

# 指先の影を用いた非ディスプレイ面へのタッチ検出技術の開発

松原孝志<sup>†1†2</sup> 新倉雄大<sup>†1</sup> 成川沙希子<sup>†1</sup> 森直樹<sup>†1</sup> 田野俊一<sup>†2</sup>

**概要:** 近年タッチ操作が広く普及しており、AR や MR の発展とともに、ディスプレイ面に限らず様々な面上でのタッチ操作の実現が求められてきている。本研究では、面上にセンサを設けることなくタッチ操作を実現する技術として、指先の影を用いて接触を認識する新たな技術を提案する。赤外カメラと2つの赤外照明を用いたシステムを構築し、認識精度について実験を行った。その結果、高精度に指先の接触を認識可能であることを確認した。

**キーワード:** ユーザインタフェース, タッチ操作, 画像認識, 影検出

## Touch Detection Method for Non-Display Surfaces Using Shadow of Finger

TAKASHI MATSUBARA<sup>†1†2</sup> TAKEHIRO NIKURA<sup>†1</sup> SAKIKO NARIKAWA<sup>†1</sup>  
NAOKI MORI<sup>†1</sup> SHUN'ICHI TANO<sup>†2</sup>

**Abstract:** In this paper we try to realize a system that enables users to interact with surrounding surfaces using touch interactions. For this purpose, we propose new touch detection technique which utilizes the shadows of a finger, and developed a system with an infrared (IR) camera and two IR lights. Since the shapes of a fingers shadows vary drastically depending on the distance between the surface and finger, our prototype system can detect touch.

**Keywords:** User Interface, Touch interaction, Computer vision, Shadow detection

### 1. はじめに

近年、スマートフォンやタブレット端末などの普及により、指でのタッチ操作が広く一般に用いられている。また、HMD (ヘッドマウントディスプレイ) やモバイル型プロジェクタなど、身近な空間に映像を表示可能なデバイスが発展してきている。今後、これらの発展に伴い、周囲の実空間の様々な面上に映像を重畳して表示し、重畳した映像に直接タッチ操作するシステムが求められるようになると思われる。このようなシステムを実現するためには、様々な面上において指先のタッチ検出を行う必要がある。ここで、様々な面とは身の回りにある壁面や机上、スクリーンなどを想定する。従って、平面に限らず曲面や突起物のある面上においてもタッチ操作できることが求められる。

本研究の目的は、平面・曲面を問わず、面上にセンサを設けることなくタッチ操作を検出することである。そこで、赤外カメラと2つの赤外照明を用いて指先の左右にできる影を利用して指先の接触を認識する新たな手法を提案する。

本報告の構成は以下の通りである。2章で非ディスプレイ面においてタッチ検出を行う従来手法とその問題点について述べ、3章で提案手法と目標を述べる。4章で課題解決のために開発した技術を説明する。5章で評価実験の結果を説明し、提案手法の有効性を示す。

### 2. 従来手法

身の回りにある面をタッチ操作に利用するシステムの提案は古くから行われている。Roeber[1]らは、ラインレーザを面に対して平行に照射し、面と接触した指が反射する光を検出することでタッチを検出するシステムを提案した。また、同様の仕組みを利用した光学式タッチパネルは、現在様々な場所ですでに利用されている。しかし、この方式では面上にセンサを設置する必要がある。また、認識対象の面が平面でなければならないなどの制約がある。

これらの制約を解決する手法として、Kinect などの 3D カメラを用いた接触認識技術が多数提案されている[2,3,4]。また、ステレオカメラを用いてタッチパネル操作を支援するシステムも提案されている[5,6]。Wilson[2]が提案したように、多くの手法ではデプス情報を用いてあらかじめ操作対象面の3次元形状を取得し、指が操作対象面に近づくと接触したと認識する。また、一部の手法では、指以外の物体が操作対象面に近づいても誤認識しないように、デプス情報に加えて、カラーカメラの情報を利用する手法が提案されている[4]。3D カメラを用いる手法は、比較的容易に面と指との接触が認識可能であることや、キャリブレーションなどにより曲面や突起物のある面でも接触認識が可能というメリットがある。しかし、3D カメラの奥行き推定精度が低く接触の誤認識が発生しやすいといった課題や、画角が狭く広い操作領域を一度に認識できないという課題が存在する。

†1 (株)日立製作所 研究開発グループ  
Hitachi Ltd. Research & Development Group

†2 電気通信大学  
The University of Electro-Communications

Wilson[7]の研究では、指と面の距離に応じて影の形状が変化することに着目し、1つの赤外カメラと1つの赤外照明を用いて指の側面に出る影の幅を検出することで、指先の接触を認識する。しかし、指先の影の幅は様々な理由によって大きく変化する。例えば、カメラと指と位置関係や、指がどのような姿勢で面に接触しているかによって影の幅は変化する。従って、指の影の幅だけでは高精度に接触を認識することは難しいと考えられる。

タッチ操作を検出するためには、「指先の接触」と「指先の位置」を認識する必要がある。Wilsonのように面上にカメラを設置しない手法では、指と面の隙間がカメラの死角となり直接観察することができない。従って、撮影画像で確認できる他の現象を介して接触を認識する必要があり、どのように接触検出の精度を確保するかが問題となる。

### 3. 提案手法

指先の接触を高精度に検出するために、指と面の距離に応じて指の影の形状が変化することに着目した。また、指と面の距離が影に表れやすくするために、ステレオカメラでの測距のように視差の効果を利用することを検討した。その結果、2つの照明により指の左右に影を作り、影そのものに視差と同様の効果が生じるようにすることを考えた。

提案手法は、2つの照明で作る影をカメラで撮影し、左右の影の距離や形状の変化を画像認識することで指先の接触を判定する。提案手法は以下の特徴を有する。

- センサ類を面上に設置する必要がなく、カメラと2つの照明を一箇所に集約して並べるため、設置性に優れ、壁面や机上など様々な面に適用できる。
- 曲面や突起物のある面においても影の変化は観察できるため、平面に限らず利用できる。
- カメラに広角レンズを使用しても影の変化は観察できるため、広い操作領域に対応できる。
- 影の形状の変化に加え、左右の影の距離や形状の違いを認識に利用するため、高精度にタッチを検出できる。

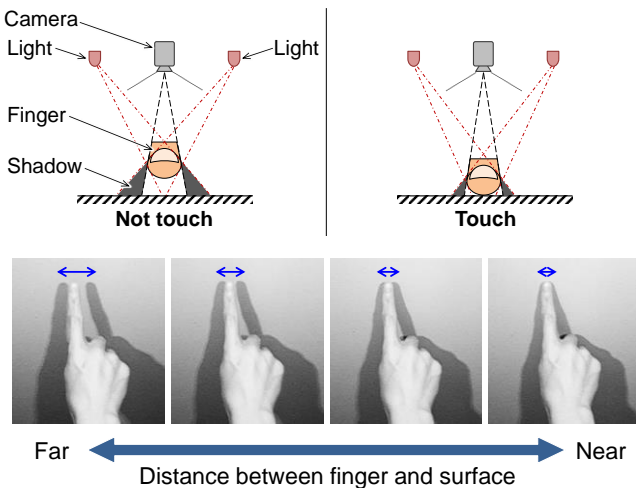


図 1 指先の影の変化

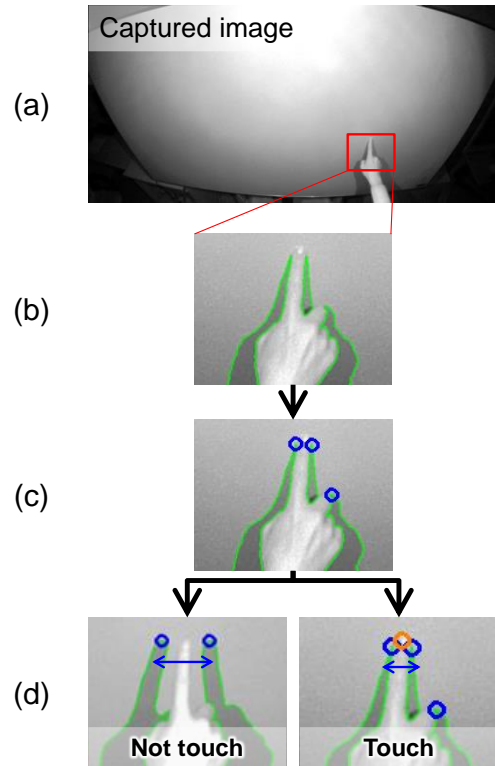


図 2 タッチ検出の手順

#### 3.1 基本原理

提案手法における指先の影の変化を図 1 に示す。図 1 では左右2つの照明の中央にカメラを配置した際に、カメラで撮影される影が変化する様子を示している。指先が面から離れているときは、指の左右にある2つの影の距離が離れる。また、影の先端の形状は、指と同じように丸みを帯びる。一方で指先が面に接しているときは、左右2つの影が指先に近づき、指先に向かって影の形が細くなる。このように指と面の距離に応じて、2つの影の距離や形状が変化する。従って、カメラでは直接観察できない指と面の近づき具合を、影の変化により認識することができる。

提案手法におけるタッチ検出の手順を図 2 に示す。手順は以下となる。

- 背景差分の輝度に基づき、影の領域を抽出する。
- 影の領域の輪郭を検出する。
- 影の輪郭から先端位置などの特徴点を抽出する。
- 左右2つの影の先端同士の距離が近いなど、特徴点の状態からタッチを判定する。

#### 3.2 目標

上述の通り、提案手法のように面上にカメラを設置しない手法では、タッチ操作の検出において「指先の接触」を検出することが難しい。そこで、本研究ではこの指先の接触を検出することに重きを置き、80インチの操作対象面の全面において5mm以内に近づいた指をタッチしていると検出し、タッチの検出精度を90%以上にするを目標にした。この理由を次に述べる。

まず、操作対象面のサイズを 80 インチとした理由を述べる。80 インチはミーティング用のホワイトボードや大型ディスプレイで多く利用されるサイズである。横幅は約 170cm であり、人が面の中央に立った場合に、立ち位置を変更することなく面の端から端まで手を伸ばすことができる限界に近いサイズとなる。

次に、操作対象面に 5mm 以内に近づいた指をタッチとして検出する理由を述べる。80 インチ前後の大画面のホワイトボードやディスプレイにタッチパネル機能を付加する方式として、従来手法で述べた光学式タッチパネルが多く用いられる。実用化されている光学式タッチパネルを検証したところ、タッチ判定の精度は約 5~10mm であった。面に対して指が 5~10mm の距離まで近づいたときにタッチが検出されるため、タッチ判定精度の最小値は 5mm となる。また、公共で利用されるタッチパネルディスプレイでは、画面保護のために 5mm 厚の強化ガラスを表面に張ったものがあり、この場合は表示面から 5mm 手前に離れた面をタッチ操作することになる。このような既存製品に用いられているタッチ判定距離以下であれば、人が操作したときの違和感は少ないと考え、これを目標値とした。

### 3.3 提案システム構成

先に述べた基本原理による高精度なタッチ検出の実現可能性を確かめるため、実際に動作するシステムを構築した。図 3 に提案システムの構成を示す。提案システムは 2 つの赤外照明と 1 つの赤外カメラで構成され、左右の赤外照明によってつくられた指の影を、中央の赤外カメラで撮影する。赤外の照明およびカメラを使用する理由は、可視光でできる影の影響を受けないようにするためである。赤外照明と赤外カメラは 850nm の波長に対応するものを用いた。赤外カメラの解像度は 1920\*1080 であり、視野角が約 120 度の広角レンズを用いることで、80 インチの広い撮影面に対応できるようにした。また、カメラと左右の照明

の距離は、カメラの広角レンズに照明の直接光が入らないように設計し、それぞれ約 20cm とした。

提案システムと操作対象面の位置関係を図 3 の下部に示している。操作対象面の大きさは 80 インチである。操作対象面が全て撮影可能となるようにカメラと照明の位置および向きを設計し、提案システムの位置は、操作対象面の端からおよそ水平方向に 25cm、垂直方向に 53cm 程度離れた位置とした。

## 4. 課題解決に向けた開発技術

提案システムを用いて事前検証を行った結果、以下の 2 つの課題が明らかになった。

### 課題 1：操作対象面の全面での影領域の抽出

操作対象面内の位置によって赤外照明の明るさが異なるため、全面で漏れなく影の領域を抽出できるようにすることが課題となる。特に、面の端で照明から遠くなる所は暗くなるため、カメラ映像で視認できないほど影が薄くなってしまふ。面の端を明るくするために赤外照明の照度を上げることも考えられるが、あまり照度を高くすると照明から近い所でカメラ映像が飽和するため、影の輪郭が不鮮明となる。従って、カメラ映像が飽和しない照明の照度において、面の端の薄い影を抽出できるようにする必要がある。

### 課題 2：面内の位置によって異なる影の変化への対応

操作対象面内の位置によって影の形状や左右の影の距離の変化が異なるため、この違いに対応して精度良く接触を判定することが課題となる。特に、面の端でカメラから遠くなる所では、カメラ映像の中で指が小さくなり、指の左右の影の距離の変化も小さくなるため、タッチを検出しにくくなる。また、面の中央と端では左右の影の距離や影の太さなどの変化の仕方が異なるため、面内で様にタッチ検出することはできない。

上記の 2 つの課題を解決するために開発した技術を次に述べる。

### 4.1 影領域の抽出

操作対象面内の赤外照明の明るさの違いに対応し、全面で漏れなく影を抽出するために以下の技術を開発した。

#### (1) 背景差分による影領域の抽出

影領域は、操作対象面のみを予め撮影した背景画像と、操作対象面にかざされた手・指などを含む現在の画像を比較し、背景画像から輝度が低下している画素の背景差分を取ることで抽出する。

影領域の抽出に際しては、赤外カメラのイメージセンサの性能や赤外ライトのちらつきによって、画像の輝度にノイズが発生することを考慮する必要がある。図 4 に一定の撮影環境において各画素の輝度の変化を計測した結果を示す。図 4 (a) は輝度を計測したポイント、図 4 (b) は各ポイントの輝度を 256 段階で表した際に、連続して撮影した

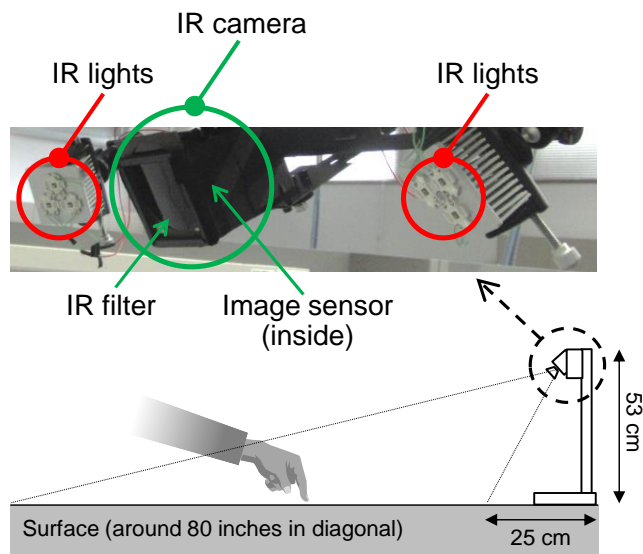


図 3 システム構成

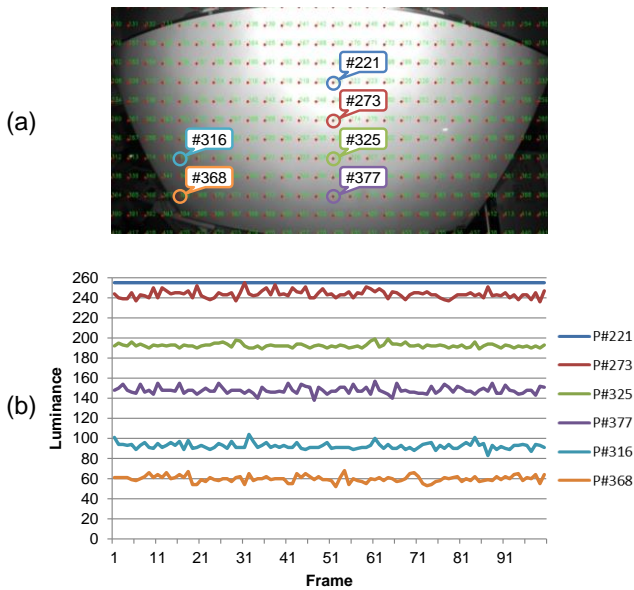


図 4 輝度の測定

100 フレームでの輝度の変化を示している。例えば、画面中央下部の#377 の位置では輝度は概ね 140~160 の間で推移しており、ノイズによる輝度の振幅は約±10 であることが分かる。

この測定結果から、背景差分に用いる背景画像には、予め撮影した複数枚の画像を利用することにした。画像内でのポイントでも 30 フレーム以内には輝度の振幅の上限・下限に近い値があるため、一定の撮影環境において連続した 30 フレームの画像を記録し、平均輝度画像  $I_{mean}$ 、および標準偏差画像  $I_{sd}$  を求めた。

(2) 画素ごとの閾値適用

先に述べた背景画像を用いて撮影した画像から影領域を抽出した。画像のある座標  $(x, y)$  の輝度  $I(x, y)$  が、 $I_{mean}(x, y)$  の輝度よりも低下している場合、その画素を影領域として抽出する。また、輝度の低下の判定には閾値を設けた。これは、撮影時のノイズによる輝度の低下を考慮したためである。この閾値は、 $I_{sd}$  おいてノイズレベルが大きい画素の輝度の振幅から定め、画像全体で一括して 1 つの閾値を用いた。従って、この閾値の幅を超えて平均輝度画像  $I_{mean}$  から輝度が低下した画素が影領域となる。

図 5 (a) に影領域の抽出結果を示す。図 5 (a) は面に人差し指が接触した状態であり、緑色の線で囲まれた範囲が影領域として取得できた。図 5 (a) では、指の左側では影領域を正しく取得できているが、指の右側では実際の影の領域の一部しか取得できておらず、領域がまばらに途切れている。これはノイズレベルが大きい画素に合わせて閾値を設定した結果、画面の端などの暗い場所で、輝度の低下幅が小さい影領域が取得できていないためである。

そこで、標準偏差画像  $I_{sd}$  を用いて画素ごと閾値を定めることにした。提案システムではノイズがガウス分布に従っていると仮定し、95%信頼区間に収まるノイズ値以上に輝

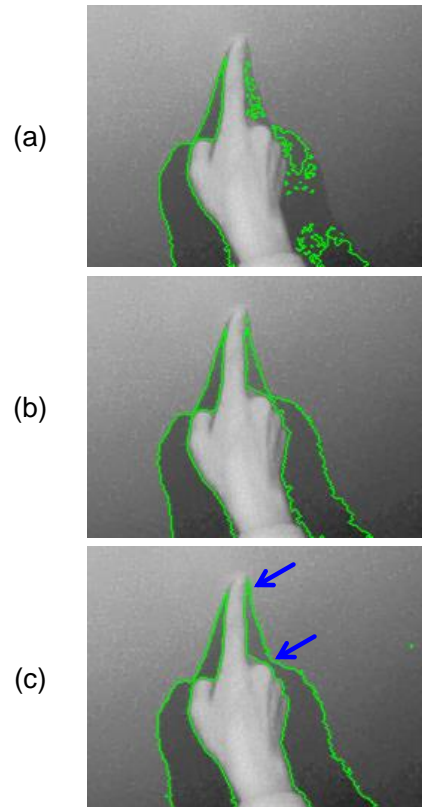


図 5 影領域の抽出

度が低下した画素が影であるとして、下記条件式に基づいて判定した。

$$I_s(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } I(x, y) < I_{mean}(x, y) - 2 * I_{sd}(x, y) \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

ただし、 $I_s$  は影領域の画素のみ 1 の値をとり、それ以外は値が 0 となる画像とする。以下、 $I_s$  を影画像と呼ぶ。

上記条件式により画素ごとに閾値を適用したことにより、図 5 (b) に示す影領域が取得できた。同図では、指の右側の影領域の改善が確認できる。

(3) 既得影領域の周辺の補正

画素ごとの閾値適用のみでは、指の先端付近などで影領域が取得できない部分がまだ残る。図 5 (b) では指の右側で先端付近の影領域が途切れていることがわかる。この原因は、輝度の低下幅が小さいことに加え、面に接している指先端付近では、赤外照明の光が指に反射して面を照らし返すことで、影をより薄くなっていることが考えられる。

そこで、図 5 (b) で既に取得できている影領域の周辺には影が繋がる画素が残されている可能性が高いと考え、既得の影領域の周辺では輝度低下を判定する閾値をさらに小さく設定して、影を再探索する仕組みを取り入れた。その結果、図 5 (c) に示す影領域が取得できた。同図では、特に矢印で示した指の先端付近などで、影として正しく取得できる領域が拡大したことが確認できる。

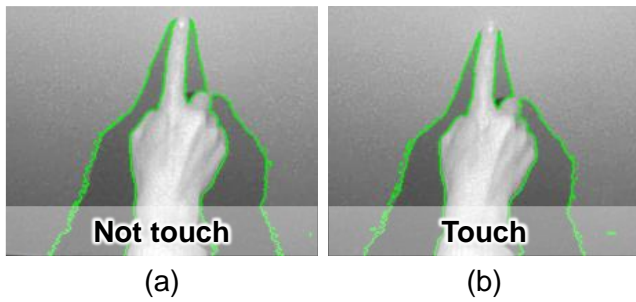


図 6 面の下端における影の変化

#### 4.2 影の変化の検出

次に、抽出した影領域の変化から、タッチを検出する技術について述べる。操作対象面内の位置によって影の形状や左右の影の距離の変化が異なるため、この違いに対応して精度良くタッチを判定しなければならない。図 6 に、操作対象面上でカメラから離れた位置において、指先が面から 10mm 離れるように浮かせたときと、指先をタッチしたときの影の領域を示す。この 2 つを比較すると影の変化が小さいことが分かり、特に画面から離れた位置では単一の特徴からではタッチを判定することは難しい。そこで、提案システムでは複数の影の変化の特徴を組み合わせることで指のタッチ判定を行い、精度向上を図った。タッチの判定に用いた影の変化を検出する方式は 3 種類ある。以下、これらを順に説明する。

##### (1) 2つの影の先端同士の距離 (方式 A)

3.1 節で述べたように、指を面にかざすと指の左右それぞれに影ができ、左右の影同士の距離は、指が面に近いときほど近くなる。したがって、各影領域の先端部分を検出し、その先端同士の距離が所定値よりも近ければ、影の先端同士の中間位置で面に指先が近づいていると判定することができる。これを方式 A とした。

しかしながら、先に述べたように方式 A は特に面上でカメラから離れた位置で、指先と面の距離が近い場合には、2つの先端同士の距離の変化が小さくなる。従って、方式 A は主に、面内に複数の影領域がある場合に、ある程度の距離まで指先と面が近づいた箇所を選別するために有用となる。

##### (2) 影の先端の尖り具合 (方式 B)

影の先端の角度を計測し、その角度がある一定値よりも尖っていればタッチ、そうでなければタッチしていないと判定することとし、これを方式 B とした。

図 6 に着目すると、図 6 (a) で指先が 10mm 浮いているときは、爪の先端にまわり込むように影ができていたため、影の先端がやや丸みを帯びた形状になる。一方、図 6 (b) で指先がタッチしているときは、左右の影の先端の形状は鋭角に尖っている。このように指先が面に近づいた状態では、影の先端の尖り具合から、指先と面の近づきのより小さい変化を検出することができる。

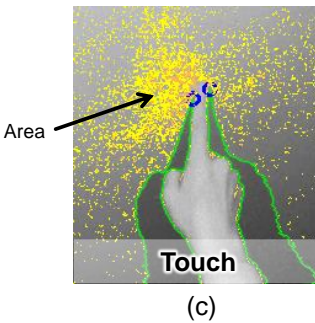
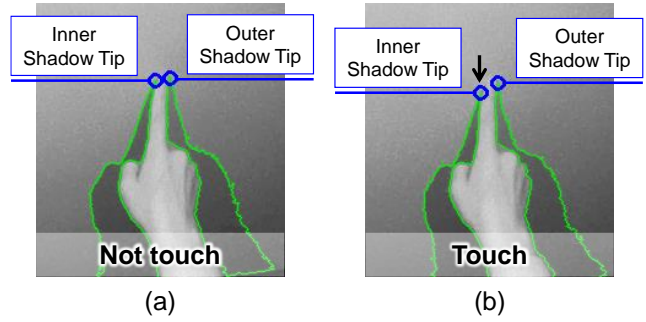


図 7 面の右端における影の変化

##### (3) 影の先端の位置関係 (方式 C)

面の端では、2つの赤外照明の光が同じ方向から指に照射されるため、影の変化は上記方式で述べたものとは必ずしも同じではない。図 7 は、2つの赤外照明より右側の位置で指先が面に近づいているときの様子を示しており、図 7(a) では指先が面から 10mm 浮いており、図 7 (b) では同位置で指先がタッチしている。指先がタッチしているときは、左右の影の先端位置の高さに差異がある。一方で指先が 10mm 浮いたときはその差異はほとんどない。

この現象は、指をタッチしたときに赤外照射の光が指に反射して面を照らし返すことに起因する。2つの赤外照明は2つとも指の左上の方向から光を照射しているため、指に反射する光の量も多くなる。図 7 (c) は、輝度が背景画像のノイズの振幅を超えて上昇した領域を黄色に色づけして示しており、指の左側に輝度が上昇した領域が集中していることがわかる。この領域では薄い影が輝度の上昇に打ち消されてしまい、ほぼ視認できない状態となる。その結果、指の左側では影の先端位置が下がり、右側の影の先端位置との差異が生じる。

そこで、面の端で、指に対して2つの赤外照明の光が同じ方向から照射される位置では、左右の影の先端位置の差異が所定値よりも大きければタッチ、そうでなければタッチしていないと判定することとし、これを方式 C とした。

以上の方式 A, B, C を組み合わせることでタッチの判定を行った。なお、面上の位置に応じて、各方式の判定結果を適用する優先度や、各方式に用いるパラメータを変更している。以上に述べた処理を含む、提案システムのタッチ検出のアルゴリズムを図 8 に示す。

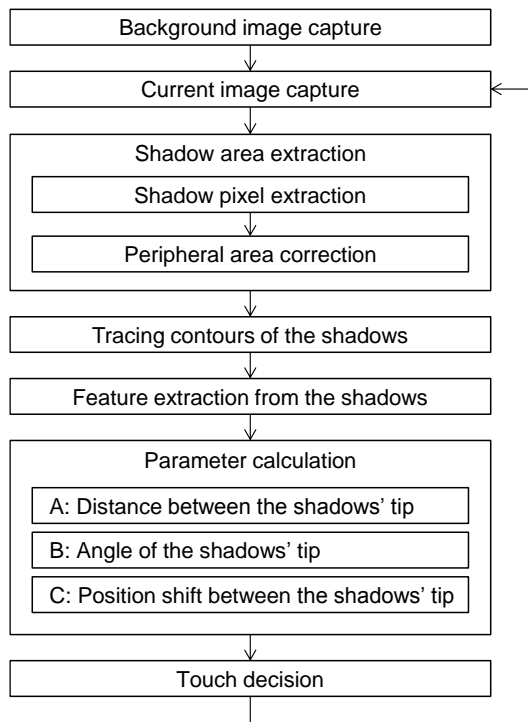


図 8 タッチ検出のアルゴリズム

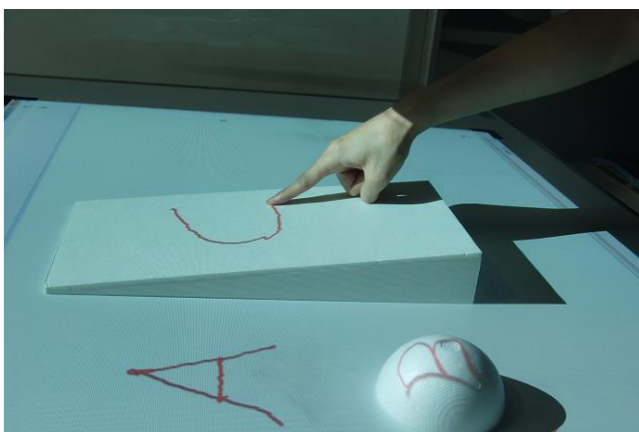


図 9 タッチ操作による文字の描画

図 9 に提案システムによるタッチ操作を用いて、プロジェクタで映像投射した描画ソフトを操作している様子を示す。タッチ操作により面上に文字を描画することが可能であり、平面ではないところでも操作できることを確認した。

## 5. 評価実験

提案システムのタッチの検出精度を評価した。以下、詳細について述べる。

### 5.1 評価方法

本評価では、操作対象面の複数の位置において、指先をタッチしている場合と 5mm 程度指を浮かせている場合の 2 種類の画像を取得し、それぞれにおいてどの程度正しくタッチを検出できるかを評価した。評価用画像は以下の様に取得した。

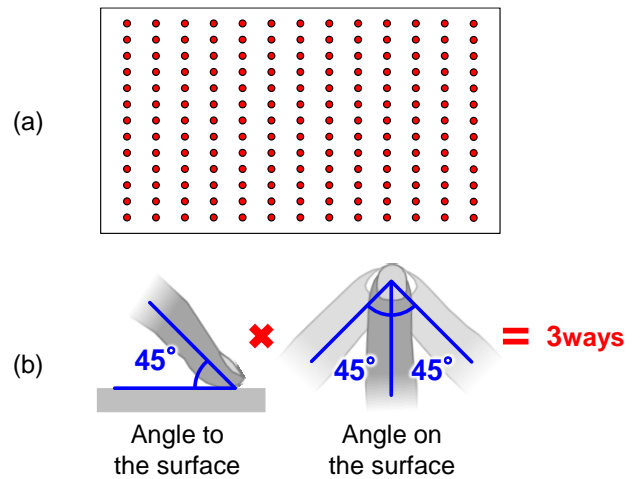


図 10 タッチ検出精度の評価方法

- 接面位置：169 通り（図 10 (a), 縦方向, 横方向それぞれ 13 ヶ所）
- 指の姿勢：3 通り（図 10 (b), 静止状態で 3 通り）
- 接面状態：2 通り（タッチ, 非タッチ: 5mm）

従って、取得した評価用画像はタッチ時 507 枚（169 箇所 × 3 姿勢）、非タッチ 507 枚（169 箇所 × 3 姿勢）である。

### 5.2 結果

表 1 にタッチ検出精度の評価結果を示す。タッチ状態の画像をタッチとして検出する真陽性は 95.9%, また、非タッチ状態の画像を非タッチとして判定する真陰性は 95.5% であり、全体での検出精度は 96.1% となった。また、偽陽性は 4.53%, 偽陰性は 3.35% であり、陽性反応の中率は 95.5%, 陰性反応の中率は 96.6% であった。

評価結果より、80 インチの操作対象面において、タッチした状態と 5mm 浮かせた状態との識別精度は 96.1%, 偽陽性は 4.54%, 偽陰性は 3.35% となったことを確認した。以上の結果から、80 インチの操作対象面の全面において 5mm 以内に近づいた指をタッチしていると検出し、タッチの検出精度を 90% 以上にするという本研究の目標を達成した。

表 1 評価結果

		True Condition		
		Condition positive	Condition Negative	
Predicted condition	Test outcome positive	True positive 490	False negative 23	Positive predictive value 95.5%
	Test outcome negative	False positive 17	True negative 484	Negative predictive value 96.6%
		Sensitivity 95.9%	Specificity 95.5%	

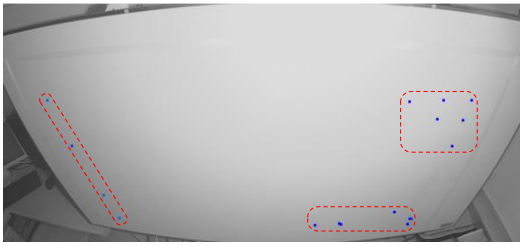


図 11 誤検出の発生位置

### 5.3 考察

図 11 は評価において偽陽性が発生した位置を示しており、青丸で表記された位置が偽陽性の発生位置である。同図から操作対象面内でカメラから遠い位置で検出されることが多い。これは、カメラから遠い位置では影が小さく写るため、指が 5mm 浮いている状態と接面している状態で影の変化も小さく、誤検出が発生しやすくなっているためと考えられる。カメラから遠い位置は画面の端であるため、レンズの歪みが影の変化の認識に影響したことも考える。また、特に面の右側で誤検出が多く発生している。これは照明の当たり方が左右均一ではなかったことが影響していると考えられる。

## 6. まとめ

本稿では、ディスプレイ面に限らず様々な面上でのタッチ操作を実現するために、赤外カメラと2つの赤外照明を用いて指先の左右にできる影を利用して指先の接触を検出する新たな手法を提案した。また、提案手法によりタッチ検出を行うシステムを開発した。タッチ検出精度の評価により、80 インチの操作対象面の全面において高精度にタッチを検出できることを確認し、提案手法の有効性を示した。

今後は、操作対象面上で誤検出が多く残る位置への対策を行い、タッチ検出精度の向上を図るとともに、操作対象面のサイズ変更に対応するなどのシステム利用時の自由度の向上を図りたい。

## 参考文献

- [1] Roeber, H., Bacus, J., and Tomasi C.: Typing in thin air: the canasta projection keyboard a new method of interaction with electronic devices, In Proc. CHI EA '03, pp.712-713, 2003.
- [2] Wilson, D. A.: Using a Depth Camera as a Touch Sensor, In Proc. ITS '10, pp.59-72, 2010.
- [3] 渡邊航, 小曳尚, 武山泰豊, 馬場雅裕: プロジェクタとデブスカメラを用いた投影面タッチ UI の開発と操作性向上, SSII2015 第 21 回画像センシングシンポジウム, DS2-02, 2015.
- [4] 奥祐太, 斎藤諒太, 稲垣刀麻, 青木公也, 高橋周, 増田浩二: 3D・2D 画像処理による壁面への指先タッチ判定, ViEW2015 ビジョン技術の実利用ワークショップ, pp.394-398, 2015.
- [5] 久野素有, 山下淳, 金子透: ステレオカメラを用いたタッチパネル操作支援システムの構築, 電気学会論文誌 D Vol.131 No.4 pp.458-465, 2011.
- [6] 久野素有, 山下淳, 金子透: ステレオカメラを用いたタッチパネル操作支援システムにおける指先とパネルの誤接触防止, 精密工学会学術講演会講演論文集, pp.916-917, 2011.
- [7] Wilson, D. A.: PlayAnywhere: A Compact Interactive Tablet Projection-Vision System, In Proc. UIST '05, pp.83-92, 2005.