

LCD と透明弾性体の光弾性を用いた ユーザインタフェース

佐藤 俊樹 間宮 暖子 小池 英樹 福地 健太郎

本論文では、弾性体で作られた透明なタンジブルオブジェクトに対する「押す、摘む、引っ張る、揉む」といった接触を伴うインタラクションを実現可能なテーブル型システム「PhotoelasticTouch」の提案を行う。PhotoelasticTouchは、LCDの発する偏光と、弾性体の光弾性を利用することで、テーブル上の弾性体に加えられた外力による変形を高速に検出することができる。本システムで用いる光弾性を用いた弾性体の認識は、視覚的に邪魔になるマーカ等を一切必要としない。そのため、透明な弾性体を用いることで、LCD上に配置しても映像を遮断することのない、様々な形状のタンジブルオブジェクトを実現することができる。さらに、それらに対するユーザの様々な接触動作を認識することができる。

本論文では、本システムの偏光と光弾性を用いた弾性体の認識技術について述べ、またプロトタイプシステムの実装について述べる。さらに、アプリケーションとして、シート状弾性体を利用したタッチパネルアプリケーションと、様々な形状の弾性体を用いたペイントアプリケーションの提案を行い、本システムの可能性、実用にむけての課題について考察する。

PhotoelasticTouch is a novel tabletop system designed to intuitively facilitate touch-based interaction via real objects made from transparent elastic material. The system utilizes vision-based recognition techniques and the photo-elastic properties of the transparent rubber to recognize deformed regions of the elastic material. Our system works with elastic materials over a wide variety of shapes and does not require any explicit visual markers. Compared to traditional Interactive Surfaces, our 2.5 dimensional interface system enables direct touch interaction and soft tactile feedback. In this paper we present our force sensing technique using photoelasticity and describe the implementation of our prototype system. We also present two practical applications of PhotoelasticTouch, a force-sensitive touchpanel and a paint application.

1 はじめに

テーブル型ディスプレイや壁型ディスプレイ等のInteractive Surfaceにおいて、ユーザが画面に表示されたコンテンツに触れることで操作を行う接触ベースの手法は、ユーザとコンテンツを直接的に結びつけることができる直感的なインタラクション手法で

ある。これまでも、タッチパネル技術を始め、様々な接触ベースのインタラクション手法が研究されてきた[10][11][3][4][1][8]。しかし、従来のInteractive Surfaceの問題点として、ディスプレイに表示されたコンテンツに直接指で触れたとしても、ユーザは「平面的」で「硬い」印象しか感じることができない点がある。そのため、3次元映像や、人体のような柔らかな質感を持つコンテンツに直接触れるようなインタラクションを行いたい場合でも、ユーザはそれらの「形状」や「柔らかさ」といった情報を皮膚を通して満足に得ることはできない。次に挙げられる問題点は、ディスプレイが平面的である故に、ユーザがコンテンツに「触れる」ための入力動作が、指先での「押す、なぞる」といった動作に限定されてしまう点である。例えば、我々が現実世界で身の回りの物体に対して

Force-sensitive Rubbery User Interface using an LCD and Photoelasticity.

Toshiki Sato, Haruko Mamiya, Hideki Koike, 電気通信大学大学院情報システム学研究科, Dept. of Information Systems, The University of Electro-Communications.

Kentaro Fukuchi, 科学技術振興機構, Japan Science and Technology Agency.

コンピュータソフトウェア, Vol.27, No.1 (2010), pp.37-47. [研究論文] 2009年4月15日受付.

行っている「押す、摘む、引っ張る、揉む」といった動作を、ディスプレイ上の平面的なコンテンツに対して行うことは難しい。これに加えて、指先での接触のみで複雑な操作を行うためには、ボタンやメニュー操作を介した間接的な操作をシステムに導入する必要があり、操作の直感性が失われてしまう問題もある。そこで、このような問題を解決するためには、次のような要件を満たすインタフェースが必要であると考える。

- 形状の自由度が高い

従来の平面的で硬いディスプレイに表示されたコンテンツに対し、より直感的な対話を実現するためには、ディスプレイの表面に、表示されたコンテンツに合わせた様々な形状、様々な柔らかさを持たせればよい。これにより、ユーザはそのコンテンツに対してどのような操作を行うべきかが直感的にわかり、また接触した際もその形状、質感を肌を通して感じることができる。これらの要素を実現するシステムには、様々な形状・柔らかさが表現可能な、形状の自由度が高いインタフェースが必要である。

- 様々な接触動作の認識が可能

平面的なコンテンツに対する操作は指先等での接触動作に限られてしまう。しかし、立体感のあるディスプレイには「押す、摘む、引っ張る、揉む」といった様々な接触動作を用いた操作が可能であり、コンテンツそのものに直接触れるようなインタラクションが可能になる。そこで、このようなユーザの「押す、摘む、引っ張る、揉む」等の入力動作が認識可能なインタフェースも必要である。

- 映像との融合

ディスプレイに表示されている映像に対して、映像を遮断したり、視覚的に邪魔になったりすることは避ける必要がある。そのため、ディスプレイに表示された映像に対して透明性のあるインタフェースが必要である。

本論文では、これらの要件を満たす新しい接触ベースのインタフェースとして、弾性体でできた柔らかな様々な形状のオブジェクトを用い、ディスプレイに

表示されたコンテンツとの接触を伴ったインタラクションを実現することのできるテーブル型システム「PhotoelasticTouch」を提案する。

2 PhotoelasticTouch

PhotoelasticTouch は、透明な弾性体 (図 1) でできたタンジブルオブジェクトを認識することができるテーブル型システムである。特に、弾性体オブジェクトに加えられた変形をマーカレスで認識することができ、ユーザと弾性体との間の「押す、摘む、引っ張る、揉む」といった接触を伴ったインタラクションを実現することができる。PhotoelasticTouch の特徴をまとめると次のようになる。

- マーカレスでの透明弾性体の認識

PhotoelasticTouch の技術的特徴は、LCD 上で弾性体に加えられた変形を、LCD の発する偏光と、弾性体の光弾性という光学的性質を用いてリアルタイムに検出することができる点である。弾性体の変形の検出に一切のマーカを必要としないため、透明な弾性体オブジェクトを使用することができる。

- 様々な形状の弾性体オブジェクトを実現

PhotoelasticTouch では、様々な形状の透明弾性体を認識可能である。マーカレスでの認識が可能であるため、弾性体に特殊な加工を施す必要はなく、弾性体を様々な大きさ、様々な形状に容易に加工でき、さらにそれらをタンジブルオブジェクトとしてそのまま用いることができる。

- 触覚によるフィードバック

弾性体を用いたインタフェースの利点として、

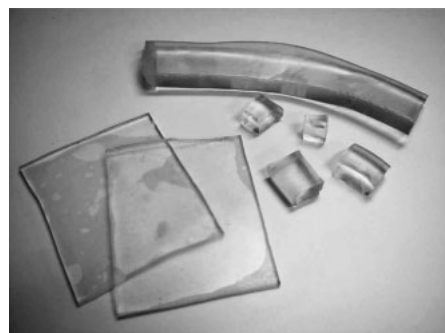


図 1 透明弾性体

ユーザは弾性変形による反発力を皮膚を通して感じることができ、弾性体に触った際に接触感を得ることができる点が挙げられる。また、弾性体の厚みや硬さを調節することで、硬いものから柔らかいものまでの、様々な柔らかさを持つタンジブルオブジェクトを実現することができる。

- ディスプレイ映像と弾性体オブジェクトの融合
透明な弾性体の使用が可能になったことで、弾性体の下に映像を表示させることができ、従来の平面的で硬いディスプレイ面に、弾性体の持つ柔らかさと形状の要素を付加することができる。

- 様々なインタラクション

PhotoelasticTouch では、ユーザは弾性体に対してただ指先で触るだけではなく、様々な変形動作を行うことが可能である。例えば、「押す、摘む、引っ張る、揉む」等の動作に加え、「手に持って指で押しつぶす」操作や、「両手で引っ張る」といった動作での変形も認識可能であり、これらの動作を用いたコンテンツとの直接的な対話が可能になる。

以降の章では、これらの特徴を持つ「Photoelastic-Touch」システムにおける、光弾性を利用した透明弾性体の認識手法について述べ、またプロトタイプシステムの実装について述べる。次に、本システムを利用したアプリケーションを提案し、最後に本システムの可能性、実用に向けた課題を考察する。

3 関連研究

Interactive Surface におけるタッチベースのインタラクション手法は、ユーザがディスプレイに表示された情報に指で直接触れることを可能とし、マウス等の入力デバイスを介さない、直感的なダイレクトマニピュレーションを実現した。現在最も一般的なものは、シングルポイントのタッチパネルであり、ATM や携帯電話等の様々な機器に搭載されている。しかし、1本の指による接触しか検出できないため、ただ指で触れるだけの操作に限られる。また表面も平面的であり、触った際に接触感が得られるものは少ない。

これに対し、複数点の同時認識ができるマルチタッチシステムも研究されてきた。Rekimoto らの Smart-

Skin[11] は、テーブル上に格子状で送受信電極を配置し、各電極の交点の静電容量を調べることで、テーブル面とユーザの手との距離を計測し、手の位置や形状をリアルタイムに検出することが可能である。また Mitsubishi の DiamondTouch[3] は、テーブル面に無数の微小アンテナを設置し、ユーザがアンテナに触れた際の微小電流を椅子を通して検出することで、ユーザ個別の接触位置を同時に複数点検出することができる。これらのシステムは、多点の同時認識や、画面に触れた物体の形状の認識が可能であるため、指先の1点のみの接触を使った操作では不可能であった複雑なジェスチャ入力や、物体の形状を使った様々な操作を可能にした。さらに、SmartSkin のようなセンサ面を曲面にすることができるシステムの場合、プロジェクトとの組み合わせで、非平面的なディスプレイ面も実現できた。しかし、ディスプレイ面を柔軟に変形させたり、ユーザに対して触覚によるフィードバックを与えたりすることは困難であった。また、センサ面が不透明であるため、前方から映像を投影する必要があるこれらのシステムの場合、映像がユーザの手や頭で遮られてしまう隠れの問題もあった。

次に、ディスプレイの背面にカメラとプロジェクタを設置するマルチタッチシステムがある。Rekimoto らの HoloWall[10] や、Han のシステム[4]、Microsoft の Surface[1]、Sphere[2] は、ディスプレイ面付近に赤外線照射し、ディスプレイに接近した手や物体に反射した赤外光を背面のカメラで撮影することで、それらの位置、形状を認識し、隠れの発生しない口バスタな手指や実物体の認識を実現している。また、HoloWall のようにディスプレイ面を柔らかな布にしたり、Sphere のように球状にすることもでき、立体的で柔らかなディスプレイを実現することもできる。しかし、ディスプレイ面付近に照射した赤外線の反射光を利用するこれらのシステムでは、ディスプレイ面の形状を複雑にした場合に、その形状に合わせて照射する赤外線の強さ、角度等を調節する必要があると考える。そのため「押す、摘む、引っ張る、揉む」といった、ディスプレイ面を柔軟に変形させるような動作を認識するのは困難であり、特にそれらの強さや方向といったより詳細な接触のパラメータを検出する

ことは困難である。

次に、ディスプレイから離れた場所にビデオカメラを設置し、ユーザの手を撮影することで、画像認識により複数の手や指先の位置をリアルタイムに検出する手法もある [13] [8] [9]。このようなシステムは、ステレオ視を行うことで 3 次元的な手の状態を取得することができ、また大型 LCD との組み合わせで、プロジェクタを用いたシステムより高輝度、高精細な表示を行うこともできる。しかし、カメラを接触面から離れた位置に取り付けるため、ディスプレイから離れた位置でのジェスチャ認識には適しているが、ディスプレイ面に直接手で触れるような操作を認識したり、また接触の強さの計測を行うことは困難である。一方、PhotoelasticTouch も接触面から離れた位置にカメラを設置するシステムではあるが、弾性体の光弾性と LCD の光源を用いることで、ユーザとディスプレイ面との間の接触動作の検出が可能である。

弾性体を用いたインタフェースとしては、Kamiyama らの GelForce [7] がある。GelForce は弾性体中に 2 層に分けて埋め込んだ 2 色のマーカの動きを、背面からカメラで撮影することで、弾性体を「押し、摘む」ことによる変形をリアルタイムに計測することができる。弾性体内の力を 3 次元的に求めることが可能であり、ロボットの触覚センサ [12] への応用や拡張現実用の入力デバイス [5] への応用がなされている。また、弾性体を用いているため触覚フィードバックがあり、表面にプロジェクタで映像を投影することで Interactive Surface としても用いることができる。しかし、弾性体中にマーカを埋め込む必要があるため不透明である点に加え、複雑な形状の弾性体オブジェクトを作ることにはできず、ユーザが行える操作に限られる。次に、Kakehi らの ForceTile [6] は、GelForce と同様の力ベクトル計測技術を応用した、タイル型の弾性体タンジブルインタフェースである。ForceTile は、GelForce と同様にタイル内の力分布を計測することに加え、テーブル下のカメラによるタイルの位置や角度、タイルの識別も行うことができる。また透明な赤外線吸収マーカと、複数台のプロジェクタと視界制御フィルムによるリアプロジェクション技術により、弾性体タイルの透明化とディスプレイ面とタイル

への異なる映像の投影を可能にしている。しかし、弾性体へマーカを埋め込む必要があり、また GelForce と同様に形状が平面的であるため、テーブルに置いて上から摘むような操作に限られる。

4 ハードウェア構成と原理

4.1 ハードウェア構成

まず始めに、本システムのハードウェア構成を図 2 に示す。本システムでは、水平に設置した LCD の上方に、LCD 全体が撮影できるような位置に画像処理用カメラを固定する。今回実装を行ったプロトタイプでは、液晶ディスプレイは DELL 22 インチ 2208WFP (輝度 300cd/m^2)、カメラは IMPERX 社ハイスピードカメラ IPX-VGA210-GC を使用した。カメラ、及び LCD は 1 台の PC (Xeon5060 3.2Ghz, 2GB RAM, GeForce8800GT) に接続されており、PC 上の画像処理プログラムがカメラからの画像をリアルタイムに処理し、結果を同 PC 上で並列に動作するアプリケーションプログラムに送信する。アプリケーションプログラムは、結果を LCD 画面に表示させる。LCD には、直線偏光を円偏光に変換するための $1/4$ 波長板を、LCD の偏光から光軸を 45 度回転させた状態で全面に貼り付ける。なお $1/4$ 波長板は透明であるため、ユーザが LCD の映像を見るうえで何の影響もない。またカメラには、 $1/4$ 波長板を LCD 側波長板から 90 度回転させた状態で貼り付け、さらに LCD の映像を遮断するための偏光フィルタを貼り付ける。(カメラ側の $1/4$ 波長板と偏光フィルタは、1 枚の円偏光フィルタでも代用できる。)

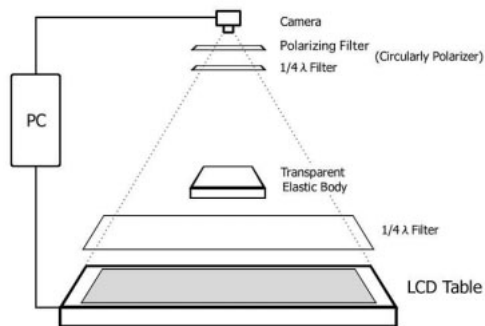


図 2 ハードウェア構成

4.2 透明弾性体

本システムでは、光弾性の性質を持つ弾性体（光弾性体）として、透明な粘弾性体を用いた。一般的に、ガラス、アクリル等の固い物質でも光弾性は発生するが、手で変形させるためには大きな力が必要であり、また部分的な変形が難しい。一方で、ゼリーのような柔らかい物質の場合、光弾性が観測しにくい点に加え、力を加えると簡単に形が崩れてしまい、かつ元に戻らない。そのため、今回はある程度固さがあり、手での変形が容易な光弾性感度のある弾性体として、ポリエチレン系やシリコン系素材の柔らかな粘弾性体を用いることにした。

今回のプロトタイプシステムにおいて用いた弾性体は、Exseal Corporation の Hyper-Gel Sheet (アスカー C 硬度 15 及び 30) と、熱による成形が可能なアルテクノ社ジェリーキャスト (アスカー C 硬度 9) である。これらの弾性体は、指で強く押す、表面を強くなぞる等や、両手を使った引き伸ばし等の大きな変形には強い耐久性があり、長期間の使用にも耐えることができる。

4.3 原理

弾性体が外力を受け変形すると、弾性体を通る偏光に複屈折が生じ、偏光の性質を変化させる光弾性が起きる。本システムでは、この光弾性による複屈折によって偏光特性が変化した LCD 光をカメラで撮影することで、変形の起こった領域を検出する。光弾性という現象は、応力解析の分野で広く用いられてきた。解析手法は当初は人手で行われていたが、様々な解析手法が研究され、カメラと画像処理による解析の自動化が行われている [14] [15]。本システムでは、弾性体に対するユーザの入力を検出するために、弾性体を回転させても応力のパターンが変化しない円偏光法を用いる。

本システムの原理を図 3 に示す。LCD が発する光は直線偏光である。そこで、まず LCD の前面に 1/4 波長板を貼り付けて円偏光へと変化させる。次に、カメラ側に円偏光板を装着し、カメラに対して LCD の映像を完全に遮断する (図 3 中 (1) 及び (2) の光)。これにより、表示された映像によらず、LCD 光はカメ

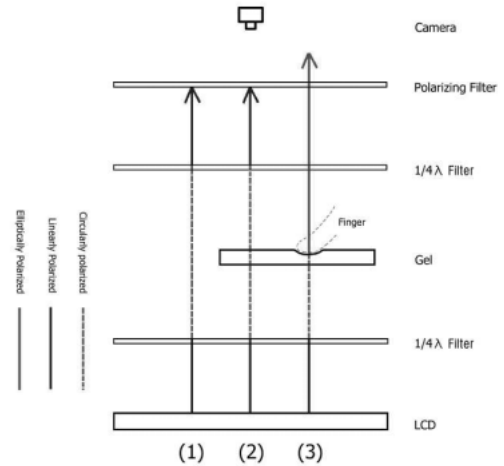


図 3 システムの原理

ラに撮影されなくなる。しかし、このとき LCD とカメラとの間に圧力が加えられた弾性体が存在した場合、この弾性体内を通る LCD 光は、光弾性による複屈折によって円偏光から楕円偏光へと変化する。その結果、楕円偏光化した LCD の映像はカメラ側の円偏光板を通過し、カメラに撮影される (図 3 中 (3) の光)。この際のカメラの映像には、弾性体の変形した領域のみの LCD 光が虹色の縞模様 (等色線) とともに現れる。本システムでは、この映像を画像処理を用いてリアルタイムに処理し、弾性体に対するユーザの変形動作を検出する。なお、人の目は偏光を感じることができないため、肉眼では LCD の映像に変化はなく、また等色線を見ることもできない。

5 実装

ユーザが弾性体を変形させた場合、変形させた領域は周辺の領域に対してより高い輝度でカメラに撮影される。本システムでは、カメラ画像から画像処理を用いてこの高輝度領域を検出することで、弾性体の変形された領域をリアルタイムに検出することができる。この処理は以下の手順で行う。

5.1 画像処理

1. 下準備

カメラ座標とディスプレイ座標との変換を行うため、射影変換を用いたカメラキャリブレーション

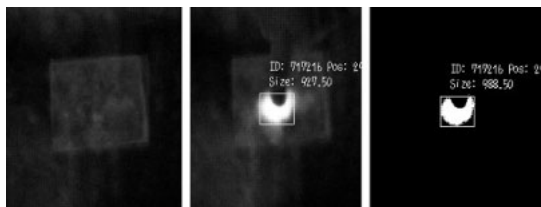


図4 圧力を加えていない弾性体(左)と圧力を加えた弾性体(中央),及び2値化処理後(右)

ンを行っておく。また次の手順で行う背景差分用に、LCD上の弾性体に圧力が加わっていない状態で背景画像を保存しておく。これらの処理はシステム初期化時に1度だけ行う。今回のシステムでは、撮影時に特殊な光源は用いず、一般的な室内の蛍光灯下でシステムを動作させた。カメラのシャッタースピードは5msecに設定し、200fpsで撮影を行った。

2. 2値化・ラベリング

変形があった領域の輝度は、周囲の領域と比べて輝度差が約100(8bitグレイスケール時)以上はあるため、入力画像と予め取得しておいた背景画像との差分を取り、一定の閾値により2値化する(図4)。次に、得られた高輝度領域に対し連結領域を抽出するためラベリングを行い、各々の領域の重心及び面積を求める。

3. 領域の対応付け

本システムの処理は200fps(1フレームあたり約5msec程度)で実行することが可能であり、1フレームあたりの領域の移動量、面積の変化量を非常に小さくすることができる。そこで、前フレームで検出された全ての領域と、現フレームで検出された全ての領域の位置、及び面積を比較し、両者の変化量が十分小さい2つの領域同士を同一の領域であるとみなす。

4. 変形パラメータの取得

以上の処理で得られた領域に対し、圧力の大きさの検出、及び方向の検出を行う。これらの処理の詳細については後述する。

なお、本システムでは、カメラをLCDの上方に設置するため、指等を使って弾性体を押下した場合は、指の真下にある弾性体の様子は指で隠れてしまうた

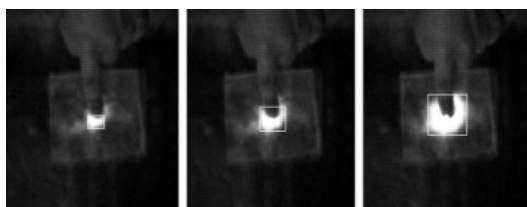


図5 押下圧の違いによる面積の変化(右に行くほど圧力が大きい)

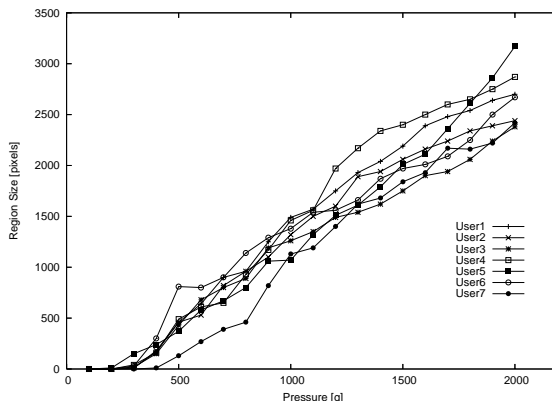


図6 面積と押下圧との関係

め観測することができない。その代わりに、指の周囲の変形を観測することで、変形の検出を行っている。また、ユーザが圧力を加えた領域と同時に、LCD上に置かれた物体やユーザの手もカメラに撮影される。今回の実装では、同時に手やテーブル上の物体の認識を行わないため、2値化時の閾値や、ラベリング時の面積に大きさの制限を設定することでこれらの領域の区別を行っている。

5.2 押下力の推定

ユーザが指で弾性体を押下した際の指周辺の高輝度領域の面積の変化を調べることで、押下した際の圧力変化を容易に検出することができる(図5)。

図6のグラフは、人差し指でシート状の弾性体(アスカーC硬度10以下)を押下した際の押下圧と、カメラに観測された指周辺の高輝度領域の面積の関係を表している。3kgまで測定可能な秤の上に、10mm厚のシート状弾性体を載せた小型のLCD(重量約1kg)を置き、LCD上の弾性体を右手人差し指で押下した際の秤にかかる重量と、カメラで観測された指周辺

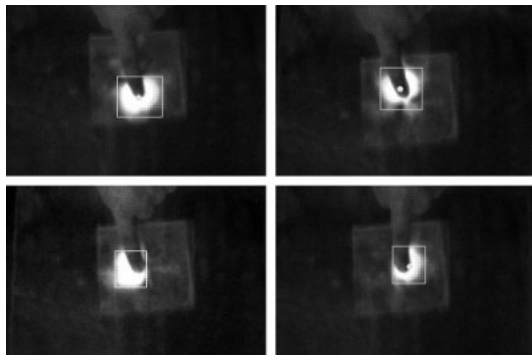


図7 指の前後に力をかけた場合(左上と右上)と、左右に力をかけた場合(左下と右下)

の高輝度領域の面積を記録した。被験者は大学院生7人で、押下圧はLCDと弾性体の重量を含まない値であり、最大2kgまで100g単位で測定した。

このグラフから、押下圧と面積との関係には正の相関が見られ、指による押下圧の指標を指領域周辺の高輝度領域の面積から得られることがわかる。これにより、ユーザが弾性体に対したただ触れただけなのか、それとも強く押込んだのかを区別することができる。

5.3 方向の推定

弾性体を指等で押下したまま、指を左右に動かし、指にかける力の方向を変化させると、弾性体と指との間の摩擦により、指の位置は静止したままで、指の周辺の弾性体にかかる力の方向を変化させることができる(図7)。このことを利用すると、タッチパネルのように画面上で指を滑らせるのではなく、指をその場に留めたまま小さな動きで方向の入力を行うことが可能になる。

まず、指のドラッグ操作と区別するために、ユーザの押下動作で、予め設定しておいた閾値以上の押下圧がある動作を検出する。さらに、その瞬間の指周辺の高輝度領域の重心を、指の基準位置として記録しておく。次に、指をそのまま押下し続けた状態で、指にかける力の方向を変えた際の高輝度領域の重心位置を求め、基準位置との2点により圧力のかかった方向を求める。

6 アプリケーション

本システムを用いたアプリケーションを試作した。

6.1 弾性体を用いた感圧タッチパネル

透明な薄い弾性体を用い、圧力の検出に対応した柔らかいタッチパネルを実現するアプリケーションである。一般的なタッチパネルと同様に、ユーザが画面に触れた際の複数の位置を同時に検出できるほか、それぞれの接触の強さも検出することができる。

まず、図8(右)は、指5本を用いて画面に触れた際の、それぞれの指の位置と押下力を円の位置と大きさを用いて視覚化したものである。複数点の同時認識が可能であるため、複数のユーザが同じテーブル上で独立した操作を行うことが可能である。

また、図8(左)は、このシステムを用いて画面に表示された3Dモデルを閲覧している様子である。ユーザはテーブル上に表示された複数の3Dモデルを指で軽く触れたり、指を引きずったりすることで、モデルを選択し、移動させることができる。さらに、1本の指にかける力の方向や、複数の指にかかる力のバランスを用いてモデルを回転させることもできる。まず1本の指で回転の操作を行う場合には、図9(左)のように、まずディスプレイに表示されたモデルに軽く触



図8 3Dモデルの閲覧(左)と圧力の多点同時入力(右)

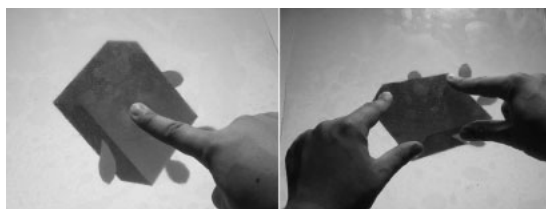


図9 1本の指を用いた回転(左)と複数の指を用いた回転(右)

れ、回転させるモデルを選択する。次に、その状態から指を強めに押し込み、さらに回転させたい方向に向かって指に力を加えることで、その方向にモデルを回転させる。複数の指で回転の操作を行う場合には、モデルに触れて選択を行った後に、図9(右)のようにモデルの上に2本以上の指を置き、指を強く押し込む。このとき、指の置かれた位置の重心から、指にかかる圧力の中心へ向かう方向にモデルを回転させることができる。

さらに、弾性体の反発力による触覚フィードバックを与えることができるため、一般的なタッチパネルには無い、接触感を与えることが可能である。このときの操作感は、弾性体の厚さや柔らかさを変えることで調節することが可能である。弾性体の厚さは、指先で表面をなぞる動作を行う場合、硬めの弾性体や薄い弾性体が適していると考えられる。また、押し込み動作を行う場合は、大きく変形させることができる柔らかめの弾性体や厚めの弾性体が適していると考えられる。アプリケーションや入力動作に応じて弾性体の種類を変えると良いと考える。

6.2 ペイントアプリケーション

このアプリケーションは、様々な形状の弾性体を使ったペイントアプリケーションである(図10(左))。ユーザは小さくカットした様々な形状の弾性体ブラシ(図10(右))を用い、ディスプレイ上で押し潰したり、手に持って摘んだりすることで、絵の具を含ませたスポンジを紙の上で絞るような感覚で画面に絵を描くことができる。

このアプリケーションでは、弾性体に変形した領域の形状を検出し、ブラシの形状として用いている。そのため、一つの弾性体ブラシでも、潰し方、握り方で様々な形状の線を描くことができるため、入力動作の自由度が高い利点がある。さらに、弾性体の形状によって、その弾性体をどのように変形させられるのが直感的にわかるという利点もある。例えば、尖った形状を持つ弾性体ブラシの場合は、その先端を摘むことができ、細い線を描くことができる(図11(左))。また、細長い弾性体の場合は、両手で引っ張ることで長く伸ばすことができ、広い領域を一度に塗り潰す



図10 弾性体を潰して絵を描いている様子(左)と様々な形状の弾性体ブラシ(右)

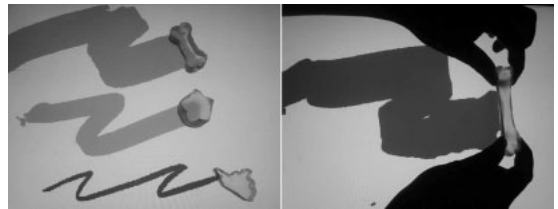


図11 摘んで描いた場合(左)と引っ張って描いた場合(右)

ことができる(図11(右))。このように、弾性体の形状により、変形のさせ易さ、またはその用途が直感的にわかるため、誰もが説明無しに使うことができる。なお、今回は入力自由度を高め、またブラシ選択をユーザが楽しく行えるように、ジェリーキャストとクッキー型を用いて、大きさ、形状の異なる多数の弾性体ブラシを作成した。

7 考察

7.1 照明条件

本システムはカメラベースの認識を行っているため、設置環境での照明条件を考慮する必要がある。今回の実装では、カメラに観測された領域が弾性体を通ったLCD光なのか、手に反射した照明光なのかを区別する際に、弾性体を通ったLCD光の輝度が高めであることを利用している。そのため、弾性体を通ったLCD光以外の、手やテーブル上の物体に反射した光の輝度が高くなり過ぎないように、ディスプレイ面や手に直接強い光があたるような照明の設置を避ける必要がある。また今回は行っていないが、他の手指認識プログラムや物体認識プログラムと組み合わせ、手と弾性体を別々に処理する場合は、領域の形状や色情報を利用して手と弾性体の区別を行うことが考え

られる．またこの場合，本システムとは別のカメラを用いる方法も考えられる．

7.2 LCD に表示された映像の影響

本システムでは，弾性体の変形をカメラで検出するために，LCD の発するバックライトのみを使用している．そのため，LCD に黒に近い暗い映像が表示されている箇所では，カメラに撮影される弾性体を通った LCD 光が弱くなるため，弾性体を変形させた場合でも，カメラには十分に光弾性効果の発生が観測できなくなる問題がある．特に，現在のシステムでは，圧力の指標に領域の面積を用いているため，同じ力で弾性体を変形させた場合でも，弾性体下の映像の輝度によっては異なる圧力の値を示すことになる．また，カメラに撮影される LCD 光の強さは，カメラのシャッタースピードにも依存する．認識のフレームレートを高くしたい場合，カメラのシャッタースピードを短く設定する必要があるため，LCD の映像の輝度による影響をより受けやすくなることになる．この問題を解決するためには，弾性体下に表示されている画像の輝度を調べ，カメラで観測した映像の輝度値を補正したり，LCD 画面の描画タイミングをカメラの撮影タイミングと同期させ，カメラの撮影時の一瞬のみ輝度の高い画像を表示させるといった方法が考えられる．

7.3 隠れの問題

テーブルの上方にカメラを設置するテーブル型システムに共通の問題点として，稀にユーザの手元がユーザ自身の頭や体によって隠れてしまい，カメラで撮影できなくなる問題がある．この問題は，テーブルの高さがユーザに対して低すぎたり，ユーザが操作に熱中し，テーブルを深く覗き込んだりする場合に発生する．解決手法としては，カメラを異なる位置に複数台設置し，1 台のカメラで撮影できなかった箇所を他のカメラで撮影することや，カメラをより低い位置に設置したり，真上ではなく，斜め上に設置し光軸をずらすことで，隠れを防止することが考えられる．また，テーブルの高さをユーザの腰の高さより高い位置にすることで，覗き込みを防止することも考えられる．

7.4 弾性体の特性について

粘弾性体は表面に指紋や汚れが付着しやすいため，長時間使用していると透明度が下がってしまう問題もあった（ある程度の汚れは水で洗うことで落とせる）．この問題は，粘弾性体の表面の粘着性が原因であるため，表面に汚れの付着しにくい弾性体でコーティングを施すことで解決できると考える．また，弾性体の耐久力は高く，今回このシステムを開発するために使用した弾性体の殆どが，無理な力を加えない限り，半年程度の使用では復元力を失ったり，干切れたりすることは無かった．ただし，ペン先や爪先等の鋭利なもので強く引っかくと傷がついてしまい，強度や透明度が下がってしまうので，傷に対する対策を行う必要があると考える．これについても，表面のコーティングにより改善されると思われる．

次に，今回用いた重さの弾性体は，自重での変形が起こるほど重量はなく，また弾性体に部分的に大きな応力が加わるような複雑な形状をしていない．今後，より大量の弾性体を用いたり，複雑な構造の弾性体を成形する場合は，これらの影響も考慮する必要があると考える．

タッチパネルアプリケーションについては，今回の実験ではシステムが押下を検出するためにはユーザは最低でも指先に 300g 程度の力をかける必要があった．タッチパネルを押下する際のような，軽く触れた程度の小さい力を検出するためには，弾性体を変形しやすい厚みのあるものにするか，より光弾性感度の高い材質を用いることが考えられる．

8 まとめと今後の課題

本論文では，透明な弾性体でできたタンジブルオブジェクトに対する，ユーザの接触を伴うインタラクションを認識することが可能なテーブル型システム「PhotoelasticTouch」の提案を行った．PhotoelasticTouch の特徴は，透明弾性体の光弾性と，LCD の偏光を利用することで，視覚的に邪魔になるマーカを一切用いず，ユーザが透明弾性体に加えた変形箇所を高速に検出することが可能な点にある．これにより，LCD 上に配置しても LCD の映像を遮断せず，また LCD に表示された映像コンテンツとの融合が可能な



図 12 ディスプレイに表示された 2 次元画像 (左) と弾性体顔モデル (中央), その両者を重ねた様子 (右)

豊かな形状と柔らかさを持つ透明タンジブルオブジェクトが実現できた。さらに、これらの立体的なコンテンツに対する、様々なインタラクションを可能とし、ディスプレイに表示された平面的な映像コンテンツに対するより直感的な入力を実現することができた。

今後は、以下のような改善を行う予定である。

8.1 より立体的な形状の弾性体を使ったシステム

今回実装を行ったタッチパネルアプリケーションでは、平面的な弾性体を用いていたため、ディスプレイに表示された映像に合わせた立体感、接触感を付加することはできなかった。そこで現在、表示されたコンテンツにあわせたより立体的な弾性体をディスプレイの上に置くことで、表示されたコンテンツとの直接的なインタラクションを行えるシステムの実現を考えている。

図 12 は、ディスプレイに表示された顔画像の上に、透明弾性体で作った顔型の 3 次元モデルを置いた場合の様子である。平面的な画像に対して、透明弾性体モデルを重ねることで、平面的な映像に立体感を与えることができ、さらに「押す、摘む、引っ張る、揉む」といったコンテンツとの直接的なインタラクションを可能にできると考えている。今後は、これらの要素を用いたインタラクティブシステムを開発していく予定である。

8.2 より詳細な応力解析手法の導入

今回のシステムでは、LCD の偏光と弾性体の光弾性を応用し、弾性体が圧力を受けた領域を検出することで、シンプルな画像処理で弾性体に対する接触を伴うインタラクションの検出を可能にした。しかし今回の実装では、弾性体に対する変形を確実に、高速に検

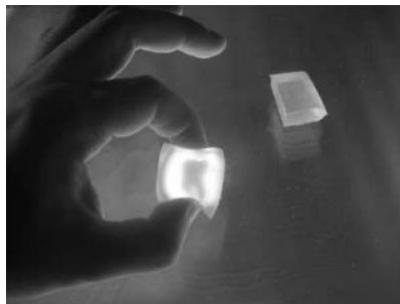


図 13 透明弾性体に表れる等色線

出することはできたが、変形が起きた領域の検出しが行っていないため、正確な応力の測定ができないという欠点があった。また、今回行った実験においては、押下圧と面積の関係には正の相関が見られたが、単純な押下動作に限らず、様々な接触動作においてユーザが加えた力の強さ・方向を正確に検出するためには、2 値化された領域の面積情報だけでは不十分であり、より詳細な応力解析を行うことが不可欠であると考えられる。そこで今後は、弾性体に現れる等色線 (図 13) の縞画像や、複屈折の位相差等を用いたより厳密な応力の解析を行うことで、認識精度の改良を行っていく予定である。さらに、本システムの適用可能性を調べるために、具体的なタスクの設定を行い、それが本システムで実現可能かを調べる実験も行いたいと考える。

8.3 弾性体の識別について

今回のプロトタイプシステムでは、ユーザが力を加えていない弾性体はカメラに観測されず、弾性体の位置等を得ることはできなかった。また、テーブル上に複数の弾性体がある場合にも、それらを区別して認識することも困難であったため、今後これらの点について改善を行いたい。これらを可能にするためには、弾性体を加工する際、弾性体内部に部分的に圧力を加え、自然に応力がかかる箇所を発生させたり、また弾性体内部に波長板等の透明な複屈折素材を埋め込んだりすることで、それらの位置、配置等を用いた弾性体の位置・姿勢の追跡、識別を行う手法が考えられる。

8.4 LCD テーブル以外のシステムへの応用

現在のシステムは映像表示装置を兼ねた光源とし

てLCDを用いているが、応力の認識がLCDに表示された映像の輝度に影響を受けるという問題もある。そこで、今後はLCD以外の偏光光源の導入や、背面カメラベースのシステムでの透明弾性体インタフェースの開発も行っていく予定である。さらに、例えば壁型システム等への応用や、アプリケーションの開発も行っていく予定である。

参考文献

- [1] Microsoft, Microsoft Surface, <http://www.microsoft.com/surface/>.
- [2] Benko, H., Wilson, A. D. and Balakrishnan, R.: Sphere: multi-touch interactions on a spherical display, in *UIST '08: Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology*, New York, NY, USA, ACM, 2008, pp. 77–86.
- [3] Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: a multi-user touch technology, in *UIST '01: Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology*, New York, NY, USA, ACM, 2001, pp. 219–226.
- [4] Han, J. Y.: Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, in *UIST '05: Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, New York, NY, USA, ACM, 2005, pp. 115–118.
- [5] Jo, K., Kakehi, Y., Minamizawa, K., Nii, H., Kawakami, N. and Tachi, S.: ARForce: a marker-based augmented reality system for force distribution input, in *ACE '08: Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, New York, NY, USA, ACM, 2008, pp. 160–165.
- [6] Kakehi, Y., Jo, K., Sato, K., Minamizawa, K., Nii, H., Kawakami, N., Naemura, T. and Tachi, S.: ForceTile: tabletop tangible interface with vision-based force distribution sensing, in *SIGGRAPH '08: ACM SIGGRAPH 2008 new tech demos*, New York, NY, USA, ACM, 2008, p. 1.
- [7] Kamiyama, K., Kajimoto, H., Vlack, K., Kawakami, N., Mizota, T. and Tachi, S.: GelForce, in *SIGGRAPH '04: ACM SIGGRAPH 2004 Emerging technologies*, New York, NY, USA, ACM, 2004, p. 5.
- [8] Koike, H., Nagashima, S., Nakanishi, Y. and Sato, Y.: EnhancedTable: Supporting a Small Meeting in Ubiquitous and Augmented Environment, in *Pacific Rim Conference on Multimedia*, 2004.
- [9] Koike, H., Nishikawa, W. and Fukuchi, K.: Transparent 2-D markers on an LCD tabletop system, in *CHI '09: Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems*, New York, NY, USA, ACM, 2009, pp. 163–172.
- [10] Matsushita, N. and Rekimoto, J.: HoloWall: designing a finger, hand, body, and object sensitive wall, in *UIST '97: Proceedings of the 10th annual ACM symposium on User interface software and technology*, New York, NY, USA, ACM, 1997, pp. 209–210.
- [11] Rekimoto, J.: SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces, in *CHI '02: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, New York, NY, USA, ACM, 2002, pp. 113–120.
- [12] Sato, K., Minamizawa, K., Kawakami, N. and Tachi, S.: Haptic telexistence, in *SIGGRAPH '07: ACM SIGGRAPH 2007 emerging technologies*, New York, NY, USA, ACM, 2007, p. 10.
- [13] Sato, Y., Kobayashi, Y. and Koike, H.: Fast Tracking of Hands and Fingertips in Infrared Images for Augmented Desk Interface, in *FG '00: Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition 2000*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, 2000, p. 462.
- [14] 梅崎栄作: 光弾性実験の自動化の現状, 実験力学 : *journal of JSEM*, Vol. 2, No. 1(2002), pp. 9–14.
- [15] 早房敬祐, 井上裕嗣, 田中秀一, 岸本喜久雄, 渋谷壽一: 光弾性応力測定における主応力分離のためのハイブリッド解析, 日本機械学会論文集. A 編, Vol. 66, No. 646(2000), pp. 1075–1082.