

指の識別に基づく 3D オブジェクトの直観的な操作インタフェース

馬場 信吾^{†1} 梶 克彦^{†1} 河口 信夫^{†1}

近年, スマートフォンやタブレットデバイスなどの携帯端末ではタッチパネルディスプレイを用いたマルチタッチ操作インタフェースが主流となっている. マルチタッチディスプレイにより同時に複数箇所の検出が可能となり幅広い操作が可能となった. 本研究の目的は, タッチパネルでの 3D 物体の操作において, 指の姿勢を考慮した操作パターンを実現可能とし快適な操作インタフェースの獲得である. 具体的には布をめくる, 紙を折り曲げるなどといった人間が行う自然な動作をタッチパネル上で実現可能にする. これによりタッチパネルでの操作バリエーションの多様化が期待でき, より複雑な操作体系にも応用可能であると考えられる. 今回は, それらの動作を実現するための基礎的検討として, 異なるペアの二本指で行う同一のジェスチャを異なるジェスチャと識別可能であることを確認する. また, 識別されたジェスチャを用いた 3D オブジェクトの操作を行うアプリケーションについて述べる.

An Intuitive Interface based on finger Recognition for Operating 3D Objects

SHINGO BABA,^{†1} KATSUHIKO KAJI^{†1}
and NOBUO KAWAGUCHI^{†1}

Recently, mobile devices such as smartphones and tablet PCs which have multi-touch display are becoming more and more popular. Multi-touch display allows recognition of multi-point contact with the surface, so we can get various inputs on multi-touch display. The purpose of this paper is to create new comfortable intuitive user interface based on the finger recognition for operating 3D objects. For example, the gestures of turning over pages, folding clothes are possible by touching the multi-touch display. By using this interface, even if different pairs of fingers are used to do the same gesture, it can be recognized as different gesture. It can be recognized as different gestures even use different pairs of fingers doing same gestures. In the last section, we show the application of operating 3D objects using gestures. study to achieve this technique, we verify it is possible to be able to regard same gestures with two fingers of

different pairs as different gestures.

1. はじめに

計算機技術の進歩は著しく, 様々な場面において計算機システムが利用される時代となった. 近年では小型携帯端末の高性能化が進み, 多様な操作インタフェースが実現されている. 特にスマートフォンやタブレットデバイスなどの携帯端末ではタッチパネルディスプレイを用いたマルチタッチ操作インタフェースの普及が進んでいる. タッチパネルインタフェースは画面に表示されたアイコンに直接触れて操作を行うことが可能なため, 直感的な操作感が得られる. 同時に複数箇所の検出が可能となり複数の指を使った操作が可能となった. 従来型の携帯電話の市場は現在縮小傾向にあり, 今後スマートフォンやタブレットデバイスのシェアがますます拡大していくことが見込まれる. これに伴いタッチパネルユーザインタフェースの重要性も高まっていくと考えられる. ここで, 現在で用いられているマルチタッチジェスチャについて述べる. 表 1 に現在主流の操作を示す.

表 1 現状のジェスチャ

ジェスチャ	説明
タップ	一本指で画面を押す操作, マウスのクリックに相当
ダブルタップ	一本指で素早く 2 回連続で触れる
スクロール	一つの指で触れたまま上下へ移動
パン	一つの指で触れたまま上下左右に移動
フリック	画面に触れた指を少しだけスライド
ピンチ	主に人差し指と親指で触れてつかむ動作
ロングプレス	一本指で一定時間押し続ける

具体的なジェスチャとそのジェスチャに割り当てられた操作の例を示す. Apple 社の製品である Macbook Pro にはマルチタッチインタフェースが搭載され, 複数本の指を利用したジェスチャ操作によるインタフェースを実現している¹⁾. ピンチ, スプレッドによる縮小拡大, 2 本指で水平方向へスライドするとスクロール, 親指と別の 3 本指でピンチするとアプ

^{†1} 名古屋大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Nagoya University

リケーションの一覧表示などがある。

しかし、現状のマルチタッチユーザインタフェースにおいては、以下に示す指の姿勢の情報までは考慮していない。

- 指がどの方向を向いているのか
- どのくらいの強さで触れたのか
- どの指なのか
- どういった指の組み合わせなのか

指の姿勢を判断するには従来のインタフェースで用いられた指の接触箇所、移動量、検出数、動きの組み合わせなどの基本的な接触情報では不十分である。指の姿勢を判断するためには操作する指から得られる接触面積、形状、角度などの接触領域での関係が必要である。例えば、検出点の座標のみから指の角度の推定は困難であるが、接触面の形状や面積が取得できればそれらの情報の関係性から推定可能であると考えられる。指の姿勢を推定できれば、片手2本指と両手2本指の操作に異なる機能の割り当てや指ごとのジェスチャ操作の割り当てなどが可能となる。その結果、操作バリエーションの多様化により快適なユーザインタフェースを実現できると考える。

本研究ではこれまでのマルチタッチインタフェースでは取得できなかった指の持つ情報を積極的に用いることで指の姿勢を考慮したインタフェースの実現を目指す。指から得られる接触領域情報を取得するために、FTIR(Frustrated Total Internal Refraction)方式タッチパネルを用いて計測を行う。FTIR方式タッチパネルはHanらによって考案されたマルチタッチ技術であり接触面の形状や、面積、角度などの情報が取得可能である²⁾。

指の姿勢を推定する手順を示す。FTIR方式タッチパネルより種々のジェスチャを行い、検出領域ごとの角度、面積などの情報の関係を調査する。同時にタッチパネル上での指の触れ方の傾向を調査する。得られた情報同士の関係や指の拘束条件に基づき総合的に指の姿勢の推定を行っていく。

本稿の構成は以下の通りである。2章では関連研究の紹介、3章ではFTIR方式タッチパネルから得られる接触領域情報とその情報から推定可能だと考えられる指の姿勢について、4章ではタッチパネルから得られる接触領域情報から推定された角度について傾向の調査、5章では指の付加的な情報を利用した指の姿勢の識別の例として、片手二本指と両手二本指でのピンチジェスチャの識別について述べる。

2. 関連研究

マルチタッチシステムでのセンシング方式とジェスチャ認識手法に関する研究について述べる。マルチタッチシステムのセンシング方式として静電容量方式、カメラを用いた光学方式の二つに分類できる。

静電容量方式を利用したものとして、Rekimotoは複数の手の位置と形状を認識するセンサ技術としてSmartSkinを提案している³⁾。SmartSkinは実世界におけるテーブルや壁面などの上での複数の手による操作を認識するためのセンサ技術である。網状の電極を面上に敷設し、網交点と人体との距離を静電容量変化によって計測し、各交点からの値を時分割計測することで、センサ面上での2次元位置とセンサ面からの距離を同時に判定することを可能とした。SmartSkinでは手形状や複数の指の認識によって手の形状そのものをコマンドとして与えるインタフェース、物理的なオブジェクトをコマンドや制御用のツールとして用いるインタフェースを可能としている。

光学方式では、赤外光源を用いて撮影した画像に対して画像処理を行い指先の位置を検出する方法が主に用いられている。FTIR方式はアクリルパネルなどの透明な板の内部において赤外光の全反射を使用した方式で、指先が触れたとき外部へ乱反射した赤外光をカメラで検出する。他のセンシング方式と比べ安価でありディスプレイ部分の大型化が容易である。LaserLightPlane(LLP)方式はアクリルパネルなどの透明な板の表面に赤外光ラインレーザーを放出し、乱反射した赤外光をカメラで検出する。光学方式を利用したものとして、坂本らは入力面に弾性素材を用いて押し込む、ずらす、ねじる操作を入力面の変形を入力として実現したインタフェースWrinkleSurfaceを提案している⁴⁾。入力認識手法には、はしわの発生や指の動きの変化を指の接触領域の輝度値を使用した特徴量抽出を行い、各入力と特徴量を関連付けた尤度関数を利用している。

本稿では以上に示した関連研究で得られた知見をもとに、タッチパネル上の指の接触情報から指の姿勢を推定を行い、指が接触する際に接触領域の面積・距離・角度といった情報の相互関係の傾向を考慮したインタフェースの実現を目指す。そのためには接触面上での指の特性の理解が必要である。例えば川合らは指先の力発揮と皮膚接触面積の変化の関係を明らかにしており⁵⁾、我々が採用するFTIR方式タッチパネルにおいてこの関係を用いることが出来る。

3. FTIR 方式タッチパネル

本研究では指がタッチパネル上でどのような姿勢であるかという情報を考慮したインタフェースの実現を目的としている。指の形状や面積、角度などの情報を取得可能とするために、実験用のタッチパネルとして FTIR 方式タッチパネルを採用した。FTIR の原理に基づき、FTIR 方式タッチパネルを設計し製作を行った。図 1 に製作した FTIR 方式タッチパネルを示す。現在広く用いられているタッチパネル方式である抵抗膜方式や静電容量方式では我々の求める指の姿勢を推定するための情報を得ることができない。

3.1 FTIR の原理

FTIR 方式タッチパネルの原理について説明する。FTIR 方式タッチパネルでは光を透過する物質内での全反射が、その物質の界面が他の物質と接触し、拡散される現象を利用する。アクリルパネルの側面から入射した赤外線光はアクリルパネル上の指の接触した部分のみが乱反射し、赤外線がアクリルパネル外に拡散する。指が接触していない部分では、赤外線はアクリルパネル内で全反射するため、指の接触した部分のみ赤外線を観測できる。この乱反射した赤外線を撮影し、接触領域の認識が可能となる。

3.2 FTIR 方式タッチパネルの構成

FTIR 方式タッチパネルはアクリルパネル (300mm × 400mm)、土台となるフレーム、キャプチャ用カメラ、プロジェクタから構成される。アクリルパネルの手前と奥の辺には 40mm ピッチで 10 個ずつ計 20 個の赤外線 LED(東芝 TLN231) が埋め込まれている。LED の明るさは LED 明度コントローラによって調節可能である。赤外線キャプチャ用のカメラとして Point Grey 社製の赤外線カメラ Point Grey FireFly MV FMVU-03MTM-CS を用いた。可視光フィルタには富士フィルムの光吸収・赤外線透過フィルタ (IR フィルタ) を使用した。IR78(780nm 以下の波長を 50%以上カット) で十分に可視光のフィルタリングができています。また、アクリルパネルの下面部にはスクリーンの役割を持たせるためにトレーシングペーパーを取り付けた。この部分にプロジェクタで映像の提示を可能にした。プロジェクタは KG-PL021X(加賀電子株式会社) を使用した。

3.3 FTIR 方式タッチパネルより検出される指の情報

FTIR 方式タッチパネルから検出される指の情報について述べる。FTIR 方式タッチパネルではアクリルパネルから拡散した赤外線をカメラでキャプチャし、画像処理を施すことによりマルチタッチを実現している (図 2)。画像処理にはインテルが開発したコンピュータビジョンライブラリ OpenCV(Open source Computer Vision) を利用する。はじめにカメラ



図 1 FTIR 方式タッチパネル

からキャプチャされた画像に対してガウシアンフィルタによる平滑化処理を施しノイズを除去しグレースケール化、二値化処理を行う。次に検出点を把握するために輪郭抽出を行う。輪郭に囲まれた領域が指の接触領域である。ここで、各接触領域について楕円形状のフィッティングを行う。楕円をフィッティングさせることで、重ね合わせた楕円が持つパラメータを指の情報とみなして扱うこととした。楕円の持つパラメータとして中心座標、面積、長軸長さ、短軸長さ、長軸の水平方向に対する傾き、周の長さなど多くの情報を得ることができる。これらの情報を用いると、例えば接触面積から接触した際の力の予測やどの指であるかの推定を行うことができると考える。

FTIR 方式タッチパネルより検出される指の情報から指の姿勢を判断するための情報として今回は角度に注目した。指が接触したときの角度と面積の関係や、手の拘束条件から指の姿勢を推定可能であると考えた。接触した指の角度を近似された楕円の長軸の水平方向に対する傾きとして定義する (図 3)。これにより、指がタッチされた際の角度の計測を可能とした。

4. 指角度推定手法の評価

作成した FTIR 方式タッチパネルから得られる指の角度は正しい指の角度を表現できているかを評価する。上記の手法により、検出領域の楕円の傾きを取得可能となった。これをもとに FTIR 方式タッチパネルから得られる指の特徴について調査を行った。被験者はタッチパネル上の指定されたターゲット角度に対してタッチする、正確な測定ができるかを評価する。被験者は本研究室のメンバー 12 名 (男性 10 名、女性 2 名) の協力を得て行った。

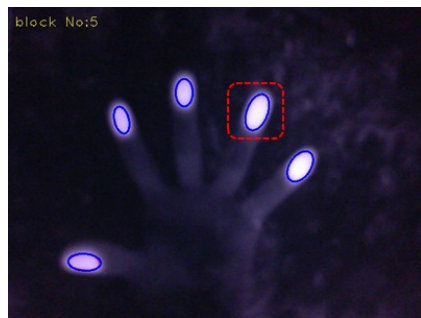


図 2 キャプチャ画像

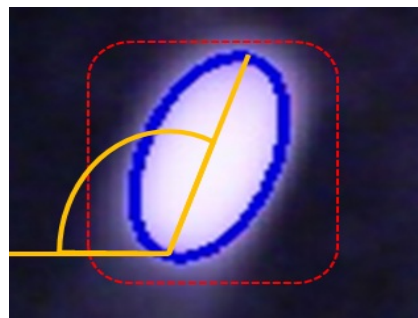


図 3 指の角度の定義

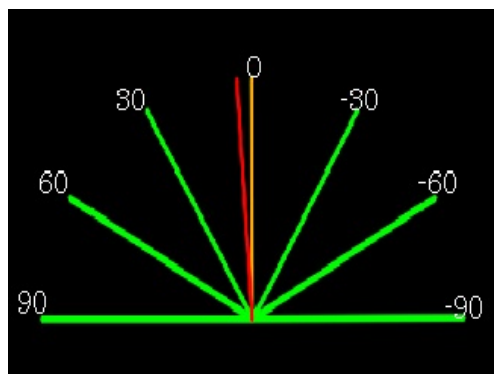


図 4 ターゲット角度 (緑), 測定中の角度 (橙), 推定角度 (赤)

4.1 計測手順

被験者は FTIR 方式タッチパネルの正面に立ち、タッチパネルに提示されたターゲット角度 (図 4) の線に指を合わせるようにタッチする。このときの検出角度を測定しターゲット角度とともに記録する。提示する角度は反時計回りに -90 度から 30 度刻みに 90 度までの合計 7 つの角度を指定した。計測はそれぞれの角度に対して左右全ての指について行った。

4.2 指角度認識精度

計測結果について述べる。図 5 は右手と左手のターゲット角度と検出角度との差をヒストグラムの形式で示したグラフである。横軸が検出角度とターゲット角度との差を表し、縦軸がそれぞれの頻度を表している。ここでターゲット角度との差が ± 35 度よりも大きい値

に対しては、誤りであると判定する。計測データ全体の誤検出率は全てのデータに対する誤認識されたデータの割合とする。データ総数 840 のうち、左右で合計 140 の誤りが含まれており誤検出率は 16.7%となった。

指ごとの誤検出率を表 2 に示し、被験者ごとの誤検出率を表 3 に示す。表 2 から左右のどちらも親指の誤検出率が高いことがわかる。また小指は左右どちらも誤検出率は低くなっている。誤検出が生じた原因として楕円の長軸の方向が指の方向と一致しない場合の存在が挙げられる。これはタッチパネルに対して指を突き立てるように触れた場合に生じる。図 6 に、指を寝かせた状態と立てた状態でのタッチパネル接触面の形状を示す。これより、指を寝かせた状態では楕円の長軸が指の方向と一致するが、指を立てた状態では接触面の形状が円形に近づき、楕円近似した場合の長軸の向きにばらつきが生じてしまう。表 3 から被験者によって誤検出率に差が生じることが確認できる。エラーが出やすい人と、出にくい人がいることが確認できた。誤検出率が被験者 F は左右ともに 50%を超える一方で、0.0%の被験者もいた。このような差が生じた原因として、被験者のタッチする指の亚克力パネルに対する角度が異なっていたことが挙げられる。誤検出率の高い被験者 F は他被験者と比べ背が高く、タッチパネルに対する指の角度が大きくなったことが原因として考えられる。逆に誤検出率の低い被験者 H はタッチパネルに対する指の角度が小さかったと考えられる。以上の結果から、必ずしも指の向きは接触面にフィッティングした楕円の長軸の向きとなるわけではないことが確認できた。

この問題に関しては今後改善していかなければならない。改善するための一つのアイデアとして接触面積に応じて楕円の長軸か短軸のどちらの軸の角度を指の角度とするかを決定するパラメータの導入を考える。指が突き立てた状態で接触するときは接触面積は一般的に小さい値になり、逆に指が寝た状態であれば接触面積は大きな値となる。このパラメータを導入により誤検出率を抑えられると考える。

表 2 左右の指ごとの誤検出率 [%]

指	左手誤検出率	右手誤検出率
親指	29.8	23.8
人差指	7.1	19.0
中指	20.2	15.5
薬指	21.4	16.7
小指	4.8	8.3

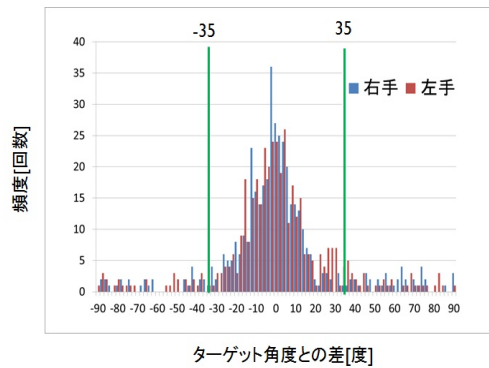


図 5 ターゲット角度と検出角度との差のヒストグラム

表 3 被験者ごとの誤検出率 [%]

被験者	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
左手	22.9	11.4	11.4	20.0	5.7	60.0	17.1	5.7	11.4	20.0	8.6	5.7
右手	25.7	25.7	2.9	11.4	11.4	54.3	25.7	5.7	0.0	11.4	14.3	17.1

4.3 指角度推定傾向

4.3.1 角度ごとの傾向

検出角度ごとの傾向について調べる。左手と右手の検出角度ごとのヒストグラムを図 7,8 に示す。図 7,8 より、左右の指に関して次のことがいえる。右側のターゲット角度-90度、-60度、に対する検出角度はターゲット角度よりも左側(差が+の方向)にピークが存在し、逆に、被験者から見て左側のターゲット角度に対しては、ターゲット角度よりも右側(差が-方向)にピークが存在することを確認した。角度ごとの傾向としてタッチパネルにタッチする際は、検出される角度はより中心方向にややずれて検出されることがわかった。この原因として、正面を向いた状態で指を左右の角度へ合わせる際、手首は直角方向へは曲がりにくい。この性質が結果に影響したと考えられる。

4.3.2 指ごとの傾向

指ごとのターゲット角度と検出角度との差を示したヒストグラムを図 9,10 に示す。全体的にはターゲット角度に対して正規分布している。しかし、各の指に着目した場合、以下に示す傾向が確認できる。図 9 において、親指と薬指に注目すると、ターゲット角度より

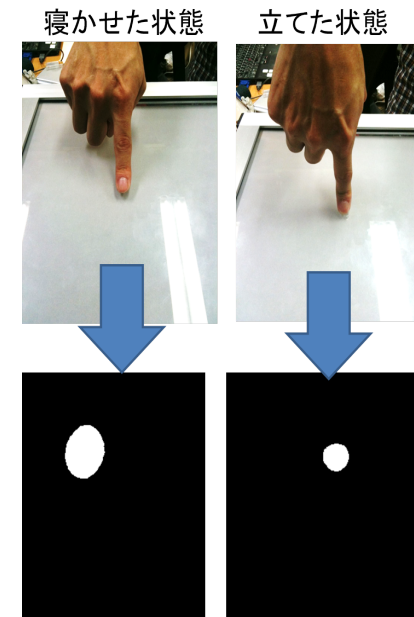


図 6 指の角度による接触面の楕円形状の形状の違い

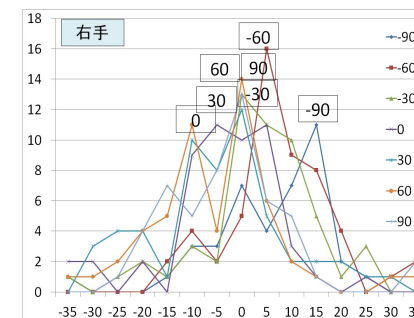


図 7 角度ごとの傾向 (右手)

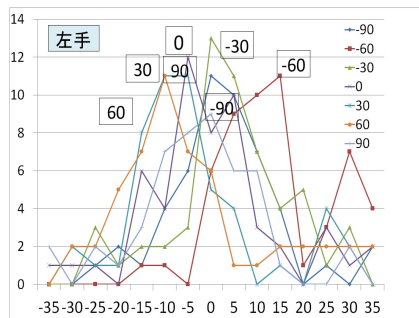


図 8 角度ごとの傾向 (右手)

も左側 (差が+方向) に出やすいことが確認できる。また、中指、人差し指、小指はターゲット角度との差は見られない。この原因としては中指、人差し指、小指は指の腹の部分がタッチパネル面に接触する場合が多いことが挙げられる。例えば右手の薬指で-60度の目標角度をタッチするとき、薬指の小指側の側面がパネルと接触しやすい。このとき近似した楕円の長軸の向きはユーザが意図する方向よりも中心方向へ傾いた角度になる。この結果から、タッチパネルに触れる際に指の腹の部分ではなく、指の側面が接触している場合には意図する角度よりも中心方向へ傾いた角度が検出される傾向にあることが確認できた。

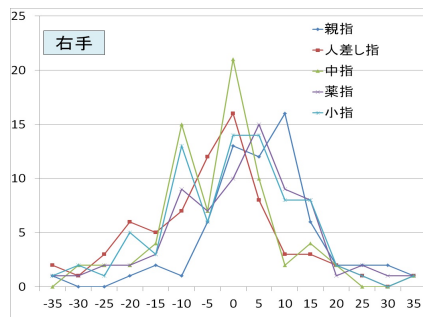


図 9 指ごとの傾向 (右手)

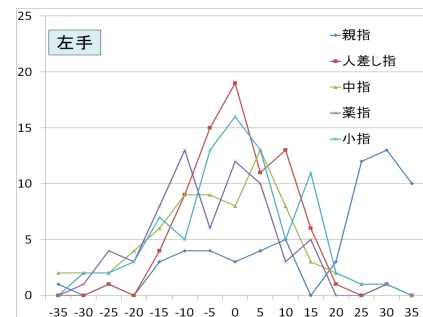


図 10 指ごとの傾向 (左手)

5. 指の情報を用いたジェスチャ識別

5.1 ジェスチャ識別手法

4章までは指の姿勢を推定するために有効な指の情報として角度についての調査を行ってきた。従来のインターフェースでは検出される箇所は点でしか表現されないため、指の姿勢を識別することは困難である。そこで、本章では指の姿勢を推定するために情報を利用した指の姿勢の識別の例として、タッチパネルから得られる指の角度と接触した指同士の距離を考慮したジェスチャ識別について考える。対象とするジェスチャは二本指での操作として一般的なピンチ操作とした。ピンチ操作を片手の親指と人差し指で行う場合と、両手の人差し指で行う場合の2つのケースを考える(図11)。この2つの場合において接触面の情報をもとに、ジェスチャ分類を行う。その結果を利用し、同様のジェスチャを行っていたとしてもジェスチャを行う指のペアが異なっている場合は異なるジェスチャーであると識別する。このジェスチャ識別を実現させるためにまずタッチパネルからそれぞれの動作における角度と距離の関係を測定を行い、次にサポートベクターマシン (SVM)⁶⁾を用いたジェスチャ判別を行う。OpenCV内のRSVMによるパターン認識⁷⁾を用いた。また、カーネル関数にはRBF(Radial Basis Functions)を用いた。

5.2 識別実験

収集したデータとして、各ジェスチャをタッチパネル上で、タッチパネルに対する角度や指の向きに変化を持たせながら20回行い、指のなす角と指同士の距離を記録した。結果として630個のサンプリングデータを得た。そのうちのランダムな8割を学習データとし、残り2割をテストデータとしてSVMによる評価を行い、これを10回繰り返した。

評価結果は以下の通りである。図12は指のなす角と指同士の距離を表したものである。横軸が指同士の距離、縦軸が指のなす角である。赤色は両手のジェスチャ、緑色は片手のジェスチャである。SVMによる分類は図13のようになる。おおむね片手と両手のジェスチャを識別できていることが分かる。また、ジェスチャ識別の精度は、適合率・再現率・F値共に約99%であった。この結果より、指の情報を用いたジェスチャの判別が可能であることが確認できた。クラスの境界上に存在する点の判別については、時系列データをもとに分類を行っていく。

5.3 3Dオブジェクト操作アプリケーション

識別されたジェスチャを用いて3Dオブジェクトの操作を行うアプリケーションを作成した(図14)。実装にはOpenGLを用いた。このアプリケーションでは布を動きをばねモデ

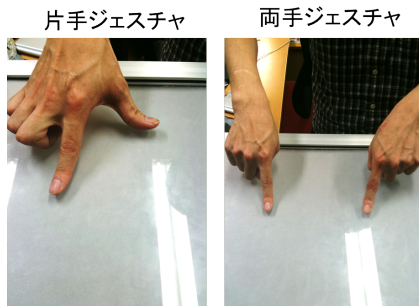


図 11 (左) 片手ジェスチャ,(右) 両手ジェスチャ

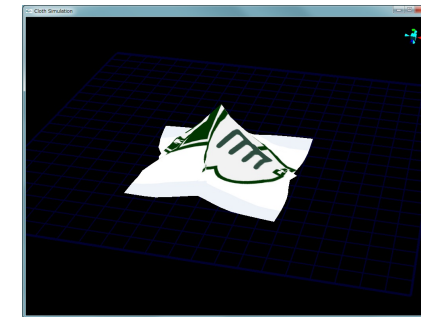


図 14 3D オブジェクト操作アプリケーション

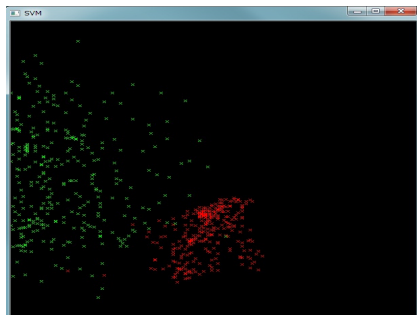


図 12 指のなす角と指同士の距離 (赤:片手, 緑:両手)

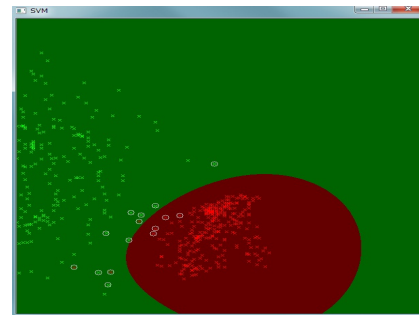


図 13 SVM による判別結果

ル⁸⁾により表現した 3D モデルをジェスチャ操作を用いた操作を実現した。ジェスチャ入力による操作は、片手二本指操作でつまみ上げる、両手二本指操作で拡大縮小の操作を割り当てた。

6. まとめ

今回は指の姿勢を考慮したジェスチャ操作を実現可能とし快適な操作インタフェースの獲得のための基礎的検討として、FTIR 方式タッチパネルより得られる指の情報の測定と評価を行った。タッチパネルに触れる際に指の腹の部分ではなく、指の側面が接触している場合には意図する角度よりも中心方向へ傾いた角度が検出される傾向にあることが確認できた。また、全体的な傾向としてはタッチパネルにタッチする際は、検出される角度はより中心方向にややずれて検出されること確認できた。指の角度と距離を考慮した操作の一例として、

SVM による片手の親指と人差し指で行う場合と両手の人差し指で行う場合のピンチ操作のジェスチャ推定を行い、推定されたジェスチャを用いて 3D オブジェクトの操作を行うアプリケーションを作成した。

今後の課題としては本稿の調査で得られた結果をもとに、指の持つ情報をもとにした様々なジェスチャの識別を考え、快適な操作インタフェースの実現を目指していく。

参考文献

- 1) アップル - マルチタッチジェスチャー - mac をもつと自然に操ろう。 <http://www.apple.com/jp/macosex/whats-new/gestures.html>.
- 2) Jefferson Y. Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, UIST '05, pp. 115–118, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- 3) Jun Rekimoto. Smartskin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: Changing our world, changing ourselves*, CHI '02, pp. 113–120, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- 4) 坂本侑一郎, 吉川拓人, 大江龍人, 志築文太郎, 福本雅朗, 田中二郎. Wrinklesurface: しわを作って入力できるやわらかいマルチタッチインターフェース. *wiss2011*, 2011.
- 5) 川合悟, 小林久幸, 中村秀夫. 指先の力発揮に伴う皮膚接触面積の変化. 帝塚山短期大学紀要. 人文・社会科学編・自然科学編, Vol.31, pp. 204–213, 1994.
- 6) 栗田多喜夫. サポートベクターマシン入門. <http://home.hiroshima-u.ac.jp/tkurita/lecture/svm.pdf>.
- 7) opencv.jp - opencv: サポートベクターマシン (support vector machine) . <http://opencv.jp/sample/svm.html>.

- 8) 森由有, 青木輝勝, 沼澤潤二. I-006 布シミュレーション演算量削減のための質点バネモデル補間法に関する一検討 (グラフィクス・画像, 一般論文). 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.8, No.3, pp. 253-254, 2009-08-20.