

拡散赤外光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

水 俣 司^{†1} 坂 本 竜 基^{†1}

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僅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移動操作に割り当てられるホバー操作の領域として割り当てることで電子ペンを使用しないホバー操作を実現した。ただし、指を用いたホバー操作を認識すると手のひらや腕なども同時に認識されてしまうため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、ユーザーがホバー領域として想定するであろう一点を推定する手法を提案する。

Hover Detection on Multi-touch Table with Diffused Illumination

TSUKASA MIZUMATA^{†1} and RYUUKI SAKAMOTO^{†1}

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 a technique to estimate a point where users intend to point.

^{†1} 和歌山大学 システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

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ー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ける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、例えば、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⁾、赤外光を認識する方法などがある。このうち、背面からプロジェクター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究されている。

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/触れてないという判断しかできないため、マウスでは自然におこな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、パネルにペン先を触れさせたまま滑らせるドラッグ操作と区別して認識される。これにより、例えば、ペイントのようなソフトにおいて、モードの切り替えなしにフリーハンドの線の描画とオブジェクトの移動が可能な環境を実現できる。

図1は、赤外光を利用したマルチタッチテーブルの代表的な手法である FTIR (Frustrated Total Internal Reflection)、DI (Diffused Illumination)、DSI (Diffused Surface Illumination) 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。しかし、DI と DSI 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僅かに光を反射するため、画像処理の方法によっては、触れてはいないが触れそうな領域も認識可能である。よって、この領域をポインティング先として認識できれば、特殊な機材を用いることなくホバー操作を実現できる。ただし、先端が鋭角的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、この方法では指のほかにも掌や腕なども含んだ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できない。そこで、本研究では、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フレーム毎に推定する手法を提案する。具体的には、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 ジェスチャーを提案した上で、フ

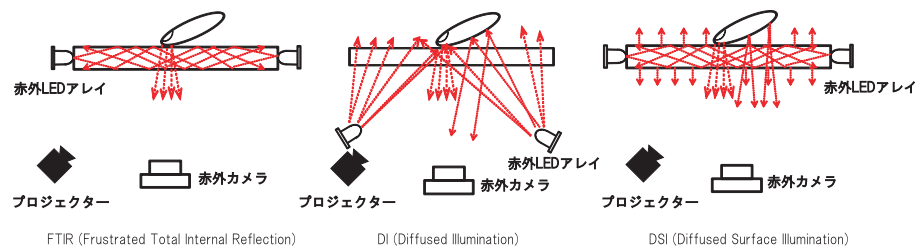


図1 赤外光を利用したマルチタッチテーブルの原理
Fig.1 The principles of the multi-touch tables with IR light.

レーム毎に変化するホバー領域の中でつまんでいる指の位置を推定する方法を述べる。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。

2. 赤外光を用いたマルチタッチインタフェース

赤外光を利用したマルチタッチインタフェースとして多数の手法が提案されている³⁾。図1に挙げた 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射してタッチされた位置を認識する仕組みである。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必要がある方式では上部からプロジェクター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重なり見づらいことがある。これに対して、透明なアクリルパネルを使うとテーブル下部からのプロジェクターの投影が可能なので、このような問題は起こらない。マルチタッチセンサー付きの液晶モニターを天板に使用してもこの問題がないが、大型化のコストが大きい。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、その研究も多数なされている。

FTIR は、アクリル板に対して指でやや強めに押し込んだ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机下部に向かって強く反射するため、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⁴⁾。FTIR は、押し込んだ位置のみが強く光るため頑健な認識が容易であるが、スマートフォンやノート PC などの物体を乗せただけでは反応しないため、直感的に電子デバイス内のデータのやり取りをするなどといったことに向いていない。これに対して、DI や DSI 等の赤外光を天板上面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、例えば物体の下面に QR コードの形をした反射シートを貼ることで物体認識することも可能である。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 というアクリルパネル内に反射素材の粒子を入れ込んだパネル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照射させる構成になっている。

DI や DSI 方式では、赤外光が天板上方にも届いているため、反射素材の物体も光を反射するが、掌や腕部分も僅かながら赤外光を反射している。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レベルであるため、本研究では、この認識された領域のことをホバー領域と呼び、ホバー操作の入力とする。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でホバー領域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⁵⁾。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形成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。これも設置の手間と誤認識の問題を孕んでいる。

天板部分のやや上方に赤外光のレーザー発振機をある一定の高さ毎に配置し、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⁶⁾。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をもっているため、これを利用した研究もある。このうち 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トングすべき点を高精度で推定する手法を提案している⁷⁾。これは、領域から点を推定す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全く異なる。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ーという新しいジェスチャーを提案している⁸⁾。新たなジェスチャー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出来ない。

4. 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

ここで、タッチ領域もホバー領域も赤外光を反射している、ある程度の面積をもつ領域であり、両者の違いは反射される赤外光の強度にしかない。そこで以下のように step1 の 2 値化時に 2 種類の異なる閾値を用いることで両者を区別することが可能である。

$$|Back - Corr.| = \begin{cases} hover(> lowthresh.) \\ touch(> highthresh.) \\ nothing(others) \end{cases} \quad (1)$$

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。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、例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箇所などに現れる。通常の微小な領域として発現するイメージセンサーの熱雑音に対しては step2 における例えば中央値フィルターやクロージング/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

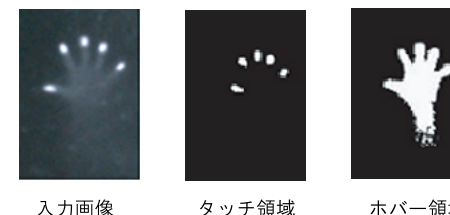


図 2 異なる閾値での 2 値化によるタッチ領域とホバー領域の認識

Fig. 2 Detecting touch and hover region by binarization with multiple threshold.

する処理を加える。このような大きさにより除外する処理はタッチ領域に対してもおこなう。想定範囲の最低値や最高値は、タッチ領域であれば指、ホバー領域であれば手や腕のモデルを想定し、予め設定しておく。

5. ホバー領域における手先方向の推定

ホバー領域をオブジェクトの移動等の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領域のうちの 1 点を推定する必要がある。例えば、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インタフェースが考えられるが、指などの細く湾曲している物体は赤外光をあまり反射しな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、例えば形状認識による指先の認識⁹⁾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、ホバー領域のうち手先方向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方向を決定できない。実際にどの程度まで認識されるのか数名で実験した結果、掌から手首くらいまでが最も多く認識されるが、例えば、遠方に腕を伸ばしてポインティングする際は肘までが領域として認識されることが判明した。また、肘より肩方向は通常の姿勢では認識し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、まずはホバー領域における指先の推定をおこなう。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

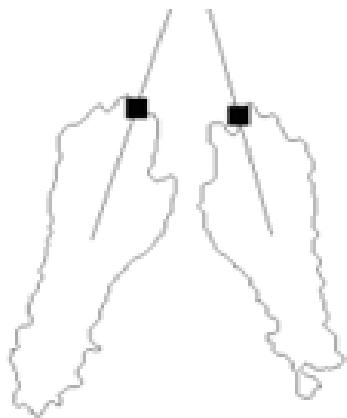


図 3 主軸による手先の推定結果
Fig. 3 Estimating tip of hand by using eigenvector.

有ベクトル u_1 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他ならない。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 T を大凡の手先として検出できる。図 3 に推定結果の例を示す。

しかし、この方法では以下の場合に誤った点を検出してしまふ。

- 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おこりうる。後者は、例えば、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。これらは、主軸だけで手先を判断するモデルに依存している以上、正しい方向へ判断しなおすことは困難である。

6. タッチ領域による手先方向のレジストレーション

ホバー領域だけで判断して問題 1、2 を解決することは非常に困難である。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、先ず移動させたいオブ

ジェクトを選択する必要がある。オブジェクトの選択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付いてくるようにすれば、ホバー領域はそのオブジェクトが選択された後に初めて意味をなす領域となる。このことを利用して、タッチされた際にホバー領域の手先方向をレジストレーションすれば、問題 1 の解決が可能である。また、タッチされた際にホバー領域の大きさをそのユーザの手の大きさとしてレジストレーションすれば問題 2 も解決する。

ここで、式 1 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、タッチ領域をホバー領域と関連付ければホバー領域における手先方向の一種のレジストレーションになる。あるタッチ領域を認識すると、それを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^{*1}はそのタッチ領域はノイズとして判断して破棄する。

このようなタッチ領域が検出される度にそれを包含するホバー領域を確定させ、その時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。この v と u_1 との内積が負であれば u_1 の符号を反転させ方向を矯正することで問題 1 を解決する。

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 u_1 とすることで回避可能である。具体的には、 C から u_1 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 u_1 に直交する残りの固有ベクトル u_2 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 u とする。

7. 手の大きさに対するレジストレーション

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 5cm 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、5cm では比較的指先まで判別可能であったものも 10cm では指先は欠けてしまい掌部分のみが認識されてしまう。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

*1 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

まうことになる。そこで、ホバー領域も最大になる、つまり天板に手が近づいた状態となるタッチ領域が認識される時に重心位置と $u1$ と $u2$ を用いてそのホバー領域に対する掌の高さ H と幅 $W0$ を登録しておく。実際にホバー操作をしている際に推定する T から $u1$ と逆方向に H 分だけ下がった点から $u2$ を用い幅 W を求め、 W と $W0$ の比、 T から $u1$ 方向に延長した位置に T を更新する。これにより、多少天板から手が離れてホバー操作をおこなっても手先を頑健に推定することが可能である。ユーザの手の大きさに幅 W だけを用いて高さを用いない理由は、前述の通り長辺方向は大幅に変動するためである。

8. Pinch-up ジェスチャー

単に人差し指でタッチして選択してもホバーのポインティングに影響はないが、本研究では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り Pinch-in ジェスチャーをした物体を移動させるオブジェクトとして選択し、その後ホバーにより移動させる Pinch-up ジェスチャーを考案した(図4)。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ー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が困難になる。これに対して、Pinch-up ジェスチャーは、移動させることに対する明示的行動を伴ううえ、その行動が物を掴み上げるという直感的な行動を源泉としている点が優れている。

Pinch-up ジェスチャー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、6章と7章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 ジェスチャーとして検出された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 $u1$ が成す角 θ をそのホバー領域の情報と共に保持しておく。ホバー操作中は、6章と7章により導出された T から L と θ を使えば簡単に掴み位置 P を推定することが可能である(図5)。

9. 評価実験

Pinch-up ジェスチャーを用いてオブジェクトを移動させる際に、提案手法がどの程度の精度を保つのか被験者実験により評価した。実験には、図6のような自作の DSI 方式のマルチタッチテーブルを用いた。被験者は3名の大学院生である。

被験者にはマルチタッチテーブル上に描画された画像のオブジェクトを、画面に表示さ

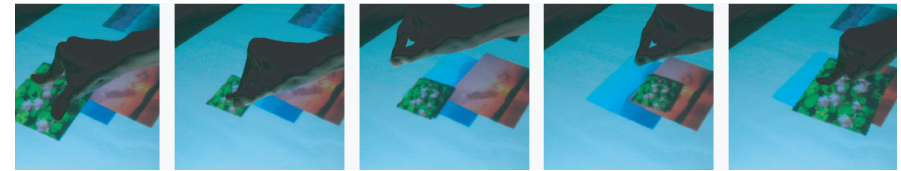


図4 Pinch-up ジェスチャー
Fig. 4 Pinch-up gesture.

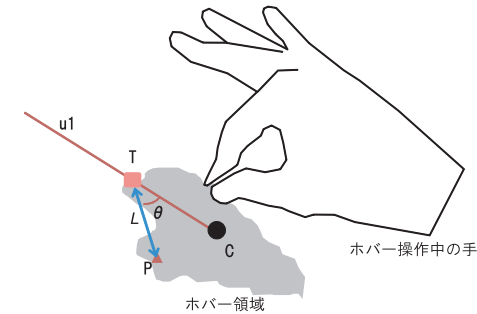


図5 掴み上げ位置の推定
Fig. 5 Estimating the point of Pinch-up gesture.

れた線のコース上をなぞるように、Pinch-up ジェスチャーを用いて移動させてもらった。コースは図7のような垂直方向、水平方向、斜め方向にそれぞれ設定されている。実験の間、VGAの赤外カメラを用いて点 P を約 15Hz で推定し、その値と表示されている線までの垂線の長さ誤差として測定した。

この結果を表1に示す。これによると、垂直方向、水平方向の移動では殆ど誤差なく移動できていることが判る。これに対し、斜め方向は精度としては問題ないレベルであるものの、やや分散が大きい。これは、極端に離れた箇所を推定する場合が極稀に含まれているためであり、精度の安定化が今後の課題として判明した。

10. おわりに

本稿では、DIおよびDSI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。また、この手法を応用したオブジェクト

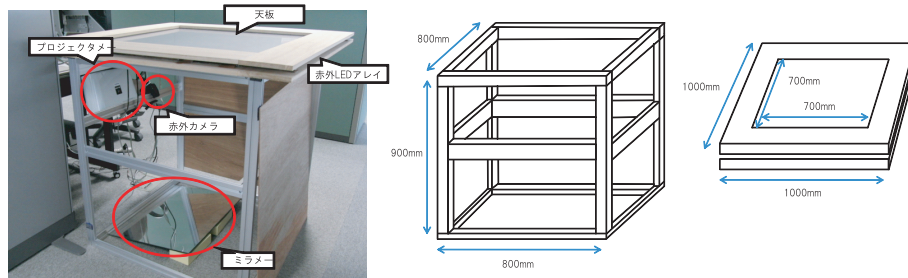


図 6 試作した DSI 方式のマルチタッチテーブル
Fig. 6 Prototyped multitouch table with DSI.

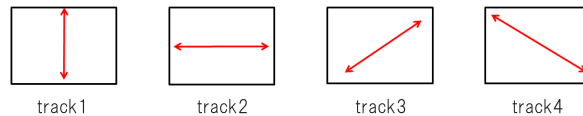


図 7 実験において被験者がなぞるコース
Fig. 7 Tracks for subjects to move object.

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)

	case1	case2	case3	case4
平均	3.8	5.5	11.8	13.9
分散	10.9	16.9	63.3	74.5

を掴み上げる動作を模倣した Pinch-up ジェスチャーを提案し、その精度を被験者実験により測定した。

参 考 文 献

- 1) Dietz, P. and Leigh, D.: DiamondTouch: a multi-user touch technology, *Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology*, New York, NY, USA, ACM, pp.219–226 (2001).
- 2) Rekimoto, J.: SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces, *Proceedings of the SIGCHI2002*, New York, NY, USA, ACM, pp. 113–120 (2002).
- 3) 内藤真樹, 小林敦友, 志築文太郎, 田中二郎: 円筒型マルチタッチインタフェース, 情

報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 情報処理学会, pp.37–43 (2008).

- 4) Han, J.Y.: Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection, *Proceedings of UIST2005*, ACM, pp.115–118 (2005).
- 5) Echtler, F., Huber, M. and Klinker, G.: Shadow tracking on multi-touch tables, *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces(AVI '08)*, New York, NY, USA, ACM, pp.388–391 (2008).
- 6) Takeoka, Y., Miyaki, T. and Rekimoto, J.: Z-touch: a multi-touch system for detecting spatial gestures near the tabletop, *ACM SIGGRAPH 2010 Talks*, New York, NY, USA, ACM, pp.57:1–57:1 (2010).
- 7) Wang, F. and Ren, X.: Empirical evaluation for finger input properties in multi-touch interaction, *Proceedings of the 27th international conference on Human factors in computing systems(CHI '09)*, New York, NY, USA, ACM, pp.1063–1072 (2009).
- 8) 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 (2009-pp.173-174) (2009).
- 9) 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, 社団法人情報処理学会, pp.51–58 (2000).