対値の波形を図 10 に示す。図 10 の波形において差分値の絶対値をローパスフィルタを用いて平滑化し、平滑化した波形がしきい値以上になっている区間の絶対値の総和を積分値とし、最も高かった絶対値を最大値とした。1 試行ごとに気圧値の積分値および最大値の記録を行った。

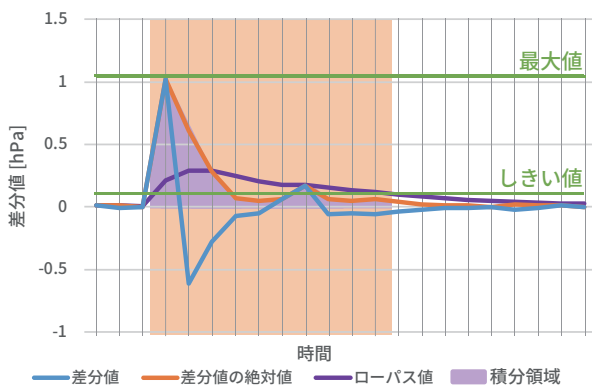


図 10 サラミソーセージ投下時 (1 試行) の差分値、絶対値およびローパス値  
Fig. 10 Barometer Difference, Absolute value and Law pass value graph when a salami is dropped.

#### 4.1.2 環境

実験は窓や出入り口を締め切った屋内にて行われた。端末を用いて実験環境の気圧値を計測したところ、1008.3658 hPa であった。また、4.1.1 節におけるしきい値を計測したところ、0.049926758 であった。

#### 4.1.3 結果および考察

実験の結果を図 11 および図 12 に示す。図 11 は分割された各領域ごとに 10 試行行った際の気圧積分値の平均であり、図 12 は気圧最大値の平均値である。

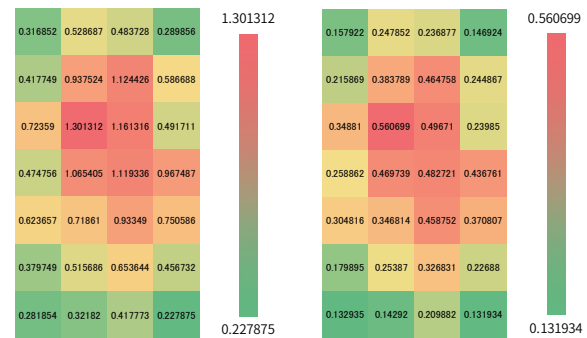


図 11 分割された各領域ごとの気圧積分値  
図 12 分割された各領域ごとの気圧最大値

Fig. 11 Barometer integral value in each separated area.  
Fig. 12 Barometer maximum value in each separated area.

実験結果から中央部は変化量が多くなっているため、中央の方がより大きくたわむと考えられる。また、中央部よりもやや左上の領域が最も変化量が高くなった。この理由として、気圧センサの搭載位置が関係していると考えられる。実験に用いた Xperia Z3 Compact の気圧センサは図 9 に示す位置に搭載されており、実験結果の変化量が高くなった領域と位置が一致している。つまり、たわみ具合が大きい中央部かつ気圧センサが配置された箇所寄りの位置にて最も変化量が大きくなっていることが分かる。また、タッチ圧力を取得する際に、このタッチ位置ごとの感圧特性およびタッチ位置を用いて補正を行うことにより、タッチ位置に依存しない圧力の検出が可能となる。

#### 4.2 タッチ圧力ごとの感圧特性評価実験

異なる圧力にて端末を押下した際に、差分値がどう異なるか調査する実験を行った。

##### 4.2.1 実験手法

我々は同じ位置にて異なる圧力による押下を行うために、4.1.1 節にて述べた治具を用いて、端末にサラミソーセージを投下した。また、4.1 節の実験結果より、最も特性の異なる中央および端の両箇所にて同様の特性が得られた場合、端末のタッチパネル全体にて同様の特性を有するという推測できる。したがって本実験は端末のタッチパネル中央および左上端に対して行われた。サラミソーセージをある高さからタッチパネルに投下するまでを 1 試行とし、1-20 cm の高さの範囲にて 1 cm ずつ高さを変えながら各高さごとに 20 試行ずつ行った。また、1 試行ごとに気圧値の積分値および最大値の記録を行った。

#### 4.2.2 環境

実験は窓や出入り口を締め切った屋内にて行われた。端末を用いて実験環境の気圧値を計測したところ、1004.36 hPaであった。また、しきい値を計測したところ、0.039978027であった。

#### 4.2.3 結果および考察

実験の結果を図13、図14、図15および図16に示す。図13および図15はそれぞれタッチパネル中央と左上端にて10試行を行った際の気圧積分値の平均値であり、図14および図16はそれぞれタッチパネル中央と左上端における気圧最大値の平均値である。また、それぞれの図において縦方向のバーは標準偏差をプロットしたものである。

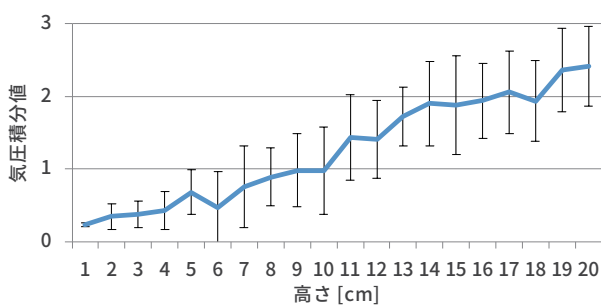


図13 タッチパネル中央における落下させる高さごとの気圧積分値  
Fig. 13 Barometer integral value of each drop height on the center of the touch screen.

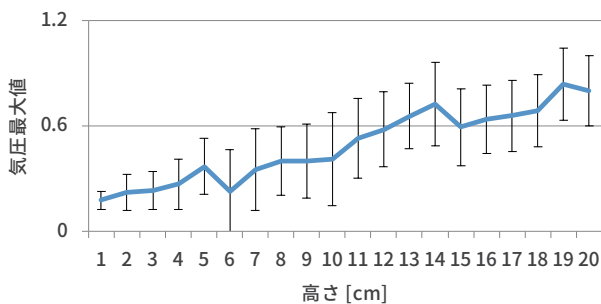


図14 タッチパネル中央における落下させる高さごとの気圧最大値  
Fig. 14 Barometer maximum value of each drop height on the center of the touch screen.

実験結果より、高さにおおよそ線形に比例して気圧値の変化量が大きくなっていることが分かる。図13および図14より、高さが高くなった際に最大値より積分値の方が線形に増加していることが分かる。このことから、押し分けを必要とするタッチ圧検出には積分値を用いた方が良いことが分かる。また図13および図15より高さに比例して積分値が大きくなっていることから、タッチパネル全体にて同様の特性を有していると推測できる。

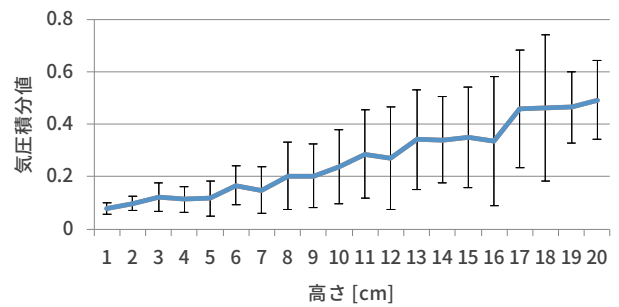


図15 タッチパネル左上端における落下させる高さごとの気圧積分値  
Fig. 15 Barometer integral value of each drop height on the upper left corner of the touch screen.

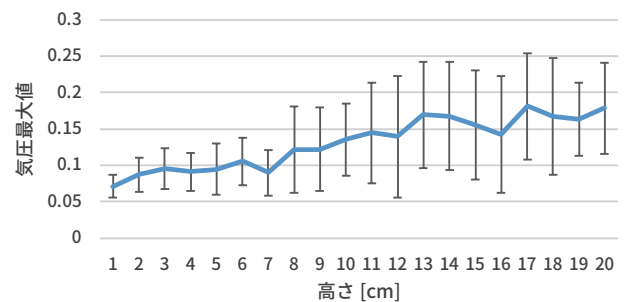


図16 タッチパネル左上端における落下させる高さごとの気圧最大値  
Fig. 16 Barometer maximum value of each drop height on the upper left corner of the touch screen.

## 5. おわりに

本稿にて防水端末に内蔵された気圧センサを用いてタッチ圧力を取得する手法である BaroTouch を示した。また BaroTouch において、タッチする位置や圧力によってどのような感圧特性を有するか実験により明らかにした。実験結果より、端末中央部および気圧センサ搭載位置付近が気圧の変化量が大きく、端末端よりも端末中央部の方が正確に圧力検出可能である可能性が示された。

今後はドアの開閉を行った場合や屋内外等の異なる環境において同様の実験を行い、BaroTouch がどのような環境において使用可能であるか調査を行う。さらに被験者実験により BaroTouch を用いるユーザが何段階の押し分けが可能であるかを明らかにする。また、BaroTouch は今回実験に使用した端末以外の防水端末にて、気圧センサの位置が異なった場合においても同様に使用可能であるか調査を行う。さらにカシオ社製の Smart Outdoor Watch WSD-F10 等のスマートウォッチは防水性能を有しており、かつ気圧センサが搭載されているため、BaroTouch がスマートウォッチ上でも同様に使用できるかどうか調査を行う。

参考文献

- [1] Apple: iPhone 6s - 3D Touch. <http://www.apple.com/jp/iphone-6s/3d-touch/> (2016年8月8日閲覧).
- [2] Dietz, P. H., Eidelson, B., Westhues, J. and Bathiche, S.: A Practical Pressure Sensitive Computer Keyboard, *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, New York, NY, USA, ACM, pp. 55–58 (online), DOI: 10.1145/1622176.1622187 (2009).
- [3] Goel, M., Wobbrock, J. and Patel, S.: GripSense: Using Built-in Sensors to Detect Hand Posture and Pressure on Commodity Mobile Phones, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, New York, NY, USA, ACM, pp. 545–554 (online), DOI: 10.1145/2380116.2380184 (2012).
- [4] Harrison, C., Schwarz, J. and Hudson, S. E.: TapSense: Enhancing Finger Interaction on Touch Surfaces, *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, New York, NY, USA, ACM, pp. 627–636 (online), DOI: 10.1145/2047196.2047279 (2011).
- [5] Heo, S. and Lee, G.: Force Gestures: Augmented Touch Screen Gestures using Normal and Tangential Force, *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, New York, NY, USA, ACM, pp. 1909–1914 (online), DOI: 10.1145/1979742.1979895 (2011).
- [6] Heo, S. and Lee, G.: ForceTap: Extending the Input Vocabulary of Mobile Touch Screens by Adding Tap Gestures, *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '11, New York, NY, USA, ACM, pp. 113–122 (online), DOI: 10.1145/2037373.2037393 (2011).
- [7] Hinckley, K., Heo, S., Pahud, M., Holz, C., Benko, H., Sellen, A., Banks, R., O'Hara, K., Smyth, G. and Buxton, W.: Pre-Touch Sensing for Mobile Interaction, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 2869–2881 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858095 (2016).
- [8] Hwang, S., Song, J. and Gim, J.: Touch+: Expanding Touch Input Vocabulary using a Smartphone and a Smartwatch, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 165–165 (online), DOI: 10.1145/2702613.2732485 (2015).
- [9] Hwang, S. and Wohn, K. Y.: PseudoButton: Enabling Pressure-sensitive Interaction by Repurposing Microphone on Mobile Device, *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, New York, NY, USA, ACM, pp. 1565–1570 (online), DOI: 10.1145/2212776.2223673 (2012).
- [10] Laput, G., Brockmeyer, E., Mahler, M., Hudson, S. E. and Harrison, C.: Acoustruments: Passive, Acoustically-driven, Interactive Controls for Handheld Devices, *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 3:1–3:1 (online), DOI: 10.1145/2782782.2792490 (2015).
- [11] Marshall, J., Pridmore, T., Pound, M., Benford, S. and Koleva, B.: *Pressing the Flesh: Sensing Multiple Touch and Finger Pressure on Arbitrary Surfaces*, pp. 38–55 (online), DOI: 10.1007/978-3-540-79576-6\_3, Springer, Berlin, Heidelberg (2008).
- [12] Nakai, Y., Kudo, S., Okazaki, R. and Kajimoto, H.: Tangential Force Input for Touch Panels using Bezel-aligned Elastic Pillars and a Transparent Sheet, *Proceedings of the Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST'14 Adjunct, New York, NY, USA, ACM, pp. 111–112 (online), DOI: 10.1145/2658779.2658801 (2014).
- [13] Nakai, Y., Kudo, S., Okazaki, R., Kajimoto, H. and Kuribayashi, H.: Detection of Tangential Force for a Touch Panel using Shear Deformation of the Gel, *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 2353–2358 (online), DOI: 10.1145/2559206.2581149 (2014).
- [14] Ono, M., Shizuki, B. and Tanaka, J.: Sensing Touch Force using Active Acoustic Sensing, *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 355–358 (online), DOI: 10.1145/2677199.2680585 (2015).
- [15] Pedersen, E. W. and Hornbæk, K.: Expressive Touch: Studying Tapping Force on Tabletops, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 421–430 (online), DOI: 10.1145/2556288.2557019 (2014).
- [16] Rekimoto, J. and Schwesig, C.: PreSenseII: Bidirectional Touch and Pressure Sensing Interactions with Tactile Feedback, *CHI '06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '06, New York, NY, USA, ACM, pp. 1253–1258 (online), DOI: 10.1145/1125451.1125685 (2006).
- [17] Wilkinson, G., Kharrufa, A., Hook, J., Pursglove, B., Wood, G., Haeuser, H., Hammerla, N. Y., Hodges, S. and Olivier, P.: Expressy: Using a Wrist-worn Inertial Measurement Unit to Add Expressiveness to Touch-based Interactions, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 2832–2844 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858223 (2016).