

AC 電源からのハムノイズを用いて色々な物を タッチインタフェース化する技術の実用化研究

HumTouch: Touch sensing technique utilizing human body antenna

研究代表者 名古屋大学大学院工学研究科 准教授 岡本正吾

Shogo Okamoto

HumTouch is a touch sensing technique that turns objects in our daily lives to be touch-sensitive. For example, woods, papers, and stones can be touch-sensitive without any surface activation unlike most of the previous techniques. HumTouch utilizes noise-induced electric currents in human body, which leak into object's surface when a finger touches it. This current can be detected by a couple of electrodes attached on the surface, based on which the position of the finger can be located. This study developed a high-precision localization technique for HumTouch by using kernel regression analysis. The average localization error as large as 0.3 cm was achieved on a 40 × 36 cm paper. Furthermore, this technique can be used for 3D object, such as a cylinder.

要旨

家具を含む様々な日用品に新たな機能を付加する目的で、それらに人が触れたことを検出する機能を付加しようとする技術が研究開発されている。いわば、あらゆる物をタッチセンサーに変えてしまうための技術である。本研究はカメラや振動を原理とする従来の手法とは全く異なる原理を有する HumTouch 技術の実用化および高度化のための技術開発を目的とする。HumTouch は、環境中の AC 電源ノイズによって人体に発生する電流を活用する方法であり、その独特の原理のために、従来の手法とは異なる特徴を有する。例えば、本研究で用いたように、紙にタッチセンシング機能を付加し、人が紙のどの部分に触れたかを特定することが可能である。本研究は、人が触れた場所の位置同定精度を向上するための研究を主に実施した。HumTouch は、電源ノイズを利用するという性質上、接触位置同定の精度が低いと考えられていたが、本研究は非線形現象に高い適応性を有するカーネル回帰分析を応用して、指先程度の推定誤差 (10 mm 以下) を有する位置同定機能を実現した。

1. まえがき

電子機器のためのタッチセンシング技術はタッチパネルの普及に伴って高度に完成され、コモディティ化している。具体的には、静電容量型と呼ばれる手法であり、タッチパネルに張り巡らされた透明度の高い電極に電荷をチャージすることを原理とする。

このような技術とは目的を異にして、様々な日用品にタッチセンシング機能を付加しようという試みがある。例えば、机や引き出しなどの家具をインテリジェント化しようと思えば、人がそれらに触れたことと、その位置を検出する機能が必要となる。例えば、カメラを用いる方法がある^{(1),(2)}。環境中に設置されたカメラによって人が物に触れる動作を撮影するという方法であり、人が触れる物が何であるかに依存しにくいという特長がある。しかしながら、環境を構造化しなければならないという点および死角が生じてしまうという問題がある。人が物体に触れることによって発生する音伝播の変化を利用する方法もある^{(3),(4)}。この方法では、剛体中に音もしくは振動を伝播させ、それらを受信することによって、剛体に人が触れていることを検出しようとする。他にも電気トモグラフィ法がある^{(5),(6)}。物体表面に導体層を用意し、その周囲に数十個程度以上の電極を配置し、人が触れたことによる導体層の電気抵抗の変化を推定する手法である。それぞれの手法は長所ならびに短所を有し、いずれかが優れているというものではない。むしろ、シーンに適した技術が選択されて実用化されていくであろう。

このような背景のもと、本研究は HumTouch という技術の高度化を目指す。2 節で述べるように、HumTouch は建造物内の AC 電源ノイズにより人体に発生する電流が漏れるものを、物体表面で捉える方法であり、物体表面を構造化する必要がない、さらに

物体表面に機械的もしくは電気的エネルギーを付加する必要がないという点で、従来の手法とは大きく異なる。あらゆる準導電性の表面にタッチセンシング機能を付加することが可能である。しかしながら、環境の電気ノイズを用いるという性質上、人が触れた位置を特定するという位置同定能力に劣るという問題があった^{(7), (8)}。本研究はこの欠点を補うために、非線形現象への適応能力が高いカーネル回帰分析を用いた手法を開発した。またそのための電極の配置および電極で計測された電圧の前処理方法についても複数の手法を検討、比較した。本研究の成果は4編の論文^{[1], [2], [3], [4]}として出版されている。

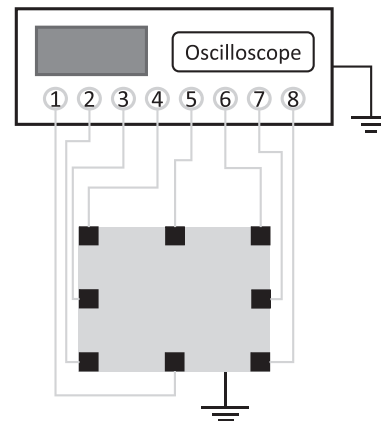
2. HumTouch の原理

本研究では受動的計測手法である HumTouch を取り扱う。従前の多くの手法と異なり、HumTouch は計測表面に何らかのエネルギーを付加する必要がない。建造物の中には必ず存在する AC 電源線から、50/60 Hz の電磁場が生成される。人の体はミネラルを含むため、電磁場に反応して体内に電流が生じる。このような電流はこれまでも、3次元空間中の人のジェスチャー認識などに利用されてきた^{(9), (10)}。人の指が導体もしくは準導体の物体に触れると、人の体から電流が漏れ、物体に流れる。図1のように、この電流による電圧を物体に設置された電極によって検出することで、人が物体に触れたことがわかる。電圧測定のための正極が物体に設置され、負極はグラウンド接続される。人の体には何ら電極は接続されない。人の体は、グラウンドと容量性の結合をしている。

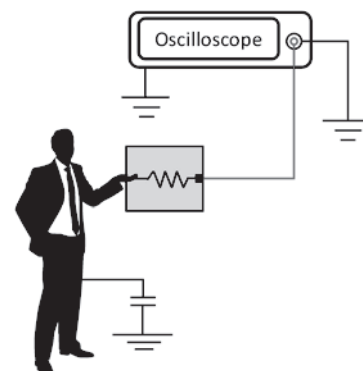
この手法は準導体に適用可能であり、例えば石に対しても利用できる⁽⁸⁾。絶縁体に関しては、ゲル塗料を塗布することで HumTouch 原理が利用可能となる^{[3], [4]}。また、3次元物体の表面に対しても適用可能である^[2]。HumTouch は物体表面を賦活する必要があるため、大面積に対しても適用可能である。また、物体表面に特殊構造を要さないため、実装スペースが限定されたシーンでの活用も想定される。

3. 実験装置および実験環境

図2に示されるように、工業用のウエス紙 (20 × 18 cm and 40 × 36 cm, Kimtowel, Nippon Paper Crexia, Tokyo, Japan) にゲルインクを塗布したもの



(a) 準導体に張られた電極



(b) 人が準導体表面に触れている時の環境を含めた仮想回路
図1 HumTouch の計測原理。(a) 準導体の表面に電極を貼り付けるだけで計測の準備は完了する。(b) 人体を含めた仮想電気回路図。人体は環境中のグラウンドに仮想的に設置される。

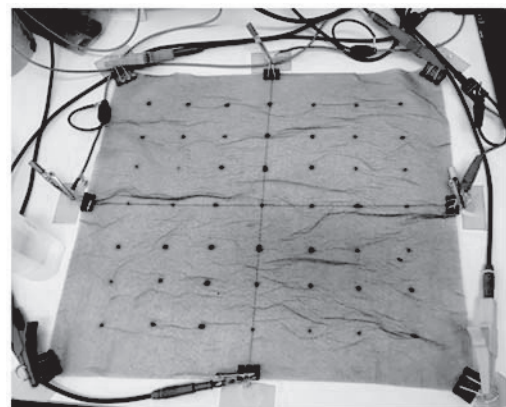


図2 実験装置。ゲルインクを塗布した紙に電極を貼り付けた。

を準導電物体として実験に用いた。ゲルインクは次の要領で作成した。ポリビニルアルコール 15 g, 純水 300 mL, ポリエチレングリコール 400 75 mL, グルタルアルデヒド 37.5 mL を 90°C に温めて、スタ

ーラーを用いて配合した。ゲルインクをウエス紙に塗った後、ウエス紙は室温で1週間、乾燥させた。紙は乾いた状態で、その柔軟性は保たれたままである。その上に油性マジックで線や点を描画することもでき、紙の強度についても特筆の変化はない。

図2のように電圧を計測するために、8個の電極を紙に設置した。2台のオシロスコープ(HS6DIFF, TiePie, Netherlands; sampling frequency: 500 kHz)によって電圧を計測した。オシロスコープのそれぞれのチャンネルについて、正極を紙に固定し、負極をグラウンドに設置した。

指で触れる場所の目印として、7×7の49点をグリッド状に紙に描画した。寸法の異なる2種類の紙を用意した。小さい紙について、点間の距離は2.5 cmおよび2.25 cmとした。大きい紙については5 cmおよび4.5 cmとした。紙は木製の机の上に置き、実験は通常の事務室で実施した。

4. カーネル回帰分析による位置同定法

本研究では、カーネル回帰分析を用いて各電極から計測された電圧をもとに指が触れた位置を推定した。電極と指の位置が離れているほど、電極で計測される電圧は小さくなる。つまり、電圧は電極と指との距離に対しておよそ単調減少することがわかっている。しかしながら、その関係は非線形であり、紙表面の電気インピーダンス特性も一様でない。カーネル回帰分析は、非線形問題の学習に適しており、HumTouchにおける接触位置同定問題に利用できる。

\mathbf{x} と $\mathbf{l} = (l_x, l_y)$ のそれぞれを、複数の電極で観察された電圧の列ベクトルおよび指が触れた紙の座標ベクトルとする。電圧から座標ベクトルを推定するモデルは、

$$\begin{bmatrix} \tilde{l}_x \\ \tilde{l}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \alpha_{xj} k(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}) \\ \sum_{j=1}^n \alpha_{yj} k(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

である。ここで、 α は回帰係数、 $k(\mathbf{x}_j, \mathbf{x})$ はカーネル関数、 n は学習サンプルの数である。 j 番目の学習サンプルにおける電圧ベクトルを \mathbf{x}_j 、指で触れた位置の座標ベクトルを $\mathbf{l}_j = (l_{jx}, l_{jy})$ とすると、回帰係数は

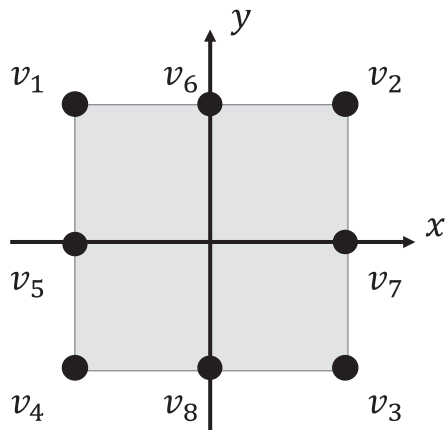


図3 紙に設置された8個の電極の位置と座標系。紙の中央を原点とした。

$$\alpha_x = (\mathbf{K} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{l}_x \quad (2)$$

$$\alpha_y = (\mathbf{K} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{l}_y \quad (3)$$

により計算される。 \mathbf{I} は単位行列 ($n \times n$) である。 \mathbf{l}_x と \mathbf{l}_y は指が触れた位置の x 座標と y 座標を収録した列ベクトル ($n \times 1$) である。 \mathbf{K} はカーネル関数の行列 ($n \times n$) であり、次のように定義される:

$$\mathbf{K} = [k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j): i, j = 1, \dots, n] \quad (4)$$

$$k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp(-|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2). \quad (5)$$

$|\cdot|$ はL2 ノルムである。 λ は正則化係数であり、本研究では以降で述べるそれぞれの手法について、推定誤差が最小になるように決定した。 λ はおよそ0.01であった。

5. カーネル回帰分析による位置同定例

5.1. 推定手法

発表文献[1]のとおり、位置同定のために3種類の手法を提案した。それらを比較した結果、最も位置推定精度が優れていた手法をここでは紹介する。

各電極では、AC電源と同じ60 Hzの電圧信号が計測される。指が紙に触れている間(およそ1秒)に計測された交流電圧信号の最大振幅値を用いる。図3のように紙に設置された電極に番号を付け、それぞれの電極で計測された電圧振幅を v_i ($i \in \{1, \dots, 8\}$) とする。8個の電極の全てを利用する場合は、電圧ベクトルは

$$\mathbf{x} = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8)^T \quad (6)$$

となる。紙の4隅に設置された4個の電極を用いる

場合は,

$$\mathbf{x} = (v_1, v_2, v_3, v_4)^T \quad (7)$$

である. 紙の 4 辺の中央に取り付けられた 4 個の電極を用いる場合は,

$$\mathbf{x} = (v_5, v_6, v_7, v_8)^T \quad (8)$$

となる. いずれの電圧ベクトルを用いるのが良いかを議論することは, 電極の配置位置と数の適正を見極めることになる.

5.2. 実験

一人の参加者がウエス紙に描画された点の一つずつに示指で触れた. 49 点の全てに順に触れる作業を 7 回繰り返した. したがって, 343 点のサンプルが得られた. それぞれの点に触れる時間はおよそ 1 秒間とした. これら 7 セット (1 セットは 49 サンプルを含む) のサンプルを用いて, 交差検証 (leave-one-out cross validation) を実施した. 具体的には, 6 セットを学習データとして用い, 得られたモデルから残りの 1 セットのサンプルをテストした. 同様のプロセスを全てのセットに対して実施した.

5.3. 実験結果

図 4 にウエス紙上に描画された 49 点の推定精度 (平均値および標準偏差) を示す. (a), (c), および (e) は小さいウエス紙に対する結果であり, (b), (d), および (f) は大きいウエス紙に対する結果である. (a) および (b) は 8 つの電極の全てを利用した場合の結果である. (c) および (d) は 4 隅の電極を利用した場合の結果である. (e) および (f) は 4 辺の中央の電極を利用した場合の結果である. それぞれの手法の平均推定誤差とその標準偏差を図中に記載している.

推定精度が最も良かったのは, 大, 小の紙ともに, 4 辺の中央の電極を利用した場合であった. 平均推定誤差は, 小さい紙で 0.36 ± 0.07 cm であった. 大きい紙で 0.27 ± 0.10 cm であった. 指腹の大きさがおよそ 1.0 cm であることを考えると, これらの推定誤差は指で触れた接触位置の同定としては, 十分に高い性能であるだろう. もっとも, ここでは具体的な要求仕様を設定していないため, 推定精度についてこれ以上の踏み込んだ議論を行わない.

推定精度が 2 番目に優れていたのは, 8 個の電極を用いた場合であった. より多くの電極を用いること

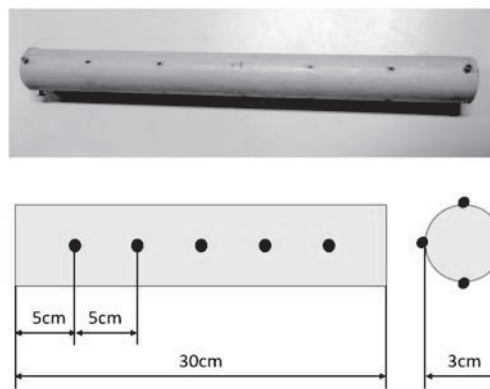


図 5 3次元物体として用いた木製の円柱. 点は, 実験で触れた場所.

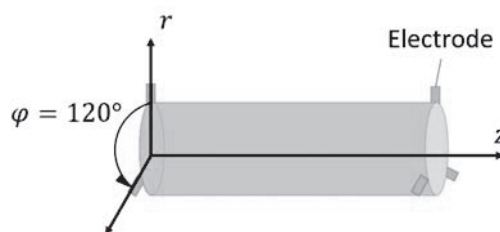


図 6 木製円柱への電極取付位置. 円柱の両端に, 120° ずつの間隔で 3 個の電極を取り付けた. 電極はウエス紙と同様にオシロスコープに接続された.

が推定精度の向上につながると予想していたため, これは意外な結果であった. 推定に使用する情報が多すぎることによる過学習が生じていた可能性がある.

推定精度が最も悪かったのは, 4 隅の電極を利用する手法であった. この理由は文献[1]で詳細に議論しているが, 電極と指の距離が一定以上に離れた場合に, 電極で計測される電圧と距離の関係のシグナル・ノイズ比が悪化することが原因と考えている.

6. 3次元物体上でのHumTouchによる接触位置同定

前節では平面に対する位置同定精度を議論し, 推定精度はタッチセンサーとしては十分に高いことが

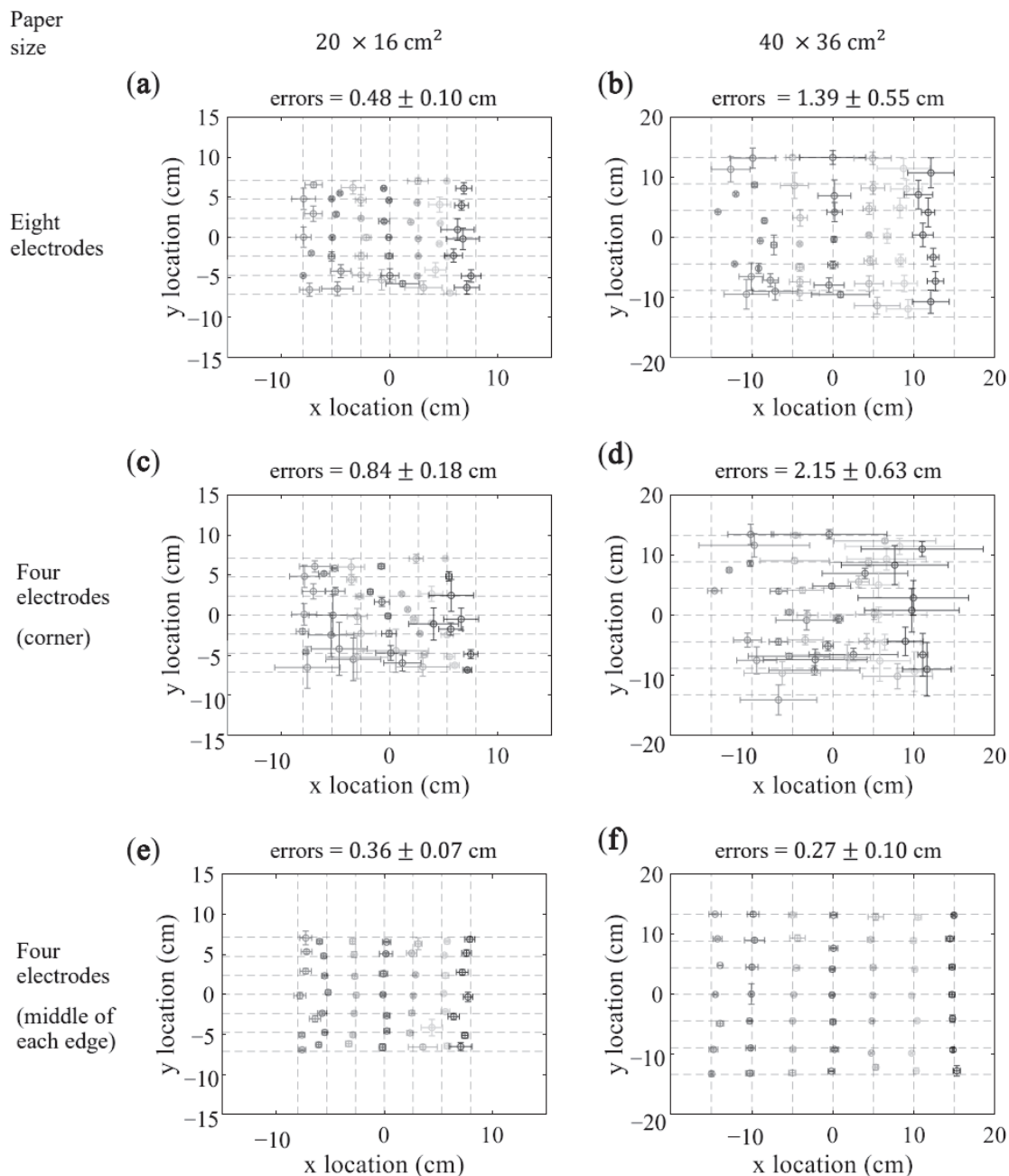


図4 位置同定の結果。交差検証における平均推定位置とその標準偏差（エラーバー）を示す。破線のグリッドの交点が、指で実際に触れた場所である。各図上部の errors は、平均推定誤差とその標準偏差である。(a),(c),(e)は小さいウエス紙に対する結果である。(b),(d),(f)は大きいウエス紙に対する結果である。

示された。すなわち、HumTouch を机上部（デスクトップ）や壁に適用する場合に、人が触れた位置を推定する精度は十分に高いことが期待できる。一方で、HumTouch の応用を考えると、3次元物体や自由曲面での位置同定精度も調査されるべきである。本節では、3次元物体として円柱を用いて、その表面を人が触れる際の位置同定精度を調査した。

6.1. 実験装置

図5に実験で用いた木製の円柱を示す。直径3 cmで長さ30 cmの円柱であり、先のウエス紙に用いられたものと同様のゲルインクを塗布した。図中の黒点に人が示指で触れた。黒点の数は20個であった。電極は図6のように、円柱の両端に3本ずつを設置

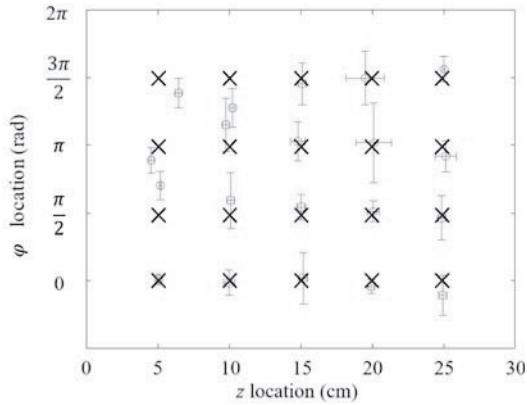


図7 指で円柱に触れた位置の推定結果. 青丸は平均推定値を, エラーバーは6回の推定の標準偏差を表す. ×印は, 指が実際に触れた位置. z方向の平均推定誤差は0.21 cm, ϕ 方向の平均推定誤差は 26.4° .

した. 円柱に鉄製の釘を打ち, それを電極として用いた. 電極は先と同様に, オシロスコープに接続した. なお, 円柱の長手方向をz軸, 回転方向を ϕ 軸とする.

6.2. 接触位置推定手法

接触位置の推定には, ウェス紙と同様にカーネル回帰分析を用いた. 回帰分析の入力データとなる, 電圧ベクトルを次のように定義した. 6個の電極のそれぞれで計測された交流電圧の最大値を v_i ($i = 1, \dots, 6$) とする. 任意の2個の電極 a, b ($a \neq b$) について,

$$d_{ab} = \frac{v_a - v_b}{v_a + v_b} \quad (9)$$

を計算した. カーネル回帰分析に用いる電圧ベクトル (15×1) は,

$$\mathbf{x} = (d_{12}, d_{13}, \dots, d_{56})^T \quad (10)$$

とした. 一人の参加者が, 20個の黒点に順に触れる作業を6回繰り返す, 合計で120サンプルを得た. 5節と同様に, 交差検証 (leave-one-out cross validation) を実施した.

6.3. 実験結果

図7にz- ϕ 平面上での接触位置推定の結果を示す. 青丸は平均推定値を, エラーバーは6回の推定の標準偏差を表す. ×印は, 指が実際に触れた位置である.

z軸方向の平均推定誤差は0.21 cmであった. ϕ 方向の平均推定誤差は 26.4° であり, これは円周方向

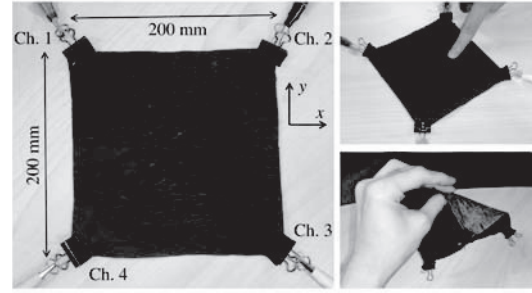


図8 ジェスチャー認識実験の実験環境. ウェス紙の4隅に取り付けられた電極を利用した. 実験参加者が紙の上に記号や数字を指でなぞって描いた.

の距離に換算すると0.23 cmに相当する. これらの誤差は指先の大きさ (およそ1.0 cm) に比べて十分に小さい.

7. 応用例: ジェスチャー認識

HumTouchの有力な応用例としてジェスチャー認識があげられる. HumTouchが日常空間の物体, 例えば家具などに適用された場合, 人がその家具の表面を指で擦るなどをして, 何らかのメッセージや指令を表現することが考えられる. ここでは, ジェスチャー認識の可能性について実現可能性を調査した結果を報告する. 用いた認識アルゴリズムは基本的な手法であり, 前節までの位置同定手法も適用していないため, 本節の結果はHumTouchのジェスチャー認識能力の上限を示唆するものではないことに留意する.

7.1. 実験方法

図8のようにゲルインクを塗布したウェス紙の4隅に電極を設置し, 前節までの方法によって, 人が紙を触った時に生じる電圧を計測した. 実験参加者は, 丸, 直線, アラビア数字の2と8など7種類のジェスチャーを紙の上に指でなぞって描いた. それぞれのジェスチャーは20回描画された (計測ミスによって, 19回しか描画されていないジェスチャーもある).

7.2. ジェスチャー認識手法

図9は紙の上に丸を描画したときの座標の軌跡であり, これを例にジェスチャー認識手法を説明する. 赤線は指が通った軌跡であり, これを10等分した点の各位置での速度ベクトルを青矢印で示している. この速度ベクトルを \mathbf{a}_j ($j = 1, \dots, 10$) とする. j は10

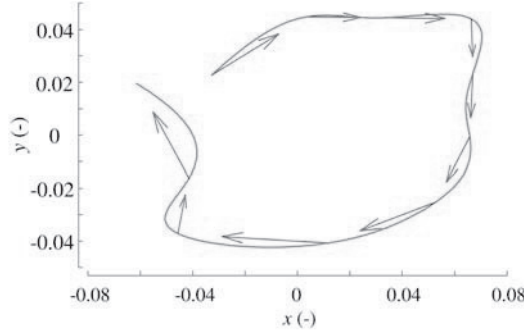


図 9 ジェスチャーの例. 赤実線が紙面上に書かれた丸の軌跡であり, 青矢印は 10 等分した各点における速度ベクトルである. この速度ベクトルから 2 種の特徴量を計算し, それらをジェスチャーの判別に利用した.

個のベクトルの識別子であり, 軌跡の序盤から順に番号付けられる. これらの速度ベクトルを用いて次の 2 種類の特徴量を計算した:

$$\sum_{j=1}^9 \angle(\mathbf{a}_{j+1} - \mathbf{a}_j) \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^9 \angle(|\mathbf{a}_{j+1} - \mathbf{a}_j|). \quad (12)$$

これらは連続する速度ベクトルの相対角度に相当する. すなわち指の運動方向の情報を有している. これら 2 つの特徴量を, ジェスチャーごとに計算した.

次に, 160 サンプル (8 種類のジェスチャー×20 試行) についてこれらの特徴量を計算し, 特徴量空間にサンプルを配置した. これに k -means 法を適用して, ジェスチャー識別を実施した. k -means 法では, あるサンプルがどのクラス (クラスはここでは 8 種類のジェスチャーであり, 8 クラスが存在する) に属するかを, そのサンプルの特徴量空間での座標に基づいて決定する. 座標とそれぞれのクラス内重心の距離を計算し, 距離が最小となるクラスにそのサンプルは割り当てられる. k -means 法は, 判別分析手法の基本的な手法である.

7.3. ジェスチャー認識結果

表 1 にジェスチャー認識率をまとめる. アラビア数字の 2 および 8 以外の認識率は高かった. 全体平均は, 0.90 (=123/137) であった. 特徴量の種類を増やし, 適切に選択することによって認識率は向上す

表 1 ジェスチャー認識率. CW, CCW は丸を描くときの回転方向である. CW は右回り. CCW は左回り. Vertical および Horizontal line はそれぞれ y 方向と x 方向の直線. Diagonal は x - y 平面での斜め線

Type of gesture	Recognition ratio
Circle (CW)	18/20
Circle (CCW)	19/20
Vertical line	19/20
Horizontal line	19/19
Diagonal line	19/19
Number 2	15/19
Number 8	14/20
Total	123/137

るであろう.

8. 結言

本研究は受動的タッチセンシング手法である HumTouch の位置同定精度を向上するための手法を開発した. 物体表面の電極で計測された電圧と物体表面での指の位置との非線形関係をカーネル回帰分析でモデル化し, 指先の大きさよりも小さい推定誤差を実現した. HumTouch は, 導電性もしくは半導電性物体の表面に電極を配置するだけで利用可能であり, 他の多くの手法のように物体にエネルギーを付加する必要がないという特性がある. この特性ゆえ, 従来手法とは異なったシーンでの利用が期待できる.

謝辞

本研究はマツダ財団の研究助成を受けて実施された. ここに謝意を表す.

発表論文

- [1] Tzu Hsuan Hsia, Shogo Okamoto, Yasuhiro Akiyama, and Yoji Yamada, HumTouch: Localization of touch on semi-conductive surfaces by sensing human body antenna signals, *Sensors*, vol. 21, no. 3, p. 859, 2021.
- [2] Tzu Hsuan Hsia, Shogo Okamoto, Yasuhiro Akiyama, and Yoji Yamada, HumTouch: Localization of touch on cylindrical object, *Proceedings of IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics*, pp. 591-521, Kobe, 2020, Oct.

- [3] Tzu Hsuan Hsia, Shogo Okamoto, Yasuhiro Akiyama, and Yoji Yamada, HumTouch: Kernel regression-based localization of touch on a paper, Proceedings of IEEE Global Conference on Life Sciences and Technologies, pp. 28-30, Kyoto, 2020, Mar.
- [4] Kyoichi Tachi, Shogo Okamoto, Yasuhiro Akiyama and Yoji Yamada, HumTouch: Finger gesture recognition on hydrogel-painted paper using hum-driven signals, Proceedings of IEEE Global Conference on Consumer Electronics, pp. 157-159, Osaka, 2019, Nov.
- Using the body as an antenna for real-time whole-body interaction. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Austin, TX, USA, 5-10 May 2012, 1901-1910.

参考文献

- (1) Akaoka E., Ginn, T., Vertegaal, R., DisplayObjects: Prototyping functional physical interfaces on 3D styrofoam, paper or cardboard models. In Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction, Cambridge, MA, USA, 25-27 January 2010, 49-56.
- (2) Chen, Y.L., Liang, W.Y., Chiang, C.Y., Hsieh, T.J., Lee, D.C., Yuan, S.M., Chang, Y.L. Vision-based finger detection, tracking, and event identification techniques for multi-touch sensing and display Systems. *Sensors* 2011, 11, 6868-6892.
- (3) Firouzi, K., Nikoozadeh, A., Carver, T.E., Khuri-Yakub, B.T., Multitouch touchscreen using reverberant lamb waves. In Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium, Washington, DC, USA, September 2017: 1-4.
- (4) Chang, C.S., Lee, Y.C. Ultrasonic, Touch sensing system based on lamb waves and convolutional neural network. *Sensors* 2020, 20, 2619.
- (5) Fulton, W.; Lipczynski, R. Body-support pressure measurement using electrical impedance tomography. In Proceedings of the 15th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, San Diego, CA, USA, 31 October 1993, 98-99.
- (6) Booth, M.J., Basarab-Horwath, I., Comparing electrode configurations for electrical impedance tomography. *Electron. Lett.* 1996, 32, 648-649.
- (7) Elfekey H., Bastawrous H., A., Okamoto, S., A touch sensing technique using the human body extremely low frequency fields, *Sensors*, 16 2049, 2016.
- (8) Elfekey, H., Okamoto, S., Yamada, Y., Localization of touch on granite based on AC hum noise, Proceedings of IEEE Global Conference on Consumer Electronics, pp. 163-164, Nagoya, 2017, Oct.
- (9) Cohn, G., Morris, D., Patel, S.N., Tan, D.S., Your noise is my command: Sensing gestures using the body as an antenna. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Vancouver, BC, Canada, 7-12 May 2011, 791-800.
- (10) Cohn, G., Morris, D., Patel, S., Tan, D., Humantenna: