

拡散照明方式を用いたマルチタッチテーブルにおける ホバー操作の実現

坂本 竜基^{1,a)} 水俣 司¹

受付日 2011年4月18日, 採録日 2011年10月3日

概要: 本稿では, 拡散照明方式を用いたマルチタッチテーブルにおけるホバー操作の実現方法について述べる. 拡散照明方式のマルチタッチテーブルでは, テーブル板に触れてはいないが十分に近接している物体もわずかに赤外光を反射しているため, 赤外カメラによりその領域の認識も可能である. 本研究では, この領域をペンタブレットでは可能なホバー操作の領域として割り当てることでマルチタッチテーブルにおけるホバー操作を実現した. しかし, 先のとがったスタイラス等とは異なり, 手や腕は比較的広範囲な領域として認識されてしまう. そこで, この領域のうち, ユーザがポインティング先とするであろう1点を推定する手法を提案し, 評価実験を行ったところ単純に推定した場合に比べて明らかな精度向上がみられた. また, ホバー操作の応用として, オブジェクトを掴み上げ, 移動させる動作を模した Pinch-up ジェスチャを提案し, ドラッグによる移動操作との比較により提案手法のほうが素早く移動させられることを示す.

キーワード: マルチタッチテーブル, Diffused Surface Illumination, ホバー

Hover Detection on Multi-touch Table with Diffused Illumination

RYUUKI SAKAMOTO^{1,a)} TSUKASA MIZUMATA¹

Received: April 18, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: In this paper, we describe a technique for realizing hover action on a multi-touch table with DI/DSI technique. In such table, the IR camera can recognize the areas formed by objects slightly above the surface of the table because the objects reflect the IR light. We realized a hover action without electronic pen of digitizers by using such reflected area. However, when users perform hover action with their fingers, the areas of the palm of the hand and the arm are also recognized simultaneously. We propose and evaluate a technique to estimate a point where users intend to point. According to the evaluation, the accuracy of using proposed method is improved as compared to a naive method. We also propose Pinch-up gesture simulating pinch up action to move small physical objects in our daily life as an application of the hover action.

Keywords: multi-touch table, Diffused Surface Illumination, hover

1. はじめに

次世代の情報共有の場としてテーブルトップインタフェースが注目されている. 典型的なテーブルトップインタフェースは, テーブルの天板部分にプロジェクタ等で情

報を表示しつつ, その情報をマウスではなくマルチタッチインタフェースで操作する形態が多い. テーブルトップインタフェースにおいてマルチタッチインタフェースを実現する方法は多数提案されており, たとえば, 微弱電流を用いる方法 [1] や, 静電容量変化を計測する方法 [2], [3], 赤外光を認識する方法等がある. このうち, 背面からプロジェクタを用いた投影が可能な点や比較的安価である等の理由で, 近年は赤外光を用いたマルチタッチテーブルが多く研

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

^{a)} rkskmt@sys.wakayama-u.ac.jp

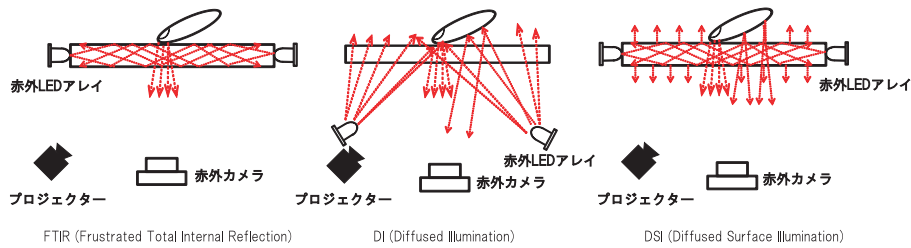


図 1 赤外光を利用したマルチタッチテーブルの原理

Fig. 1 The principles of the multi-touch tables with IR light.

究されている [4], [5], [6].

しかし、赤外光を用いる場合、基本的に指がパネルに触れた/触れていないという判断しかできないため、マウスでは自然に行っているポインタの移動とドラッグの移動を区別できない。一方、ペンタブレット等の電磁誘導方式のデバイスでは、ペンをパネルからやや離れたまま移動させるホバーと呼ばれる操作が可能であり（以下、このようなホバーによる移動操作をホバー操作と呼ぶ）、パネルにペン先を触れさせたまま滑らせるドラッグと区別して認識される。これにより、たとえば、ペイントのようなソフトにおいてフリーハンドの線の描画とオブジェクトの移動がボタンの押下等をとまわずに可能な環境をユーザに提供できる。また、ホバー操作は、パネルに接触させる必要がないためドラッグでの移動操作に比べて素早い作業が可能である。

図 1 は、赤外光を利用したマルチタッチインタフェースの代表的な手法である FTIR (Frustrated Total Internal Reflection), DI (Diffused Illumination), DSI (Diffused Surface Illumination) 方式のマルチタッチテーブルの構成を示している。これらのどれもが天板に上部から触れた指に当たりテーブル下部に向かって反射した赤外光を赤外カメラで認識することで指が触れた領域を認識する。このうち拡散照明を使う DI と DSI では、天板上部にも赤外光が届くため、天板に接触してはいないが近接している手や腕もわずかに赤外光を反射させる。そこで、これらの赤外光を認識することで、拡散照明方式のマルチタッチテーブルにおいて他の機材を追加することなくユーザにホバー操作を提供することが可能である。ただし、先端が鋭角なペン型デバイスやスタイラスでは単に認識された点の中心をポインティングすればよいが、この方法では手や腕を含む広範囲な領域を認識してしまうため単純に重心をポインティング先とはできない。そこで、本稿では、ホバー操作をオブジェクトの移動に割り当てることを想定して、ホバーとして認識された領域のうちユーザがポインティングしたいと意図しているであろう点を推定する手法を提案する。また、この推定結果の精度を被験者実験により評価した結果を報告する。さらに、ホバー操作の応用例として、あたかもオブジェクトを掴み上げて移動させているかのよ

うな操作を実現する Pinch-up ジェスチャを提案し、ホバー操作中にオブジェクトを掴んでいる位置を推定する方法を述べる。

2. 赤外光を用いたマルチタッチインタフェース

マルチタッチインタフェースを実現する方法として多数のアプローチが提案されている [1], [2], [7]. 図 1 にあげた FTIR, DI, DSI の各方式は、どれも透明なアクリルパネルを天板とするテーブルに赤外光を投光してタッチされた位置を認識する。他のマルチタッチインタフェースのうちパネルに不透明な物質を使う方式では上部からプロジェクタの映像を投影する必要があるため、操作している手や腕に表示が投影されてしまう場合がある。これに対して、透明なアクリルパネルを使用した場合、テーブル下部からのプロジェクタの投影が可能なので、この問題は起こらない。マルチタッチセンサ付きの液晶モニタを天板に使用してもよいが、テーブル用に大型化するとコストがかかる。以上のような理由からアクリルパネルと赤外光を用いた方式は大型のテーブルトップインタフェースに向いており、応用的研究も多数なされている [4], [5], [6].

FTIR は、アクリル板に対して指でタッチした部分が天板側面に設置された赤外 LED アレイから照射された赤外光を天板下部に向かって強く反射させるため、これを赤外カメラを用いてタッチされた位置を認識する手法である [6]. この手法は、押された位置のみが強く光るため頑健な認識が可能であるが、天板に置かれた物体は赤外光を反射しないため認識が難しく、たとえばスマートフォンやノート PC 等の電子デバイスを組み合わせたインタラクティブシステムに応用し難い。これに対して、DI や DSI 等の赤外光を天板上部まで拡散させる方式では、パネル上方にも赤外光が届くため、たとえば物体の下面に QR コードの形状に切り抜かれた反射シートを貼ることで物体の認識も可能である。DI はテーブル下部に赤外光の投光機をパネルに向かって設置することでパネル上方に赤外光を照射する構成であり、DSI は独 Evonik Industries 社の PLEXIGLAS Endlighten^{*1} という反射素材の粒子入りのアクリルパネル

*1 <http://www.plexiglas-magic.com/>

を天板に用いることで FTIR のようにパネルの側面から赤外光を照射するだけで DI と同じように天板上方にも赤外光を拡散させる構成になっている。

これら DI, DSI の拡散照明方式において天板上方に照射される赤外光は、タッチ時には通常は天板に触れていない掌や腕部分によってわずかながら反射される。この反射光は赤外カメラのゲインを上げれば認識が可能な輝度で撮影可能であり、本稿では、これにより認識された領域のことをホバー領域と呼ぶ。一方、指が天板に触れた点はより強く赤外光を反射するためホバー領域と区別して認識可能であり、この認識された領域をタッチ領域と呼ぶ。

3. 関連研究

マルチタッチテーブル上においてユーザの手や腕を認識する研究はいくつか存在する。Echtler らは、天井に赤外光の投光機を設置し、その下に FTIR のマルチタッチテーブルを置く方法を提案している [8]。FTIR の赤外カメラには、腕や手によって遮られた赤外光の影が映るのでこれを認識することでホバー領域を検出している。しかし、天井に投光機を設置しなくてはならない点と、身を乗り出して操作した場合頭や体部分も影を投影することになるため、ホバー以外の領域も認識される恐れがある。

同じようなアプローチとして、天井にカメラを設置して天板を撮影する構成にした状態で、画像処理によって操作者の手や腕を認識することでホバー領域を検出する方法も提案されている [9]。これも設置の手間と誤認識の問題をはらんでいる。

天板部分のやや上方に赤外光のレーザ発振機を一定の高さごとに配置し、それらの光が遮られた箇所を認識することでホバー部分を認識する提案もなされている [10]。これは LLP (Laser Light Plane) と呼ばれる手法の応用であるが、高さの幅や分解能を求めると複雑な構成になってしまう。

ホバー領域ほどではないが、タッチ領域もある程度の面積や方向を持っているため、この情報を利用して単なるタッチされた場所以上のユーザの状態を推定する研究もある。たとえば、Dang らは、タッチ領域の方向と場所から、どの指が同一の手に所属しているか推定を試み [11]、Wang らは、タッチ領域を検出後、指の大きさや傾きからポインティングすべき点を高精度で推定する手法を提案している [12]。これらは、領域を用いる意味で本研究と類似しているが、ホバー領域とタッチ領域は面積も形状変化もまったく異なる。

また、内藤らは、タッチ領域の大きさの変化量から押し込みジェスチャという新しいジェスチャを提案している [13]。新たなジェスチャを提案している点で本研究と類似しているものの、本研究が対象としているホバー領域を用いた移動操作に応用することはできない。

4. ホバー領域とポインティング先の推定

4.1 タッチ領域とホバー領域の分割

FTIR, DI, DSI 方式のマルチタッチインタフェースにおける赤外カメラを用いたタッチ領域の認識には、一般的に以下のような簡単な画像処理がなされる。

- step1 背景差分による二値化
- step2 ノイズ処理
- step3 各指に領域分割し、ラベリング

タッチ領域もホバー領域も赤外光を反射している領域であり、両者の違いは反射される赤外光の強度にしかない。よって、step1 の二値化時に、ある画素 x は以下のようにタッチ領域かホバー領域か区別して認識できる。

$$Sub. = |Back - Corr.| \tag{1}$$

$$x = \begin{cases} touch(Sub. > highthresh.) \\ hover(Sub. > lowthresh. \cap Sub. \leq highthresh.) \\ nothing(others) \end{cases} \tag{2}$$

ここで、 $Back$ は背景画像、 $Corr.$ は現在のフレームの画像における各輝度値を示し、 $lowthresh.$ と $highthresh.$ は異なる値の $lowthresh. < highthresh.$ を満たす閾値である。また、 $hover$ はホバー領域、 $touch$ はタッチ領域、 $nothing$ は背景として認識されたことを示す定数である。これにより図 2 左側のような入力に対して、中央のタッチ領域と右側のホバー領域に分離することができる。

しかし、厳しい閾値によって簡単に安定した領域として認識可能なタッチ領域に比べて、ホバー領域は背景との差分値が小さいため、赤外カメラのゲインをかなり高めたり、 $lowthresh.$ をより低い値にする設定したりする必要がある。これにより、ホバー領域はある一定の面積として識別できるが、今度はホバー領域以外を誤認識するケースも増大する。誤認識される領域は、たとえばタッチ操作の際に付着する油脂等で差分値が安定しない個所等に現れる。微小な領域として発現するイメージセンサの熱雑音に対しては step2 においてたとえば中央値フィルタやクロージン



図 2 異なる閾値での二値化によるタッチ領域とホバー領域の認識
Fig. 2 Detecting touch and hover region by binarization with multiple threshold.

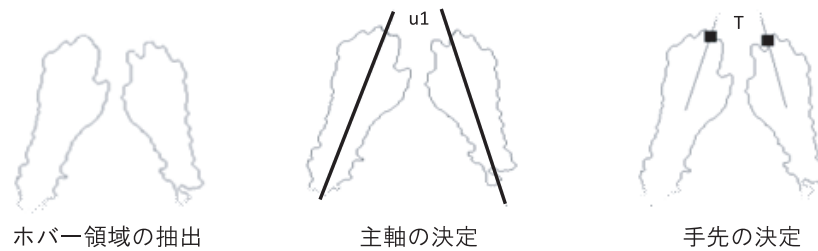


図 3 主軸による手先の推定

Fig. 3 Estimating fingertip with the eigenvector.

グ/オープニング等の一般的なノイズ処理で対処可能であるが、このようなエラーには十分に対応しきれない。

そこで、step3 のラベリング処理時に領域の面積が想定範囲外の領域はエラーとして判断する処理を加える。このような面積による除外はタッチ領域に対しても行う。想定範囲の最低値と最高値は、タッチ領域であれば指、ホバー領域であれば手や腕の大きさのモデルをあらかじめ設定しておく。

4.2 手先方向の推定

ホバー領域をオブジェクトの移動時におけるポインティングに割り当てるには、ユーザがポインティング先として意図しているであろうホバー領域のうちの1点を推定する必要がある。たとえば、人差し指を立てた状態でホバーさせ、指の先をポインティング先とする実装が考えられるが、指等の細い円柱状の物体は赤外光を反射する面積が小さいためホバー領域として認識されないことが多い。そのため、たとえば形状認識による指先の認識 [14] は困難である。

そこで、まず、指を閉じた状態の手先でホバー操作におけるポインティングを指示する操作方法を考える。これを実現するには、ホバー領域における手先を推定する必要がある。しかし、ホバー領域は、腕が認識されるか否かで大きさも形状も大きく変化するため、単なる形状認識では手先を決定できない。これは、腕の長さや遠方・近方、左右等ポインティングする位置によっても異なる。そこで、実際の使用時にホバー領域は赤外カメラからどのような撮影されるのかを確かめるために、5名の被験者にマルチタッチテーブルで画面上でオブジェクトを操作している想定で仮想的に操作の動作をしてもらい、そのとき撮像される赤外カメラの映像を調べた。その結果、掌から手首程度まではどのような状態でもつねにホバー領域として認識可能であるが、たとえば、遠方に腕を伸ばしてポインティングする際は掌から前腕までがホバー領域として認識されていた。また、上腕はどのような状態においてもホバー領域として認識されないことも判明した。通常、手先から肘までは比較的一直線状になることが多いため、ホバー領域も折れ曲がらない縦長の領域として認識されることになる。よって、ホバー領域における長辺を計算することで、まずはホバー

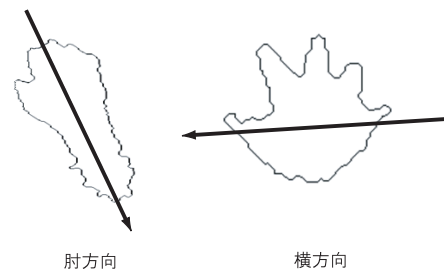


図 4 手先方向の誤推定

Fig. 4 False detections of the hands' direction.

領域における手先方向の推定を行う。ある領域を楕円状のものとして考えた場合、その重心からみた長辺方向のベクトルは、その領域に属するピクセルの分散共分散行列を求め、その最大固有値に対応する固有ベクトル $\mathbf{u1}$ として計算できる。これは主成分分析における主軸を求めることにほかならない。これにより、長辺方向を検出することができるため、その領域の重心からその方向へ延ばした直線が領域の端と交わる点 \mathbf{T} はおよそその手先となる。図 3 は、ホバー領域として別々にラベリングされた両手から、それぞれ主軸を計算し、 \mathbf{T} が推定された結果を示している。

しかし、この方法では以下の場合に \mathbf{T} の誤検出が起こる。

問題 1 主軸が重心から手先ではなく肘方向のベクトルとして計算された場合

問題 2 ホバー領域が横長になっており手先が長辺方向にない場合

前者は、固有ベクトルの計算結果に依存して頻繁に起こりうる。後者は、たとえば、手前側をポインティングする際に手を立てた状態になり掌のみが認識されている場合に起こりやすい (図 4)。これらの問題に対して、ホバー領域だけから正しい方向へ $\mathbf{u1}$ を補正することは困難である。

ところで、ホバー操作をオブジェクトの移動操作に割り当てることを考えた場合、まず移動させたいオブジェクトを何らかの方法で選択する必要がある。これには、指でのタッチ操作が直感的であり、タッチ領域に重なっているオブジェクトは移動モードに移行して、ホバー領域でポインティングされた点についてくるようにすれば、ホバー操作が実現できる。

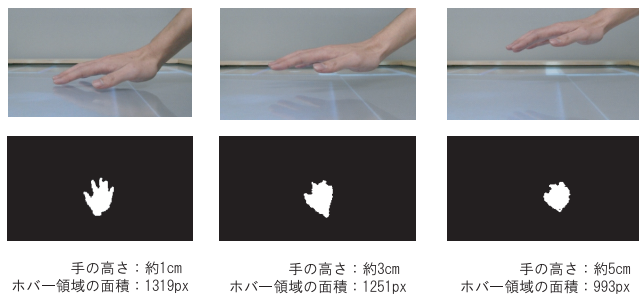


図 5 手の高さとはバー領域の面積

Fig. 5 Relationships between height and area of hover.

ここで、式 (2) より、タッチ領域はホバー領域の内部で検出されることと、タッチした箇所はホバー領域における手先の方向であることから、あるタッチ領域がどのホバー領域における指なのか関連付けることができる。手先とはすなわち指先であるため、このタッチ領域はホバー領域における手先方向に対するレジストレーションとして考えられる。

まず、あるタッチ領域を認識すると、そのタッチ領域を含むホバー領域を探す。もしタッチ領域を含むホバー領域が存在しない場合*2はそのタッチ領域はノイズと判断して破棄する。このようにタッチ領域が検出されるたびにそれを包含するホバー領域を確定させ、そのときのホバー領域における重心位置 C からタッチ領域の重心位置 T へ向かうベクトル v を、そのホバー領域の手先方向として保存する。次に、以下の式によって $u1$ を正しい手先 $u1'$ に補正し、それを基に T を更新すれば問題 1 は解決する。

$$u1' = \begin{cases} -u1(v \cdot u1 < 0) \\ u1(others) \end{cases} \quad (3)$$

問題 2 は、縦横比が極端に近い場合のみ 2 種類の固有ベクトルのうち v に近いベクトルを $u1$ とすることで回避可能である。具体的には、 C から $u1$ 方向へ延ばし、領域の端と交差する点 $E1$ までの線分の長さに対する、 C から $u1$ に直交する残りの固有ベクトル $u2$ 方向に延ばし、領域の端と交差する点 $E2$ までの線分の長さの比をとる。これが一定以上の割合*3になった場合にのみ、2つの固有ベクトルのうち v に近いベクトルを $u1$ とする。

4.3 T の高精度化

ホバー領域は、手が天板からどの程度離れているかによって大きく変化してしまう。事前の実験により、ホバー操作をしているときは、天板から 3cm から 10cm 程度の高さで手を動かすことが多いことが判明している。ところが、図 5 のように 1cm では比較的指先まで判別可能であっても 5cm では指先は欠けてしまい掌部分のみが認識

*2 少なくともタッチ領域の大きさ分のホバー領域は存在するはずであるが、大きさが閾値以下だとホバー領域とならないため。

*3 5章の実験では 0.8 から 1.2 とした。

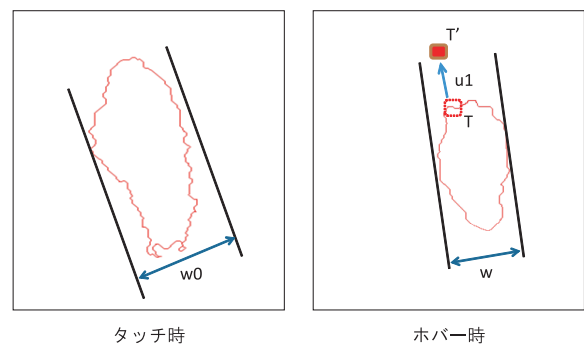


図 6 T の高精度化

Fig. 6 estimating accurate T.

されてしまう。よって、このまま上記の方法で T を指先であると推定しても、実際はそれよりも重心寄りの点を推定してしまうことになり、ユーザにとっては意図していない位置をポインティング先としてしまうことになる。そこで、これを補正することで、ホバーにおける手先の推定位置を安定化させる。

まず、前節の場合と同じく、ホバー操作の前に移動させるオブジェクトをタッチしたときのホバー領域の大きさをレジストレーションしておく。次に、手が天板から離れたときにも、ホバー領域をその大きさと見なして拡張することで、実際の手先の直下に T が推定されるよう、以下のよう T を T' に補正する (図 6)。

$$T' = T + \alpha \frac{u1}{|u1|} \frac{W0}{W} \quad (4)$$

ここで、 $W0$ はタッチ時に C と $u2$ から求めた掌の幅であり、 W は、ホバー操作時の掌の横方向の長さである。この W は、タッチ時と同じようにホバー時の C と $u2$ から求められる。 α は、環境により変更する定数であり後述する 5章の実験においては経験的に 10 とした。ユーザの手の高さに幅 W だけを用いて高さを用いない理由は、前述のとおり長辺方向は大幅に変動するためである。

以上の補正より、多少天板から手が離れてホバー操作を行っても手先を頑健に推定することが可能となる。

5. 評価実験 1 : T の推定精度の検証

5.1 条件

提案手法の精度を被験者実験により検証した。実験には図 7 のような試作した DSI 方式のマルチタッチテーブルを用いた。マルチタッチテーブルにおけるタッチ領域やホバー領域の認識には XGA の解像度を 15fps で撮影可能な赤外カメラを用いた。被験者は 9 名の大学生および大学院生であり、全員が右利きであったため右手で操作してもらった。

被験者には、天板から 5cm 程度、掌を浮かせた状態で画面に直線として表示されたコース上を手先で「なぞる」タスクを課した。コースは、その軌跡によって被験者の身

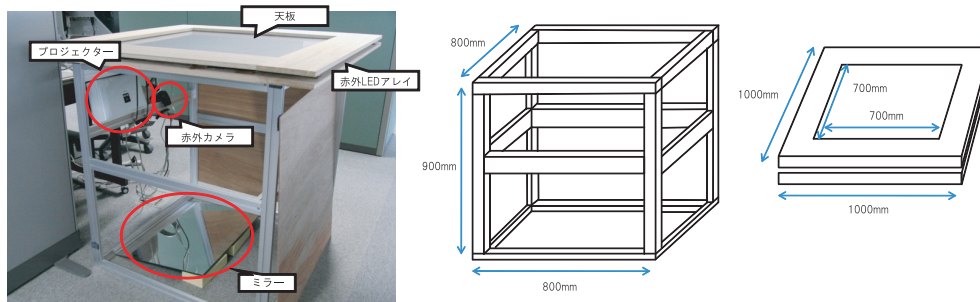


図 7 試作した DSI 方式のマルチタッチテーブル
 Fig. 7 Prototyped multitouch table with DSI.

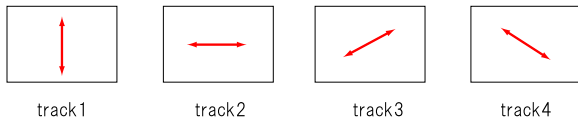


図 8 実験において被験者がなぞるコース
 Fig. 8 Tracks for subjects to move object.

長や身体的能力に依存した有利・不利が生じる可能性が考えられるため、図 8 のように垂直方向、水平方向、斜め方向にそれぞれ設定した。被験者には、いったん、コースの端を指先でタッチしてもらった後、コース上に手先がくるように 3 往復分、手を動かしてもらった。なお、被験者が表示に惑わされないようにするため、画面には移動させるオブジェクト等の表示はしていない。

このタスク中、4.2 節の処理まで行った状態から 4.3 節で提案した補正前の T と補正済み T からコースまでの最短距離を計算し、その精度を比較する。T の推定は、各被験者、各コースとも約 150 フレームにおいてなされ、総計で約 1,200 フレーム分の推定結果が得られた。

5.2 結果

表 1 は、補正を適応した場合としなかった場合の T からコースまでの誤差（最短距離）の平均を比較したものである。表の数値は平均、カッコ内の値は分散であり、** は t-検定の結果、有意水準 1% の差で提案手法による補正により誤差の改善が認められたことを示している。また、図 9 は、ある被験者における補正前と補正後の誤差の推移を表している。まず表 1 によると縦方向 (track1) 以外は、すべて誤差が大きく改善されている。このうち、縦方向では改善されずにむしろ誤差が大きくなっている理由を分析したところ、以下のことが判明した。まず、4.3 節における T の補正のためのベクトル u はユーザから見て縦方向、つまり track1 のコースに対して浅い角度に延びることが多い。これはわずかな u の違いによりコースとは逆方向に T が補正させる可能性がある不安定な状態といえる。この不安定さは、図 9 において被験者がコース上を 3 往復させていることが容易に判別可能な軌跡となっている他のコースと track1 のそれが大きく異なることから分かる。よって安

定的に補正することができず結果として改善しなかったものと考えられる。しかし、他のコースにおける改善の幅と比較して、track1 の誤差の悪化は平均値の差で 1 ピクセル以下であり、大きな実害とはなっていない。これに対して、track1 以外の補正は平均値が比較的大きく改善されており、図 9 を見ても、ほぼどのような位置に手があっても誤差が改善されていることが分かる。よってこれらの結果から、4.3 節の提案手法による補正はホバー操作中に適用すべき有用性があると考えられる。

6. Pinch-up ジェスチャ

ホバー操作は、移動させたいオブジェクトをタッチし、その後 T の直下に追従するように移動させ、また天板をタッチすることでその場所にオブジェクトを置くような、移動操作に割り当てることを想定している。しかし、単に指先でタッチして選択してからホバーで移動させる動作では、（実際はタッチ領域検出の連続として認識される）ドラッグ操作をドロウイング等に割り当てることを想定した場合、オブジェクトの内側に何かを書く操作をするとホバー操作のための選択と誤認識されてしまう。

そこで、移動させたいオブジェクトを単にタッチするのではなく、指で物を掴み上げる動作を模倣して親指と人差し指による Pinch-in ジェスチャによって選択し、その後ホバーにより移動させる Pinch-up ジェスチャを提案する。Pinch-up ジェスチャは、移動させるオブジェクトを指示する明示的行動をとまなううえ、物を掴み上げるという直感的な動作をもととしている点が優れている。図 10 に、Pinch-up ジェスチャによってオブジェクトを移動させた様子を示す。

Pinch-up ジェスチャによって選択されたオブジェクトはホバー領域でも前節による手先である T の場所にポインティングされるのではなく、親指と人差し指で掴んだ位置にポインティングされるべきである。この親指と人差し指の位置は、4.3 節で説明したタッチ領域検出時におけるユーザの手の情報をレジストレーションする際に、手先 T から Pinch-in ジェスチャとして検出された 2 つのタッチ領域の平均 P へ向かうベクトル w の長さ L と w と u_1 が

表 1 各コースにおける誤差の平均と分散 (pixel)
 Table 1 Averages and variances of error on each track (pixel).

	track1	track2	track3	track4
補正前	12.23 (57.65)	19.20 (194.99)	21.78 (124.44)	34.84 (279.36)
補正後	13.03 (61.69)	16.59 (172.19)	11.72 (71.28)	27.82 (302.52)
平均値の差	-0.8	2.61	10.06	7.02
自由度	1,164	1,200	1,223	1,225
t 値	-40.68	43.87**	55.54**	53.37**

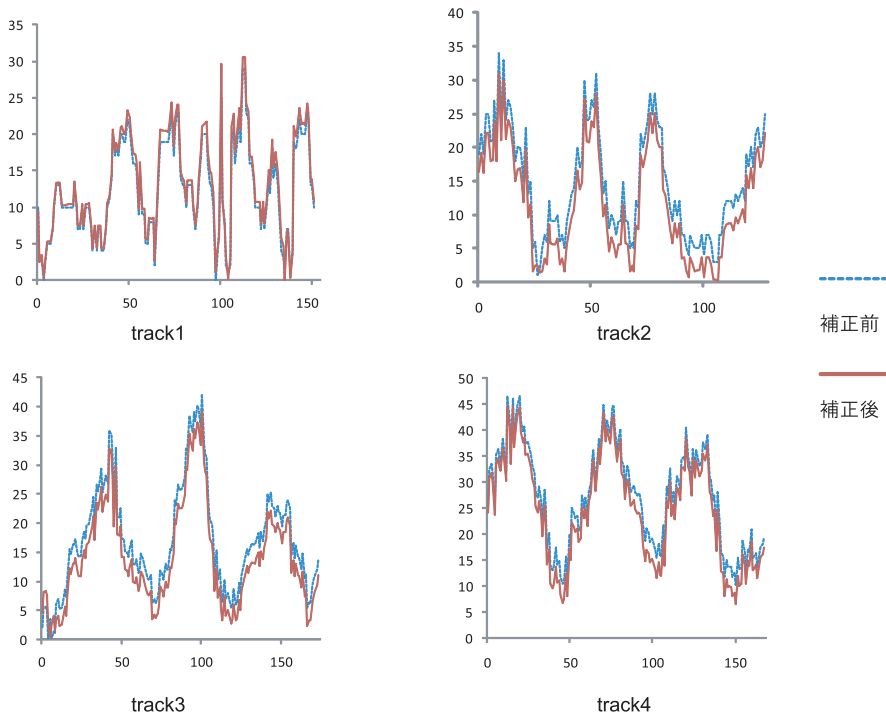


図 9 ある被験者における誤差の推移
 Fig. 9 Transition of errors on a subject.



図 10 Pinch-up ジェスチャによるオブジェクトの移動操作
 Fig. 10 Object moving with the Pinch-up gesture.

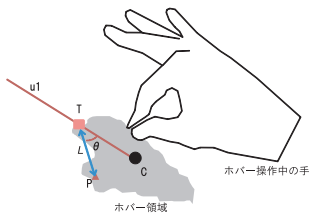


図 11 掴み上げ位置の推定

Fig. 11 Estimating the picked point of the Pinch-up gesture.

成す角 θ をそのホバー領域の情報とともに保持しておく (図 11). これにより, ホバー操作中の P は以下のように計算される.

$$P = T + L \frac{-R(-\theta)u_1}{|u_1|} \quad (5)$$

ここで T は 4.3 節により補正された T とし, $R(\cdot)$ は回転行列とする.

7. 評価実験 2: ドラッグ操作と Pinch-up ジェスチャの操作性

7.1 条件

Pinch-up ジェスチャの有用性を被験者実験により検証する. 本実験では, 150×150 ピクセル程度の画像を Pinch-up ジェスチャと一般的なドラッグ操作により図 8 における各

表 2 移動操作における速度と操作感の比較 (平均の単位は秒)
 Table 2 Speed and impression comparison on moving task (sec.).

	ドラッグ	Pinch-Up ジェスチャ
平均 (分散)	36.40 (59.77)	19.05 (36.85)
コメント	<ul style="list-style-type: none"> ・実際にラインに触りながら移動できるため 正確な移動が可能 ・移動に時間がかかった ・板と指との摩擦が気になった ・板の上で指を滑らせるのに苦勞した 	<ul style="list-style-type: none"> ・ドラッグに比べ無理がなく楽に行えた ・移動時間が短く済んだ ・画像が移動中にぶれてしまうことがあつたがそれほど大きくずれることはなかった ・画像がぶれてしまうので慎重になってしまい時間がかかった

track に沿って移動させるタスクを課した。ドラッグ操作は、オブジェクト内にタッチ領域が認識されるとドラッグ操作が始まり、タッチ領域が移動すると画像もそれに沿って相対的に移動する実装が一般的であるため、本実験でもそのような実装とした。その他の使用した機材や被験者等の条件は 5 章と同一である。

7.2 結果

表 2 上段は、それぞれの操作における平均時間を示している。これによると、Pinch-up ジェスチャのほうが平均 17 秒ほど早くタスクを完了していることが分かる。このデータに対して t 検定で検定したところ有意水準 1% で差が認められた。また、表 2 下段は、それぞれの操作の感想を実験後に口頭でインタビューした結果であり、Pinch-up ジェスチャはホバー領域の認識の不安定さゆえ画像が揺れることがあるもの、おおむね問題なく操作できていて、かつ素早く操作できたことを聞き取ることができた。以上の結果は、Pinch-up ジェスチャは、従来のドラッグ操作と比較してオブジェクトを素早く移動させるために有用であることを示唆している。

8. おわりに

本稿では、拡散照明方式のマルチタッチテーブル上で天板から少し浮いた位置に存在する手や腕をホバー領域として認識したうえで、その中の 1 点をユーザがポインティングしたい点として推定する手法について説明した。提案手法により高精度に推定した場合と単純に推定した場合の精度を被験者実験により検証したところ、ユーザから見て縦方向の移動を除いて有意に精度が向上した。また、ホバー操作を応用したオブジェクトを掴み上げる動作を模倣した Pinch-up ジェスチャを提案し、ホバー領域において掴み上げた位置を推定する方法を述べた。この Pinch-up ジェスチャとドラッグ操作によるオブジェクトの移動操作にかかる時間とユーザビリティを被験者実験により検証したところ、Pinch-up ジェスチャを用いた場合のほうが素早く移動でき、かつ操作感も問題ないことが判明した。

本研究における T の精度のチューニングは α に依存しており、評価実験では経験的に決めた値を用いた。しかし、ユーザによって手の動かし方や天板からの離し方は千差万別であり最適解は全ユーザで一意的に決定できない。よって、たとえばあらかじめユーザのモデルを何個か作成しておき観測された振舞いから最適な α を動的に決定する改良等が考えられるが、これは今後の課題とする。

謝辞 評価実験に用いたマルチタッチテーブルの実装に協力していただいた芝村達郎氏に感謝する。

参考文献

- [1] Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: A multi-user touch technology, *Proc. 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.219-226, ACM (2001).
- [2] Rekimoto, J.: SmartSkin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces, *Proc. SIGCHI2002*, pp.113-120, ACM (2002).
- [3] 鷲野浩之, 岡野祐一, 川又武典: 3次元タッチパネルインタフェース, *インタラクティブ 2009 シンポジウム論文集*, pp.37-38 (2009).
- [4] Benko, H., Wilson, A. and Baudisch, P.: Precise selection techniques for multi-touch screens, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1263-1272, ACM (2006).
- [5] Benko, H., Wilson, A.D. and Balakrishnan, R.: Sphere: Multi-touch interactions on a spherical display, *Proc. 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '08*, pp.77-86, ACM (2008).
- [6] Han, J.Y.: Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, *Proc. UIST2005*, pp.115-118, ACM (2005).
- [7] Lopez-Gulliver, R., Tochigi, H., Sato, T., Suzuki, M. and Hagita, N.: SenseWeb: Collaborative image classification in a multi-user interaction environment, *Proc. 12th Annual ACM International Conference on Multimedia*, pp.456-459, ACM (2004).
- [8] Echtler, F., Huber, M. and Klinker, G.: Shadow tracking on multi-touch tables, *Proc. Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '08)*, pp.388-391, ACM (2008).
- [9] Dohse, K., Dohse, T., Still, J. and Parkhurst, D.: Enhancing multi-user interaction with multi-touch tabletop displays using hand tracking, *1st International Conference on Advances in Computer-Human Interaction*,

- pp.297-302, IEEE (2008).
- [10] Takeoka, Y., Miyaki, T. and Rekimoto, J.: Z-touch: A multi-touch system for detecting spatial gestures near the tabletop, *ACM SIGGRAPH 2010 Talks*, ACM (2010).
 - [11] Dang, C., Straub, M. and André, E.: Hand distinction for multi-touch tabletop interaction, *Proc. ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, pp.101-108, ACM (2009).
 - [12] Wang, F. and Ren, X.: Empirical evaluation for finger input properties in multi-touch interaction, *Proc. 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '09)*, pp.1063-1072, ACM (2009).
 - [13] 内藤真樹, 志築文太郎, 田中二郎: 赤外線方式タッチパネルにおける接触面積を利用した押し込み操作の基礎検討, 情報処理学会第71回全国大会講演論文集, pp.173-174 (2009).
 - [14] 岡 兼司, 小林貴訓, 佐藤洋一, 小池英樹: 複数指先軌跡の実時間計測と HCI への応用, 情報処理学会研究報告 CVIM [コンピュータビジョンとイメージメディア], No.82, pp.51-58, 情報処理学会 (2000).



坂本 竜基 (正会員)

1974年生。2003年北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科博士後期課程修了。同年ATR知能ロボティクス研究所研究員, ATR知識科学研究所研究員を経て, 2008年より和歌山大学システム工学部講師。ATR客員研究員(兼任)。CSCW, グループウェアの研究開発に従事。ACM, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。博士(知識科学)。



水俣 司

1987年生。2010年和歌山大学システム工学部情報通信システム学科卒業。現在, 同大学院システム工学研究科博士前期課程に在学中。マルチタッチインタフェースに関する研究に興味を持つ。