

プロトタイピングのための紙製タッチセンサの設計及び操作 認識プログラムの開発

山路 大樹^{1,a)} 久保 勇貴^{1,b)} 杉山 慎一郎^{1,c)} 志築 文太郎^{2,d)} 高橋 伸^{2,e)}

概要：タッチ操作やホバー操作を検出する機能を有するオブジェクトをプロトタイピングするための開発環境を示す。本開発環境は、様々な電極パターンを有する紙製のタッチセンサを提供する。開発者は検出させたい操作に対応する電極パターンを選んで印刷しオブジェクトに貼り付け、電極パターンをマイコンと接続し、我々が用意した操作認識プログラムを用いる。今回、我々は電極の面積と抵抗値によるホバー操作の取得可能範囲の関係を調査した。この結果に基づき、様々な電極パターンを有するタッチセンサを設計し、またそのタッチセンサ用の操作認識プログラムを作成した。本稿ではこれらに加え、操作認識プログラムの認識精度実験の結果、及び本開発環境を用いて作成したアプリケーションを報告する。

1. はじめに

Internet of Things (IoT) アプリケーションは、センサおよびアクチュエータを用いた実世界において動作するアプリケーションであり、様々なモノが今後そのようになることが予想される。IoT アプリケーションのプロトタイピングにおいては、開発者は 3D プリンタを用いた筐体の製作やセンサを用いた IoT アプリケーションを動作させるための操作体系の製作を行う。3D プリンタおよびフィジカルインタフェースの普及により、IoT アプリケーションの製作は容易になっている。

その一方で、IoT アプリケーションを製作する際にどこにセンサを追加すればよいか、またどのような動作およびジェスチャを取得できれば良いかということに関して決める必要がある。そのために、何度もプロトタイピングを製作し、設計者が最適な条件を模索することが考えられる。しかし、何度もプロトタイピングを行うことは、時間がかかり、製作者の負担となる。そのために、IoT アプリケーションの設計において、ジェスチャの設計を容易に行うことができる開発者環境が必要となる。

そこで、我々はタッチ操作やホバー操作を検出する機能を有するオブジェクトをプロトタイピングするための開発環境を作成している。本開発環境は、様々な電極パターンを有する紙製のタッチセンサを提供する。開発者は検出させたい操作に対応する電極パターンを選んで印刷しオブジェクトに貼り付け、電極パターンをマイコンと接続し、我々が用意した操作認識プログラムを用いる。今回、我々は電極の面積と抵抗値によるホバー操作の取得可能範囲の関係を調査し、その結果に基づき、様々な電極パターンを有するタッチセンサを設計した。また、タッチセンサ用の操作認識プログラムを作成し、操作認識プログラムの認識精度実験を実施した。さらに、作成中の紙製のタッチセンサを用いて作成したアプリケーション例を報告する。

2. 関連研究

紙及びテープインタフェース、プロトタイピング、及びジェスチャ設計ツールに関する研究が多数行われている。

2.1 紙及びテープインタフェース

本研究と同様に、紙もしくはテープ状のインタフェースに関する研究がいくつか存在する。Gong ら [4] は、導電性インク及び RF アンテナを組み合わせ、曲げセンサを実装し、またセンサ同士が通信可能な紙状センサを提案した。PyzoFlex [16] は、導電性インクを含む 4 層によって構成される圧力センサをプラスチック紙にアレイ状に印刷し、マルチタッチが認識可能な紙状センサである。SensorTape [3] 及び A Cuttable Multi-touch Sensor [11] は、テープの曲げ及びタッチを認識できるカット可能なテープ状センサ

¹ 筑波大学大学院システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering,
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

² 筑波大学システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University
of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan

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

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

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

d) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp

e) shin@cs.tsukuba.ac.jp

である．また，Foldio [12] は，印刷可能なタッチセンサ及び曲げセンサ，ディスプレイを製作することができるソースコードを含めてプロトタイプ開発環境を提供した．本研究は，これらの研究と同様な紙インタフェースを用いてタッチ及びホバー操作の認識を行う．導電性インクのタッチセンサによるホバーに関する評価実験を行い，タッチ及びホバーの検出に適した電極の設計を行った．またこの電極を用いた操作機能を実装するためのプロトタイプ開発環境を提供する．

2.2 プロトタイピング

ラピッドプロトタイピングを補助する手法として，The Calder Toolkit [9] は，ボタンやレバーといった，無線通信可能な小型のパーツを物体に取り付けるプロトタイピング手法である．AutoConnect [8] は，2つの物体を連結可能とする3Dモデルを自動生成する研究である．PaperPulse [15] は，GUIにて用意されたウィジェットを組み合わせるインタラクティブなオブジェクトを設計し，紙のインタフェースを作成できる開発環境である．RetroFab [14] は，専門家でないユーザでも，3Dプリンタ及びセンサ等を利用することにより，物理インタフェースに機能を容易に追加できるプロトタイピングを行うための開発環境である．

また，本研究と同様に，銀ナノ粒子などの導電性インクを用いたラピッドプロトタイピング手法がいくつかある．Instant Inkjet Circuits [7] は，家庭用プリンタにて導電性インクによる印刷を可能とし，回路等のプロトタイピングを容易にした手法である．3D Folded PrintGami [2] は，導電性インク及び3Dプリンタ等を利用することにより，設計したオブジェクトの内部に回路を組み込むプロトタイプ手法である．Circuit Stickers [6] は，パーツをGUI上で組み合わせ回路を設計し，設計した回路及び既存の電子部品を組み合わせるプロトタイピング手法である．本研究では，タッチ操作やホバー操作を検出する機能を有するオブジェクトをプロトタイピングするための開発環境を開発する．開発者は我々が提供する開発環境を利用することにより，タッチセンサ用の操作認識プログラムによって，容易にタッチ及びホバー操作を設計できる．

2.3 ジェスチャ設計ツール

本研究と同様に，ジェスチャ設計ツールに関する研究はいくつかある．Mogeste [13] は，モバイル端末のセンサを利用したジェスチャを設計を，スマートフォン上で設定およびそのパラメータの調整を行える手法である．MAGIC [1] は，ジェスチャの作成，テスト及び誤認識があるかどうか検証できる，動作の伴うジェスチャを設計するためのツールである．Hartmannら [5] は，様々なセンサからの入力データを用いたデモ製作を容易にする手法として，センサ値をリアルタイムに監視しながらパターン認識

可能なツールを提案した．GART [10] は，専門家ではない設計者を対象とし，機械学習に関する知識を持っていないとも，ジェスチャに基づくアプリケーションを容易に製作できるツールである．本研究は，様々な電極パターンを有する紙製のタッチセンサを用いたタッチ操作やホバー操作を設計するための開発環境の開発を行った．

3. 電極パターンの設計

ユーザのオブジェクトに対するタッチ操作やホバー操作を検出するために，本開発環境は図2のような電極が印刷された紙製のタッチセンサを提供する．電極の印刷のために我々は導電性インクを用いた．開発者は紙製のタッチセンサをオブジェクトに貼り付け，マイコンと接続することによってタッチ操作やホバー操作を取得することが可能となる．そこで我々は導電性インクが印刷された紙製のタッチセンサを用いてタッチ操作やホバー操作を検出するための最適な電極パターンを実験的に導くことにした．そのために，紙に印刷された導電性インクによる電極のタッチ特性及びホバー特性を調査した．

3.1 タッチ特性及びホバー特性の調査

電極が印刷された紙製のタッチセンサにおいて，タッチやホバーを取得するために，我々は電極の静電容量の変化に着目した．図1に紙製のタッチセンサを用いてタッチやホバーを取得するためのシステム構成を示す．

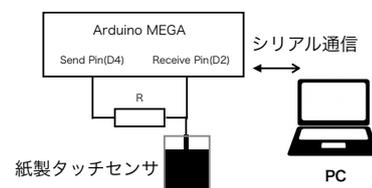


図1 タッチ及びホバー取得システム構成図

本システムにおいては静電容量の計測を行うために，Arduino用の静電容量計測ライブラリであるCapSense?を用いた．これは，送信ピンの状態を変化させた際の受信ピンの状態が変化するまでの遅延時間を用いて静電容量を計測している．この遅延時間はユーザの手が電極部分に触れるあるいは近づく際に形成されるキャパシタンスや電極の面積，その他環境条件などにより形成されるキャパシタンス全体を含めたキャパシタンスCと，抵抗Rによって決まる時定数 $R \times C$ に依存している．そこで我々は電極の面積と抵抗値を変化させた時の，導電性インクによる電極のタッチ特性及びホバー特性を調査した．タッチ特性は，電極に触れた際の遅延時間の変化量により示す．ホバー特性は，電極に手を近づけた際の遅延時間の変化量から得られる，ホバー操作の取得可能範囲により示す．

3.1.1 調査協力者

調査協力者は、著者 1 人を含む大学院生のボランティア 4 人 (P1-P4, 男性 4 名, 23-24 歳, 全員右利き) であった。本調査を行うにあたって、全ての調査協力者において、右手を広げた時の手首から中指の先までの長さを測定した。表 4 に各調査協力者の手の大きさを示す。

表 1 調査協力者の手のサイズ

被験者	手のサイズ [mm]
P1	187
P2	195
P3	195
P4	190

3.2 設計条件

電極の面積と抵抗値による電極のタッチ特性及びホバー特性を調査するため、電極の面積条件及び CapSense に用いる抵抗条件によって比較を行った。電極の面積条件は図 2 に示す 6 種類であり、それぞれの面積条件は、(縦の長さ, 横の長さ) = (10mm, 10mm), (30mm, 10mm), (50mm, 10mm), (30mm, 30mm), (50mm, 30mm), (50mm, 50mm) である。接続部分はどの条件においても (縦の長さ, 横の長さ) = (3mm, 10mm) で一定であり、紙自体の大きさは面積条件に依存する。抵抗条件は、1M, 3M, 5M の 3 種類である。これは、著者によって行われた予備実験により、抵抗値と CapSense により得られる遅延時間には大きな関係性があり (表 2), 10M 以上の場合において動作遅延をより感じるようになることが分かったからである。

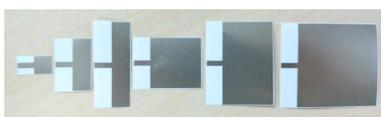


図 2 調査に用いた電極の 6 種類の面積条件, 左から (10mm, 10mm), (30mm, 10mm), (50mm, 10mm), (30mm, 30mm), (50mm, 30mm), (50mm, 50mm)

表 2 事前実験により得られた、定常状態 (タッチやホバーをしていない状態) において、CapSense により得られる抵抗値別の遅延時間の平均値

抵抗値	遅延時間
50M	51
10M	30
5M	1.7
1M	0.05

3.2.1 実験システム

本調査を行うにあたり、我々は図 3 に示す実験器具を 3D プリンタにより作製した。この実験器具において、図 3 のように、電極の中心が、突起部分の中心になるように両面テープによって配置した。また、調査協力者の手の位置をリアルタイムに取得するために LeapMotion を用い、手の前方に配置した。本実験器具において電極が LeapMotion よりも高い位置にあるのは、LeapMotion において手を近づけすぎた場合に手を取得することができなくなるためである。

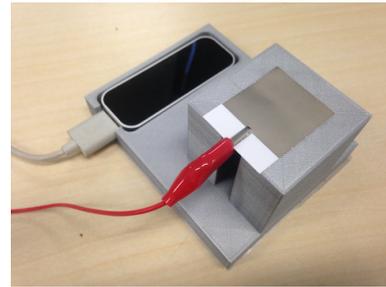


図 3 調査に用いた実験器具

3.2.2 調査手順

調査協力者は調査中、常に椅子に座るように求められた。我々は調査の準備として調査内容を説明した後、調査協力者の手の大きさを測定した。次に、電極の面積と抵抗値によるタッチ特性とホバー特性を調べるための調査タスクを行った。

調査タスクにおいては、調査協力者には電極に対し、タッチ及びホバーを行ってもらった。タッチにおいては、電極に対し右手人差し指によりタッチするように指示し、ホバーにおいては、右手を広げ、電極に対し 15 秒間自由に手を動かしてもらおうよう指示した。

調査タスクの 1 試行は調査協力者が 1 つの面積条件及び抵抗条件において、タッチとホバーを完了するまでである。調査協力者はタッチ、ホバーの順に各条件において 2 試行ずつ行い、これを 1 セッションとした。したがって、各調査協力者は計 72 試行 (6 面積条件 × 3 抵抗条件 × 2 操作 (タッチ, ホバー) × 2 試行) 行った。

また、調査タスクにおいては、遅延時間の変化量を計測するため、タスクを始める前の遅延時間を毎回測定しベース値とした。遅延時間の変化量は、タスクを行った時に得られた遅延時間とこのベース値との差によって表される。

3.2.3 調査結果

各面積条件及び抵抗条件ごとのタッチ特性とホバー特性を示す。タッチ特性は、電極に触れた際の遅延時間の変化量により示され、表 3 は、面積条件及び抵抗条件別の全調査協力者の遅延時間の変化量の平均値である。ホバー特性は、電極に手を近づけた際の遅延時間の変化量から得られるホバー操作の取得可能範囲を 3 次元空間により示され、

図 6-23 は、面積条件及び抵抗条件別の全調査協力者によるホバーの 3 次元空間における遅延時間の変化量の結果である。ここで、図 6-23 において、 $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ に各電極の中心が位置するように図 5 のように配置されており、プロットされている点はホバーを取得した時の手の位置を遅延時間の変化量別に示している。手の位置は LeapMotion によって取得した座標を交換している。また、プロットされている点 Level0-Level2 は、遅延時間の変化量を示しており、Level0 は遅延時間の変化量が 5 以上の時、Level1 は遅延時間の変化量が 10 以上の時、Level2 は遅延時間の変化量が 20 以上の時をプロットしている。遅延時間の変化量が 5 未満の時はホバーを取得していないとみなしプロットされない。

表 3 タッチ操作における、面積条件及び抵抗条件別の全調査協力者の遅延時間の平均値

	1M	3M	5M
(10mm, 10mm)	1348	2068	6429
(10mm, 30mm)	1258	3719	6830
(10mm, 50mm)	1520	6532	7410
(30mm, 30mm)	1327	8503	8206
(30mm, 50mm)	1590	8721	8217
(50mm, 50mm)	1186	7325	8108

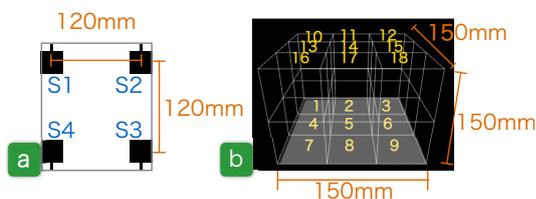


図 4 実験に用いたタッチセンサの設計図 (a) と測定した 18 領域 (b)

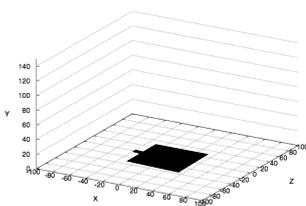


図 5 xyz 座標系における電極の配置

3.2.4 考察

タッチ特性を示す表 3 より、どの面積条件、抵抗条件においても、非常に高い遅延時間の変化量を示した。また、面積と抵抗値が大きくなるほど遅延時間も大きくなる傾向があった。ホバー特性を示す図 6-23 より、1M の場合においては、ホバーの取得範囲が比較的狭いことが分かった。3M、5M の場合においては、どの面積条件においても比較的広範囲にホバーが取得できることが分かった。また、面積と抵抗値が大きくなるほどホバーの取得範

囲が広くなり、かつ、遅延時間の変化量も大きくなる傾向があった。遅延時間の変化量が大きいということは、動作遅延が大きくなるが、よりセンシティブにホバーを検出できることを示す。今回のホバー特性においては、いずれの条件においても動作遅延を感じられるほどの遅延時間の変化量ではなかった。

また、タッチ特性とホバー特性を比べるとタッチ操作はホバー操作と比べて、遅延時間の変化量が著しく大きいことが分かった。この特性を利用することにより、タッチ操作とホバー操作を区別することが可能となる。

3.3 設計した電極パターン

以上の結果をもとに、我々は、導電性インクが印刷された紙製のタッチセンサを用いてタッチ操作やホバー操作を検出するための電極パターンを設計した。タッチ特性はどの条件においても取得可能であるため、今回はホバー特性に着目し、ホバー操作を検出するための最適な電極パターンを設計した。我々は代表的なホバー操作を、上下、左右、手前奥スワイプ操作と定めた。しかしながら、これらのホバー操作の検出を実現するにあたり、電極上部に手をかざした(ホバーした)際に、手がおおよその位置にあるか推定できれば、これらのホバー操作を実現できると考えた。

そこで我々は、ホバーした際に、手がおおよその位置にあるかを推定可能にする、複数の電極から構成される電極パターンを設計することとした。ホバー特性を示す図 6-23 の結果より、2 つの電極間の中心位置が各電極においてホバーを取れる最長距離と一致するような設計にした。

4. ホバー操作検出アルゴリズム

3.3 節において述べたように、空中での上下、左右、手前奥スワイプといったホバー操作は、ホバー操作をした際に、手がおおよその位置にあるか推定できれば実現できると考えた。そこで、本節において、ホバー操作をした際の手の位置推定のためのアルゴリズムを示す。

我々は、ホバー特性の調査実験結果(図 6-23)をもとに、1 つの電極における遅延時間の変化量とホバー取得可能な手の位置のおおよその最大距離の関係を抽出した。例えば、面積条件：5M、抵抗条件：(30mm,30mm) のとき、遅延時間の変化量が 5 の時、ホバー取得可能な手の位置のおおよその最大距離は 70mm、遅延時間の変化量が 10 の時、60mm、遅延時間の変化量が 20 の時、40mm、つまり、(遅延時間の変化量, 最大距離) = (5, 70), (10, 60), (20, 40) として抽出する。このようにして、各条件において抽出した時に、全ての条件について遅延時間の変化量と最大距離の関係は指数近似できることがわかった。例えば、面積条件：5M、抵抗条件：(30mm,30mm) のときは図 24 のようになる。この指数近似を用いることによって、1 つの電極における遅延時間の変化量から手の位置を推定する

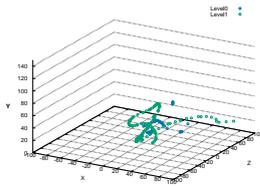


図 6 面積条件：1M ，抵抗条件：
 (10mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

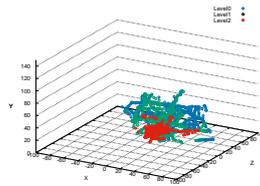


図 7 面積条件：3M ，抵抗条件：
 (10mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

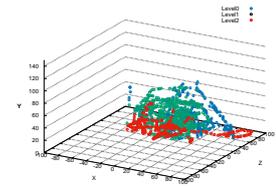


図 8 面積条件：5M ，抵抗条件：
 (10mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

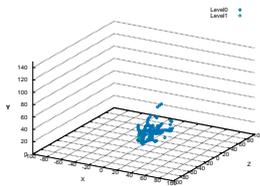


図 9 面積条件：1M ，抵抗条件：
 (30mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

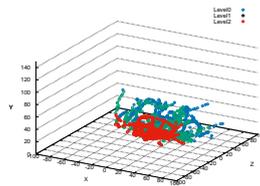


図 10 面積条件：3M ，抵抗条件：
 (30mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

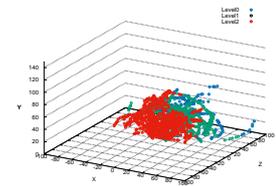


図 11 面積条件：5M ，抵抗条件：
 (30mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

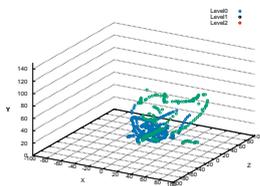


図 12 面積条件：1M ，抵抗条件：
 (50mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

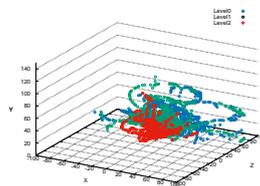


図 13 面積条件：3M ，抵抗条件：
 (50mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

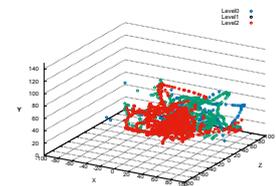


図 14 面積条件：5M ，抵抗条件：
 (50mm,10mm) のときの遅延時間の変化量

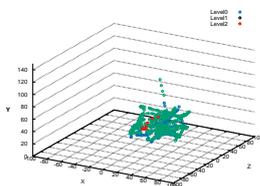


図 15 面積条件：1M ，抵抗条件：
 (30mm,30mm) のときの遅延時間の変化量

図 16 面積条件：3M ，抵抗条件：
 (30mm,30mm) のときの遅延時間の変化量

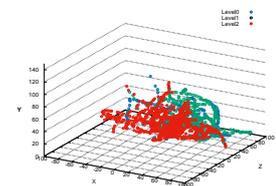


図 17 面積条件：5M ，抵抗条件：
 (30mm,30mm) のときの遅延時間の変化量

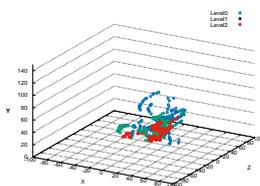


図 18 面積条件：1M ，抵抗条件：
 (50mm,30mm) のときの遅延時間の変化量

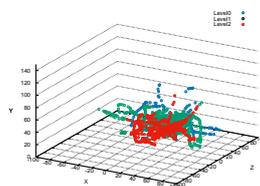


図 19 面積条件：3M ，抵抗条件：
 (50mm,30mm) のときの遅延時間の変化量

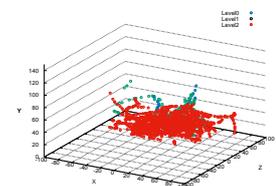


図 20 面積条件：5M ，抵抗条件：
 (50mm,30mm) のときの遅延時間の変化量

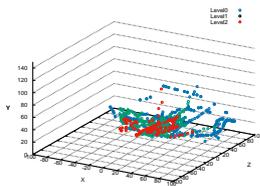


図 21 面積条件：1M ，抵抗条件：
 (50mm,50mm) のときの遅延時間の変化量

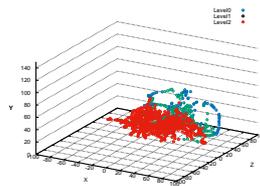


図 22 面積条件：3M ，抵抗条件：
 (50mm,50mm) のときの遅延時間の変化量

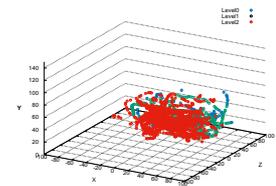


図 23 面積条件：5M ，抵抗条件：
 (50mm,50mm) のときの遅延時間の変化量

ことが可能となる。

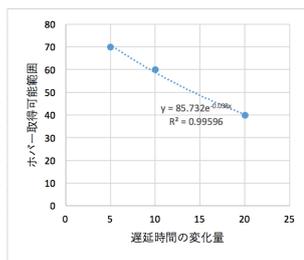


図 24 面積条件：5M，抵抗条件：(30mm,30mm) のときの指数近似式

スワイプ操作などは、それぞれの電極における手の位置の推定と位置の遷移を利用することによって可能となる。例えば、1 次元に配置された 2 つの電極の場合、1 つの電極の付近に手が位置したのちに、もう 1 つの電極の付近に手が位置した時、スワイプ操作とみなせば良い。

5. ホバー検出精度評価実験

前章までにおいて設計したホバー操作を検出するための電極パターンと検出アルゴリズムを用いて、ホバーした際の手の位置推定の精度を測定するために、被験者実験を行った。

5.1 実験設計

被験者は著者 2 人を含む大学院生のボランティア 4 名 (P1-P4, 男性 4 名, 22-24 歳, 全員右利き) であった。被験者の中には、本稿調査実験にて協力してもらったボランティア 1 人含まれている。また、本実験を行うにあたり用いたセンサは面積条件：(30mm, 30mm), 抵抗条件：5M であり、タッチセンサの設計図を図 4(a) に示す。この設計は、面積条件：(30mm, 30mm), 抵抗条件：5M において、ホバーの最大取得可能範囲がおおよそ 60mm であり、3.3 節において述べられている設計方法を利用している。被験者は、図 4 に示すように 18 領域に 1 から順に 5 秒間右手を広げてかざすよう指示された。その際の、4 つの電極の遅延時間の変化量から推定される、各電極からの手の位置を記録した。また、タッチセンサは S1, S2 側が領域 1-3 側に位置するよう下面に配置された。その結果をもとに、実際の手の位置と比較することによって、位置推定の精度を測定した。

5.2 実験手順

被験者は調査中、常に椅子に座るように求められた。

我々は調査の準備として実験内容を説明した後、練習タスクと実験タスクを行ってもらった。練習タスクは、被験者がホバー操作ができると感じるまで行った。

実験タスクの 1 試行は 1 領域に手を 5 秒間かざすまで

ある。これを 18 領域においてそれぞれ 2 試行ずつ行う。したがって各被験者は計 36 試行 (18 領域 × 2 試行) 行った。

5.3 実験結果及び考察

被験者ごとの各領域における各電極からの手の位置の正答値との差の絶対値を示す。領域 1-9, つまり、タッチセンサに近い領域においては、正答値との差がどの被験者においてもおおよそ 10mm-40mm ほどであり、比較的正しく位置を推定できていた。しかしながら、領域 10-18, つまり、タッチセンサから遠い領域においてはどの被験者においても正答値との差が大きく、位置推定の精度が高いとは言えない。これらは、タッチセンサに近い領域においては、各電極において、遅延時間の変化量を比較的高い精度で取得できることにに対し、タッチセンサから遠い領域においては、比較的精度が低いことが影響していると考えられる。

6. 議論

本稿において我々は、ホバーを検出するための電極パターンを設計し、電極パターンにおけるホバー取得可能範囲をパラメータとした位置推定アルゴリズムを開発した。これらを利用することにより、以下のようなジェスチャが取得できるようになると考える。

- 1 次元に配置された電極パターンを用いる場合
 - タッチ操作, 上下左右スワイプ操作, 1 次元的なホバー位置を利用した操作
- 2 次元に配置された電極パターンを用いる場合
 - タッチ操作, 上下左右手前奥スワイプ操作, 2 次元的なホバー位置を利用した操作

ホバーを検出するための適した電極パターンを設計するにあたり、我々はホバー取得可能範囲が広いことから、5M を採用した。しかしながら、より高い解像度においてホバーを検出したい場合には 3M を採用したり、あまり広範囲にホバーを取得したくない場合においては 1M を採用するといったことも考えられる。いずれにしても、ホバー特性を示す図 6-23 から得られるホバー取得可能範囲を用いることによって、それぞれの条件における位置推定のための近似式が求められるため、開発者の環境に応じたホバーを検出可能なオブジェクトをプロトタイプングすることが可能となると考えられる。

今後はこれら全ての面積条件及び抵抗条件において電極パターンを設計し、ホバー検出精度を測定する。また、ホバー検出を用いたジェスチャを実装することも開発者のプロトタイプングを手助けする上で重要である。

7. アプリケーション例

本開発環境を使用し製作したアプリケーション例として、柵の使用ログ記録アプリケーションを述べる。研究室などの場所にて複数人が使用している、複数段の引き出しがあ

表 4 被験者ごとの各領域における各電極からの手の位置の正答値との差の絶対値

センサ	領域の正答値との差 [mm]																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
P1																		
S1	9.9	4.9	58.5	9.1	12.7	51.9	23.0	49.2	59.2	30.6	40.5	19.0	16.7	29.0	63.9	35.6	23.3	70.5
S2	42.6	10.3	9.0	56.9	13.9	44.0	33.1	2.9	14.7	37.3	52.5	27.6	76.5	35.4	19.8	45.0	13.7	8.0
S3	62.2	19.8	29.0	79.7	15.5	23.4	40.7	6.7	9.3	43.0	35.3	41.2	35.4	29.6	19.0	14.9	3.0	18.8
S4	29.2	23.1	82.2	8.9	17.1	61.1	12.2	1.0	34.9	29.1	57.6	70.8	24.9	37.3	92.3	28.3	12.4	51.2
P2																		
S1	9.6	20.9	45.1	10.1	24.0	66.3	13.1	10.3	21.3	24.8	8.2	9.7	15.3	47.8	55.3	39.8	89.0	80.3
S2	49.0	11.9	9.0	61.2	11.0	8.8	44.8	3.9	7.8	67.0	9.4	14.7	84.0	23.6	33.2	88.1	23.3	33.3
S3	76.6	22.1	28.8	76.7	26.6	9.5	29.5	4.0	7.9	92.5	45.8	30.6	108.3	29.5	22.6	49.9	33.4	11.2
S4	28.8	38.0	72.4	4.7	23.1	71.5	9.2	2.8	13.0	49.7	21.2	32.5	2.8	41.2	66.7	24.4	50.1	18.6
P3																		
S1	9.9	9.4	51.6	9.5	19.5	43.9	10.8	14.2	70.5	18.6	24.9	27.1	14.0	30.0	48.2	13.4	27.6	67.7
S2	41.0	3.8	9.6	65.3	44.0	10.3	46.0	9.4	23.5	62.7	26.7	17.8	73.7	15.8	4.8	90.2	27.2	21.6
S3	82.6	25.0	29.7	86.8	20.9	7.9	35.1	3.1	9.7	56.6	28.5	24.0	106.6	32.0	40.1	56.8	48.9	44.6
S4	28.7	22.1	69.4	9.8	20.4	51.0	6.9	4.9	42.0	50.0	47.3	77.9	22.5	18.6	47.2	25.3	20.9	42.5
P4																		
S1	9.0	8.3	55.1	8.0	14.0	84.2	10.7	19.1	65.8	22.5	17.3	21.3	33.0	16.7	66.1	15.7	33.1	55.0
S2	46.3	3.0	5.6	68.5	13.2	8.7	44.4	18.1	18.7	38.9	14.5	15.	95.1	38.4	14.8	72.8	23.5	18.6
S3	77.4	26.9	25.7	85.9	9.5	9.6	24.7	4.1	9.6	52.7	38.9	36.5	67.2	15.2	12.4	25.5	33.3	3.7
S4	28.9	23.1	65.8	9.0	15.2	89.8	6.2	6.3	31.9	29.0	38.9	58.3	24.0	42.8	112.4	15.3	17.3	31.6



図 25 (a): タッチセンサが貼られている棚 (b): 棚を引く際、タッチセンサに手が触れる様子



図 26 アプリケーションの簡易操作機能を使用している様子

るような棚の場合、ある引き出しからものがなくなってしまい、それがいつ取り出されたのかを知りたい場合がある。そこで、棚の使用ログを記録するアプリケーションを提案する。本アプリケーションは、棚の使用の記録には、棚に貼り付けたタッチセンサのホバー認識を利用して行う（図 25 (a)）。どの棚を使用したかの記録には、棚を引く際にタッチセンサに触れることを利用し記録する（図 25 (b)）。これにより、ある引き出しが開かれた時刻を正確に知ることができる。

7.1 机上における簡易操作アプリケーション

机上における簡易操作アプリケーションを提案する。図 26 に示すように、表面の電極に触れることにより、メモアプリケーションならば保存、ペイントアプリケーションならばファイルのコピーといった、アプリケーションに対応した簡易操作を割り振ることができる。

8. まとめ

本稿において、タッチ操作やホバー操作を検出する機能を有するオブジェクトをプロトタイピングするための開発環境を示した。本稿において示した面積条件及び抵抗条件別のホバー取得可能範囲と位置推定アルゴリズムを用いることによって、ホバーを検出可能な紙製のタッチセンサを構築できる。その紙製のタッチセンサをオブジェクトに貼り付け、電極パターンをマイコンと接続することによって、アプリケーション例において示したような、タッチやホバーを取得可能なオブジェクトをプロトタイピングすることができる。今後は、さらなる面積条件及び抵抗条件におけるホバー検出精度の調査、ホバー検出を用いたジェスチャ認識アルゴリズムの開発を行う。

参考文献

- [1] Ashbrook, D. and Starner, T.: MAGIC: A Motion Gesture Design Tool, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 2159–2168 (online), DOI: 10.1145/1753326.1753653 (2010).
- [2] Daudén Roquet, C., Kim, J. and Yeh, T.: 3D Folded PrintGami: Transform Passive 3D Printed Objects to Interactive by Inserted Paper Origami Circuits, *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 187–191 (online), DOI: 10.1145/2901790.2901891 (2016).
- [3] Dementyev, A., Kao, H.-L. C. and Paradiso, J. A.: SensorTape: Modular and Programmable 3D-Aware Dense Sensor Network on a Tape, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 649–658 (online), DOI: 10.1145/2807442.2807507 (2015).
- [4] Gong, N.-W., Hodges, S. and Paradiso, J. A.: Leveraging Conductive Inkjet Technology to Build a Scalable and Versatile Surface for Ubiquitous Sensing, *Proceedings of the 13th International Conference on Ubiquitous Computing*, UbiComp '11, New York, NY, USA, ACM, pp. 45–54 (online), DOI: 10.1145/2030112.2030120 (2011).
- [5] Hartmann, B., Abdulla, L., Mittal, M. and Klemmer, S. R.: Authoring Sensor-based Interactions by Demonstration with Direct Manipulation and Pattern Recognition, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, New York, NY, USA, ACM, pp. 145–154 (online), DOI: 10.1145/1240624.1240646 (2007).
- [6] Hodges, S., Villar, N., Chen, N., Chugh, T., Qi, J., Nowacka, D. and Kawahara, Y.: Circuit Stickers: Peel-and-Stick Construction of Interactive Electronic Prototypes, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 1743–1746 (online), DOI: 10.1145/2556288.2557150 (2014).
- [7] 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, *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 363–372 (online), DOI: 10.1145/2493432.2493486 (2013).
- [8] Koyama, Y., Sueda, S., Steinhardt, E., Igarashi, T., Shamir, A. and Matusik, W.: AutoConnect: Computational Design of 3D-Printable Connectors, *ACM Transaction on Graphics*, Vol. 34, No. 6, pp. 231:1–231:11 (online), DOI: 10.1145/2816795.2818060 (2015).
- [9] Lee, J. C., Avrahami, D., Hudson, S. E., Forlizzi, J., Dietz, P. H. and Leigh, D.: The Calder Toolkit: Wired and Wireless Components for Rapidly Prototyping Interactive Devices, *Proceedings of the 5th Conference on Designing Interactive Systems: Processes, Practices, Methods, and Techniques*, DIS '04, New York, NY, USA, ACM, pp. 167–175 (online), DOI: 10.1145/1013115.1013139 (2004).
- [10] Lyons, K., Brashear, H., Westeyn, T., Kim, J. S. and Starner, T.: GART: The gesture and activity recognition toolkit, *International Conference on Human-Computer Interaction*, Springer, pp. 718–727 (2007).
- [11] Olberding, S., Gong, N.-W., Tiab, J., Paradiso, J. A. and Steimle, J.: A Cuttable Multi-touch Sensor, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 245–254 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502048 (2013).
- [12] Olberding, S., Soto Ortega, S., Hildebrandt, K. and Steimle, J.: Foldio: Digital Fabrication of Interactive and Shape- Changing Objects With Foldable Printed Electronics, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 223–232 (online), DOI: 10.1145/2807442.2807494 (2015).
- [13] Parnami, A., Gupta, A., Reyes, G., Sadana, R., Li, Y. and Abowd, G.: Mogeste: Mobile Tool for In-situ Motion Gesture Design, *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct*, UbiComp '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 345–348 (online), DOI: 10.1145/2968219.2971395 (2016).
- [14] Ramakers, R., Anderson, F., Grossman, T. and Fitzmaurice, G.: RetroFab: A Design Tool for Retrofitting Physical Interfaces Using Actuators, Sensors and 3D Printing, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 409–419 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858485 (2016).
- [15] Ramakers, R., Todi, K. and Luyten, K.: PaperPulse: An Integrated Approach for Embedding Electronics in Paper Designs, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 2457–2466 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702487 (2015).
- [16] Rendl, C., Greindl, P., Haller, M., Zirkel, M., Stadlober, B. and Hartmann, P.: PyzoFlex: Printed Piezoelectric Pressure Sensing Foil Christian, *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, New York, NY, USA, ACM, pp. 509–518 (online), DOI: 10.1145/2380116.2380180 (2012).