

コンシューマ・デバイス論文

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^{1,2,a)} 新倉 雄大¹ 成川 沙希子¹ 森 直樹¹ 田野 俊一²

受付日 2016年9月30日, 採録日 2017年2月27日

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^{1,2,a)} TAKEHIRO NIKURA¹ SAKIKO NARIKAWA¹ NAOKI MORI¹
SHUN'ICHI TANO²

Received: September 30, 2016, Accepted: February 27, 2017

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, これらの発展にともない, 周囲の実空間の様々な面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

考えられる. このようなシステムを実現するためには, 身の回りにある机上や壁面などの様々な面上で指先のタッチ検出を行う必要がある. これらの面は, 物が置かれる, 突起物があるなどの状態が多く, 面上や面の周囲の様々な状態に対応してタッチ検出できることが求められる. そこで, 本研究では「平面上に物体や突起物が存在する非ディスプレイ面」を操作対象の面として定義し, この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を目的とした.

本報告では, 2つの赤外照明で指先の左右に影を作り, 赤外カメラにより指先の接触を認識する新たな手法を提案する. 2章では非ディスプレイ面でタッチ検出を行う従来手法とその問題点を述べ, 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. また, 5章で評価実験の結果を述べ, 提案手法の有効性を示す.

¹ 株式会社日立製作所研究開発グループ
Hitachi Ltd. Research & Development Group, Kokubunji,
Tokyo 185-8601, Japan

² 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo
182-8585, Japan

a) takashi.matsubara.pw@hitachi.com

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 ら [1] 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、この方式では操作対象面が平面でなければならず、面上に物体を置くことはできないという制約がある。また、センサを面上に設置する必要がある。

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], [5], [6], [7]。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 [8], [9], [10]。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 [11]。3D カメラを用いる手法は、面と指を区別して見分けることが比較的容易なことや、キャリブレーションなどにより物体や突起物のある面にも対応して認識できる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。また、3D カメラは画角が狭くなりやすいため、操作対象面が広い場合にはカメラと操作対象面の距離を確保するためのスペースが大きくなるという課題が存在する。たとえば、操作対象面のサイズを 80 インチとした場合、画角 70° のカメラでは設置方向にかかわらず 120 cm 以上の距離を確保する必要がある。

Wilson [12] 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。たとえば、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。したがって、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。したがって、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る。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

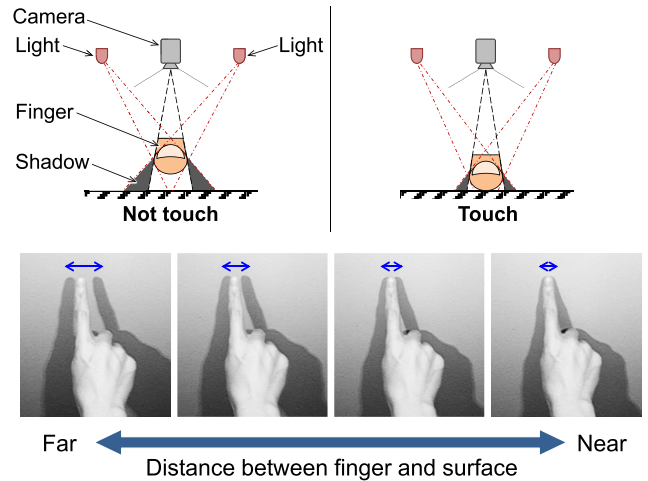


図 1 指先の影の変化

Fig. 1 Shapes of finger's shadows vary depending on distance between surface and finger.

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。提案手法は従来手法に比べて以下の利点を有する。

- 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1カ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。
- 物体や突起物が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、カメラと操作領域の距離を大きく離すことなく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。

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の様子を示している。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。したがって、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。

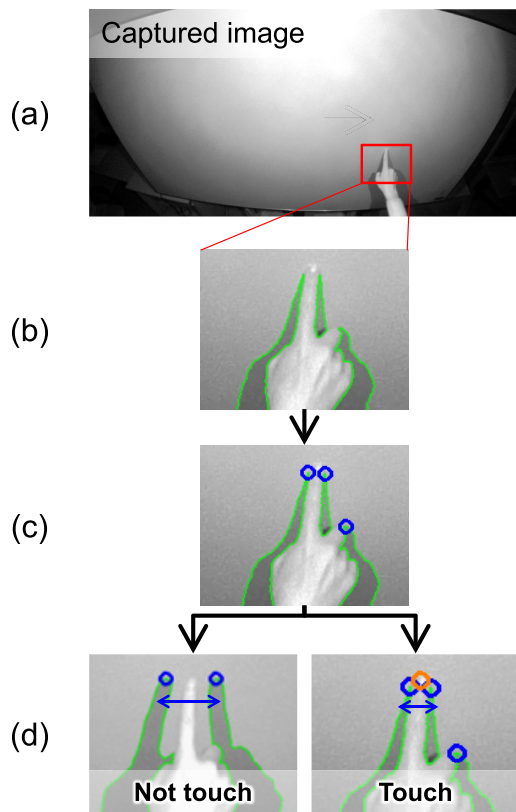


図 2 タッチ検出の手順

Fig. 2 Procedure of touch detection in the proposed method.

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。

- (a) 背景差分の輝度の変化に基づき、影の領域を抽出する。
- (b) 影の領域の輪郭を検出する。
- (c) 影の輪郭から先端位置などの特徴点を抽出する。
- (d) 左右 2 つの影の先端どうしの距離が近いなど、特徴点の状態からタッチを判定する。

3.2 目標

上述のとおり、提案手法のように面上にカメラを設置しない手法では、タッチ操作において「指先の接触」を検出することが難しいため、本研究ではこの指先の接触を精度良く検出することに重きをおいた。そこで、本研究において検出するタッチの定義を、80 インチの操作対象面の全面において指が 5 mm 以内に近づいた状態とし、カメラ撮影の 1 フレームにおいてタッチの検出精度 90% 以上を目標にした。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 170 cm 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 5 mm 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 5~10 mm であった。面に対して指が 5~10 mm 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 5 mm 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 5 mm 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 5 mm 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る。

カメラ撮影の 1 フレームにおいてタッチの検出精度 90% 以上を目標とした理由を述べる。まず、本研究は連続性をともなう人の操作の検出が対象であり、リアルタイムなカメラ撮影画像に対して画像認識を行う。このような画像認識では 2 つ以上のフレームを用いて認識結果を補間することが多くなされる。タッチ検出精度 90% 以上は、誤検出 10% 以下と言い換えることができ、1 フレームで誤検出が 10% 以下であれば、2 フレーム連続で誤検出することは 1% 以下となる。したがって、フレーム間の補間によりタッチ誤検出 1% 以下、すなわちタッチ検出精度 99% 以上にできると考える。このような理由で、1 フレームごとのタッチ検出精度が 90% 以上であれば、ユーザ操作に影響あるタッチ検出精度として 100% に近い精度を実現できると考え、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 850 nm の波長に対応するものを用いた。赤外カメラの解像度は $1,920 \times 1,080$ 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した。赤外照明は放射強度 210 mW/sr、照射半値角 $\pm 75^\circ$ の LED を片側に各 3 個使用した。

また、カメラと照明の設置位置については、本提案システムの適用対象の一例として短焦点型プロジェクタを想定し、一般に実用されている短焦点型プロジェクタの筐体サイズおよび設置位置に収めることを基準にした。提案システムと操作対象面の位置関係を図 3 の下部に示す。操作対象面の大きさは 80 インチである。操作対象面がすべ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

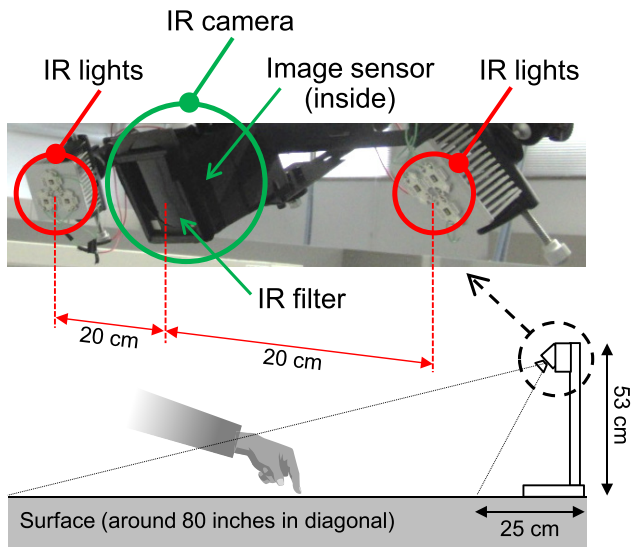


図 3 システム構成

Fig. 3 Configuration of our prototype system.

計し、提案システムの位置は、操作対象面の端からおおよそ水平方向に 25 cm、垂直方向に 53 cm 程度離れた位置とした。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 20 cm 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。事前検証は操作対象面の様々な位置でタッチする動作を行い、その際にカメラ映像で視認できる影の濃さや形状を観察した。この結果、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とところは暗くなるため、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ところでカメラ映像が飽和して一部画素の輝度が最大となる、いわゆる白とびが発生するため、影の輪郭が不鮮明となる。したがって、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ところでは、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、面内のすべての

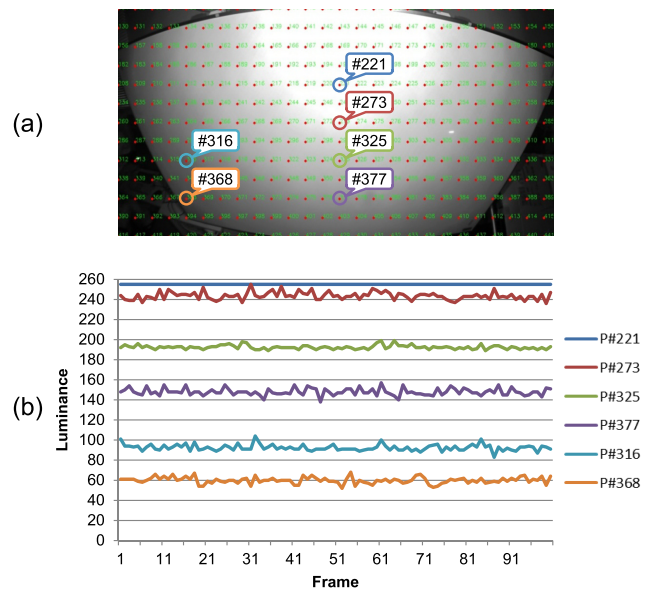


図 4 輝度の測定

Fig. 4 Measurement of luminance of the operation surface.

位置で一様の影の変化によって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 (1), (2), (3) の 3 つの技術を開発した。影領域の抽出は、以下の (1), (2), (3) の処理をフローとして順に行う。

(1) 背景差分による影領域の抽出

影領域は、操作対象面のみをあらかじ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とることにより抽出する。

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 100 フレームでの輝度の変化を示している。たとえば、画面中央下部の #377 の位置では輝度はおおむね 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、あらかじめ撮影した複数枚の画像を利用することにした。画像内のどのポイントでも 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。したがって、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

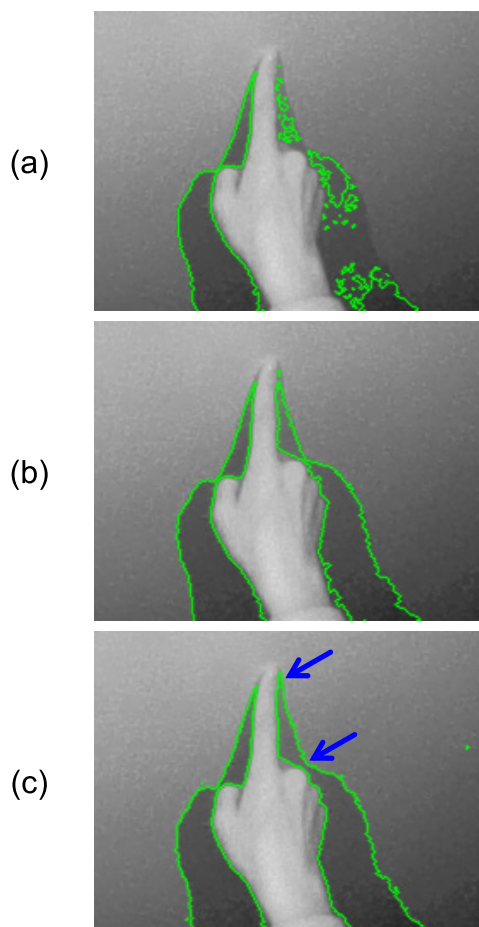


図 5 影領域の抽出

Fig. 5 Improvement of shadow extraction by applying developed technique.

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分かる。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、影がより薄くなっていることが考えられる。

そこで、図 5(b) ですでに取得できている影領域の周辺には影がつな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。

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

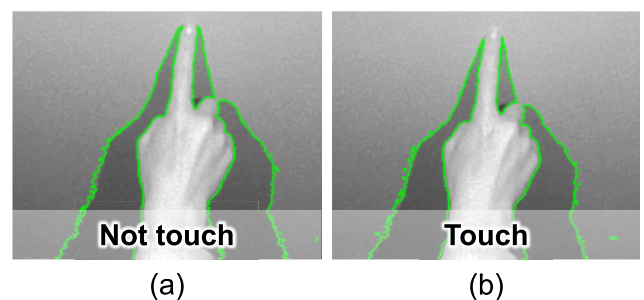


図 6 面の下端における影の変化

Fig. 6 Shadow change on the operation surface at a position far from the camera.

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つの影の先端どうしの距離 (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、左右の影どうしの距離は、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、その先端どうしの距離が所定値よりも近ければ、影の先端どうし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つの先端どうしの距離の変化が小さくなる。したがって、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るため、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。

(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AやB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分かる。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。

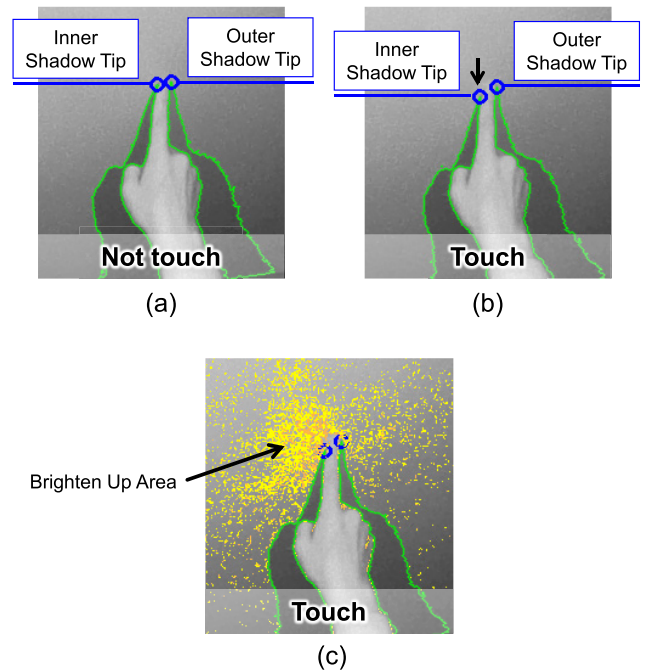


図7 面の右端における影の変化

Fig. 7 Shadow change on outer side of the operation surface.

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。

4.3 タッチ操作の検証

提案システムで検出したタッチを、プロジェクタで映像投射したPCアプリケーションに反映して実際のタッチ操作を検証した。図9に斜面状の突起物がある面においてタッチ操作を検証した様子を示す。同図では、タッチ操作で色が変わるボタンを複数配置したアプリケーションを用いている。突起物の上や周囲でタッチ操作を確認し、すべてのボタンにおいてタッチ操作できることを確認した。また、図10にプロジェクタで映像投射した描画アプリケーション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、斜面状の突起物や半球状の突起物の上などの平面ではない部分でも操作できることが確認できた。しかしながら、面上にある突起物周囲の一部において、赤外カメラの撮影画像内で突起物によって指先が隠れてしまう場所や、突起物による影ができている場所については、タッチ操作を検出することができなかった。このタッチ操作が検出できない場所は、図10においてプロジェクタが投射した光で影ができている部分に

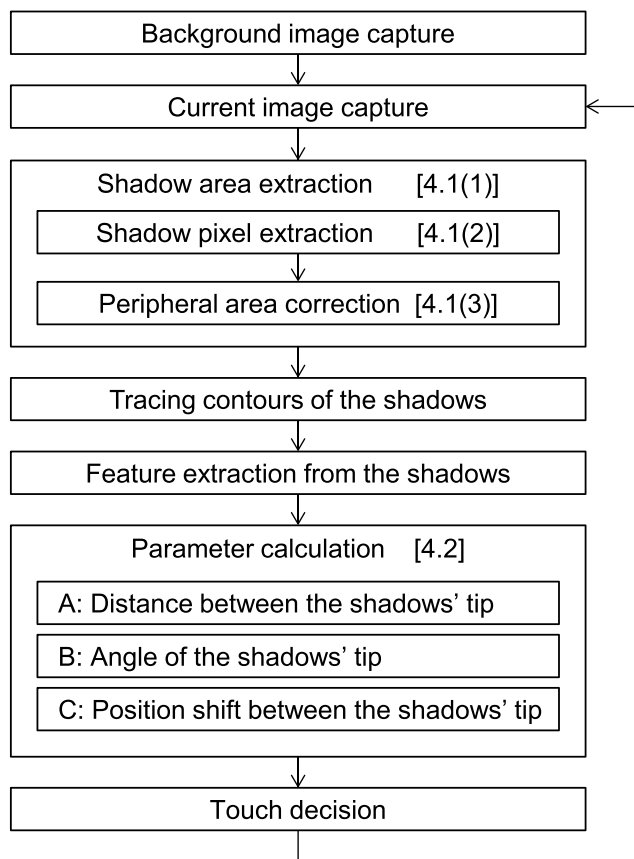


図 8 タッチ検出のアルゴリズム

Fig. 8 Algorithm of touch detection in proposed method.

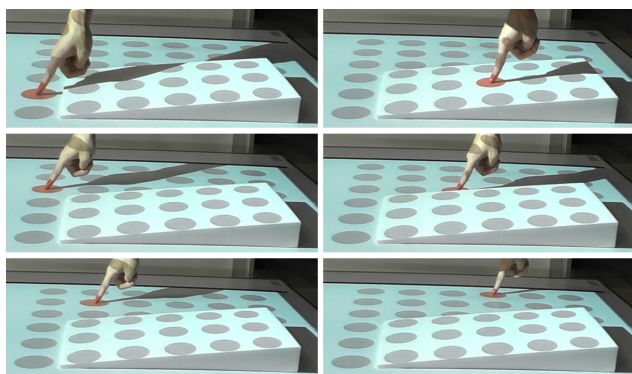


図 9 突起物がある面でのタッチ操作の検証

Fig. 9 Verification of touch operation on surface having a sloped protrusion.

おおむね該当する.

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

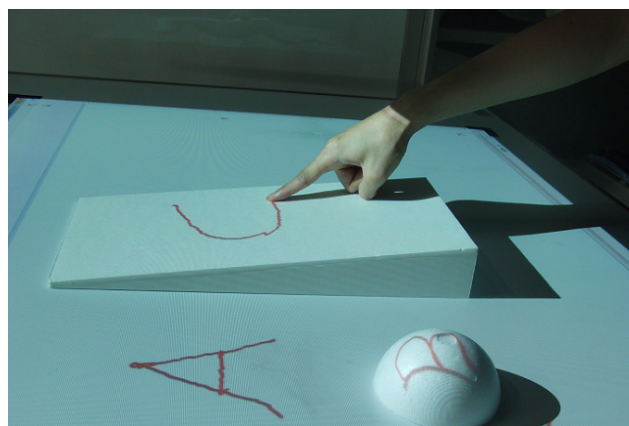


図 10 タッチ操作による文字の描画

Fig. 10 Verification of touch operation using drawing application.

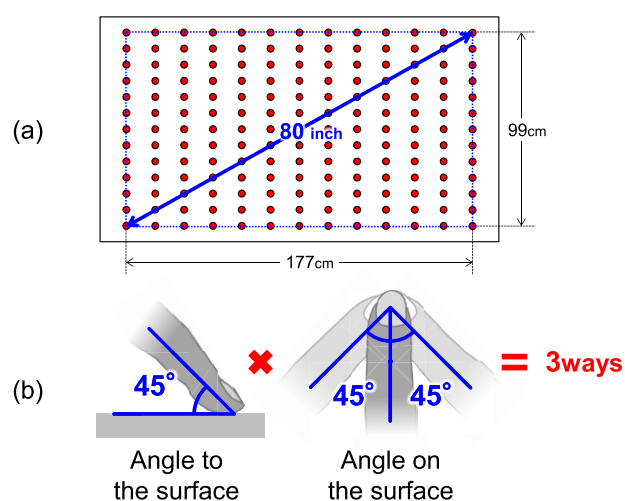


図 11 タッチ検出精度の評価方法

Fig. 11 Evaluation of touch detection accuracy.

タッチを検出できるかを評価した。評価用画像は以下のよう
に取得した。

- 接触位置：169 通り (図 11(a))
- 指の姿勢：3 通り (図 11(b), 静止状態で 3 通り)
- 接触状態：2 通り (タッチ, 非タッチ: 5mm)

評価を行う接触位置は、図 11(a)に示すように、80 インチサイズの端から端までの間に、縦方向と横方向それぞれ 13 カ所を等間隔に設定し、操作対象面の全面にわたって設けた。接触位置の間隔は、縦方向が約 8 cm、横方向は約 15 cm であり、特に縦方向についてはカメラ映像に写る面のサイズが上下で異なるため、接触位置の密度を高くした。取得した評価用画像はタッチ時 507 枚 (169 カ所×3 姿勢)、非タッチ 507 枚 (169 カ所×3 姿勢) である。なお、実験環境の照明の照度は 500~600 lx であり、これは一般的なオフィス環境や学校の教室と同じ程度である。

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

表 1 評価結果

Table 1 Results of touch detection accuracy.

		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%	

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，陽性反応的中率は95.5%，陰性反応的中率は96.6%であった．なお，タッチ状態の画像を非タッチとして検出する偽陽性は，指の姿勢が傾いている場合に多くあった．

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．

5.3 考察

評価において特に偽陽性が発生した画像では，指の姿勢が傾いているものが多かった．指の姿勢が傾いている場合には，左右の影の先端どうしの位置が左右方向に大きくずれるため，特に先に述べた方式 A において，影の先端どうしの距離が所定値まで近づかなかったことが影響していると考えられる．

また，偽陽性と偽陰性に共通して，操作対象面内でカメラから遠い位置で誤検出が多く発生していた．図 12 は評価において偽陽性が発生した位置を青丸で示している．カメラから遠い位置では影が小さく写るため，指が5mm 浮かれている状態と接触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．



図 12 誤検出の発生位置

Fig. 12 Positions where false positives occurred on the operation surface.

以上の誤検出の要因と考えられる観点は，4 章で述べた課題と共通するものがあるが，評価結果は先に述べた開発技術によって誤検出の発生が低減された結果であると考えられる．したがって，開発技術の適用に際して，各種判定の閾値を操作対象面の位置や指の傾きにに応じて調整することで誤検出のさらなる低減ができると考えている．

6. まとめ

本研究では，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．本報告では，1 章で本研究の背景と目的を示し，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た．3 章では提案手法の基本原理と目標を述べ，提案手法により実際にタッチ検出を行うシステムを示した．また，4 章で提案手法の課題解決のために開発した技術を説明した．5 章では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たことを述べ，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りたい．また，4 章で述べたとおり，提案手法は面上にある突起物の周囲の一部ではタッチ検出ができないため，この点は今後の課題として，操作対象となる映像の表示方法と合わせて解決を図るなどを検討したい．本報告では指1本で操作するシングルタッチ操作についての検証および評価を述べたが，提案手法は複数の指先に対して同様の検出を行うことでマルチタッチ操作にも適用可能と考えており，引き続きマルチタッチ操作に関する検証を進めたい．また，本報告の提案システムは，赤外カメラや照明の設置位置と操作対象面のサイズが固定である．したがって次のステップとして，これらを変更してもタッチ検出精度を維持できるように，操作対象面の位置やサイズを事前計測してタッチ検出を補正する仕組みを取り入れたい．さらには，操作対象面の位置やサイズがリアルタイムに変化する HMD などを利用可能とするために，操作対象面を動的に計測するなどして，シ

ステム適用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, *Proc. CHI EA '03*, pp.712–713 (2003).
- [2] Wilson, D.A.: Using a Depth Camera as a Touch Sensor, *Proc. ITS '10*, pp.59–72 (2010).
- [3] 渡邊 航, 小曳 尚, 武山泰豊, 馬場雅裕: プロジェクタとデプ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] Benko, H. and Wilson, A.D.: DepthTouch: Using a depth sensing camera to enable free-hand interactions on and above the interactive surface, *Microsoft Research technical re-port*, MSR-TR-2009-23 (2009).
- [5] Dippon, A. and Klinker, G.: Kinecttouch: Accuracy test for a very low-cost 2.5d multitouch tracking system, *Proc. ITS '11*, pp.49–52, ACM (2011).
- [6] Kim, D., Izadi, S., Dostal, J., Rhemann, C., Keskin, C., Zach, C., Shotton, J., Large, T., Bathiche, S., NieBner, M., Butler, D.A., Fanello, S. and Pradeep, V.: Retrodepth: 3d silhouette sensing for high-precision input on and above physical surfaces, *Proc. CHI '14*, pp.1377–1386, ACM (2014).
- [7] Parwani, E., Pawar, A., Ajwani, C. and Pole, G.: Virtual touch screen using Microsoft Kinect, *International Journal of Engineering and Computer Science*, Vol.3, Issue 2, pp.3962–3964 (2014).
- [8] Agarwal, A., Izadi, S., Chandraker, M. and Blake, A.: High precision multi-touch sensing on surfaces using overhead cameras, *Proc. TABLETOP '07*, pp.197–200, IEEE (2007).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Wilson, D.A.: PlayAnywhere: A Compact Interactive Tabletop Projection-Vision System, *Proc. UIST '05*, pp.83–92 (2005).



松原 孝志 (正会員)

2002 年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士前期課程修了。同年株式会社日立製作所入社。2016 年より電気通信大学大学院情報理工学研究科博士後期課程在席。ヒューマンインタフェースに関する研究開発に従事。2013 年情報処理学会 CDS 研究会優秀論文賞受賞。



新倉 雄大

2014 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程修了。同年株式会社日立製作所入社。ヒューマンインタフェースに関する研究開発に従事。2014 年 Augmented Human International Conference Honorable Mention Award 受賞。2016 年日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞。日本バーチャルリアリティ学会会員。博士 (情報理工学)。



成川 沙希子

2008 年慶應義塾大学大学院理工学研究科前期博士課程修了。同年株式会社日立製作所入社。組込み機器のユーザインタフェースに関する研究開発に従事。



森 直樹

1991 年大阪大学工学部精密工学科卒業。1993 年同大学工学研究科精密工学専攻修了。同年株式会社日立製作所入社。ヒューマンマシンインタフェースに関する研究開発に従事。



田野 俊一 (正会員)

1983 年東京工業大学院総合理工学研究科システム科学専攻修士課程修了。同年株式会社日立製作所入社。1990–91 年カーネギーメロン大学客員研究員。1991–95 年国際ファジィ工学研究所。1996 年電気通信大学大学院情報システム学研究科助教授。2000–01 年マサチューセッツ工科大学客員研究員。2002 年電気通信大学教授。人工知能, 知識工学, 自然言語理解, あいまい理論, 知的ユーザインタフェースの研究に従事。人工知能学会, 日本ファジィ学会, 言語処理学会, AAAI, IEEE, ACM 各会員。博士 (工学)。