

# ウェアラブル仮想タブレット： 赤外線照射カメラを利用した指先入力インタフェース

浮田 宗伯<sup>†</sup> 寺部 亮紘<sup>†</sup> 木戸出 正継<sup>†</sup>

本論文では、ウェアラブルコンピューティング環境での入力インタフェースとしてウェアラブル仮想タブレットを提案する。ウェアラブル仮想タブレットは、小型 CCD カメラとヘッドマウントディスプレイ (HMD) を着用し、身近にあるノートやバインダなどの四角い平面状の物体を手に持ち、その表面を指先でなぞることによって絵や文字など任意のコンテンツが入力可能なインタフェースシステムである。本システムでは、赤外線照射により対象物体からの反射光を撮像可能な赤外線照射カメラを利用し、赤外線反射光の強さを解析する画像処理のみで、入力平面の検出、指先検出・追跡、入力のオン・オフ判定を行う。また、ウェアラブルコンピューティング環境下での継続的な入力を容易にするために、HMD 上に表示される入力平面領域に入力済の軌跡を重畳表示する。実験により提案システムの実用性を確認した。

## Wearable Virtual Tablet: Fingertip Drawing Interface Using an Active-infrared Camera

NORIMICHI UKITA,<sup>†</sup> AKIHIRO TERABE<sup>†</sup> and MASATSUGU KIDODE<sup>†</sup>

This paper presents a novel drawing-input interface 'Wearable Virtual Tablet' for a wearable computing environment. A user wears a camera with a head-mounted display (HMD) without any keyboard or other mechanical devices. While the user traces on a plane object with his/her fingertip, the system tracks its position and regards it as the input locus. To easily understand the motions of the input plane and the fingertip drawing, we employ a camera device with infrared LEDs. 1) To find the region of a plane object in the observed image, four edge lines that compose a rectangular object can be easily extracted by employing the properties of an active-infrared camera. 2) To precisely determine the position of a fingertip, we utilize a simple finger model that represents a finger edge independent of its posture. 3) The system can distinguish whether or not a fingertip touches a plane object by analyzing image intensities in the edge region of the fingertip. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed system.

### 1. はじめに

近年、計算機の小型軽量化が進むなか、常時着用することを目的としたパーソナルコンピュータも出現しており、近い将来、人々が常時コンピュータを身に付け、日常的に情報活動の支援を受けることができるようになると思われる。このとき、人間が要求や情報を計算機システムに伝えるために必要となるのが、ウェアラブルコンピューティング環境に適した入力インタフェースである<sup>1)</sup>。

ウェアラブルコンピューティング環境での入力インタフェースには、従来のデスクトップ PC 用の入力

インタフェース(キーボード、マウスなど)を小型化したもの(実際に文献 2)などの企業において開発)や、ジェスチャを利用したものなど<sup>3)~6)</sup>が研究・開発されている。しかし、従来のデスクトップ PC 用入力インタフェースでは、インタフェース機器を手で直接操作しなければならないため、小型化には限界があり、また、極端な小型化にともない操作性が悪化してしまう。一方、ジェスチャを利用した入力インタフェースでは、機器の大きさに制約を受けることなく手指を空間中で自由に移動させながら入力操作が可能となるので、よりウェアラブルコンピューティング環境に適した操作を提供できる。以下に、こうしたジェスチャ認識によるウェアラブルインタフェースの例を示す。

**FingerRing**<sup>3)</sup> 指に付けられたセンサが指の動きを検出し、仮想的にキーボード操作を実現している。

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科  
Graduate School of Informatics, Nara Institute of Science and Technology

**WristCam**<sup>4)</sup> 手首の内側に装着したカメラが手指の動きを観測し、いくつかのジェスチャを認識する。このひらめにゅう<sup>5)</sup> ユーザと同じ視点画像を観測するために頭部に装着されたカメラを用い、手指の形状やジェスチャ認識を行う。また、ユーザが着用している小型ディスプレイ (Head Mounted Display, 略して HMD) 上で、観測された視点画像中の手指上に選択メニューを表示し、その操作も指差しジェスチャで行っている。

**Gesture Pendant**<sup>6)</sup> 赤外線照射 LED の反射光を観測するカメラシステムを利用して、観測画像中からユーザの手領域を簡易な処理で正確に切り出し、その動き (ジェスチャ) の分類を行っている。これらのインタフェースは、定義済の文字やコマンドの入力 (キーボード入力など) に対しては有効であるが、任意の絵・記号の入力やポインティング (マウスなどによる任意の点・線入力など) には利用できない。そこで、任意コンテンツ入力を目的としたいいくつかのインタフェースが提案されているが、そのいずれも以下に示す欠点がある。

**ジャイロと加速度センサを用いたペンインタフェース**<sup>8)</sup> ユーザはジャイロと加速度センサのついたペン型デバイスを備えており、このペンによる筆記動作が 2 次元の軌跡としてセンサ群によって検出され、任意の点・線軌跡が入力可能である。しかし、(1) つねにペン型デバイスを携帯しなければならない、(2) 筆記動作中、入力・非入力を指定するためにボタンスイッチのオン・オフを行わなければならないという煩雑さをともなう。

**一筆書きによる文字入力**<sup>7)</sup> 上記でのひらめにゅう<sup>5)</sup>と同様、ユーザは頭部にカメラを装着しており、このカメラで観測されるユーザの指先動作が一筆書きの 2 次元軌跡として入力される。しかし、一筆書きの線軌跡しか入力できないため、用途が限られてしまう。

そこで本論文では、上記の既存研究が持つ問題を解決し、ウェアラブルコンピューティング環境における絵や手書き文字などの任意コンテンツを入力可能なインタフェースとして『ウェアラブル仮想タブレット (Wearable Virtual Tablet, 略して WVT)』を提案する。WVT は、直感的かつ容易な操作法を提供するための以下の特徴を備える。

- 実世界中の平面物体を指でなぞることにより、その軌跡が入力できる。
- 平面物体に指が付いているときは入力状態、指が離れているときは非入力状態と認識される。

以降、2 章において提案システムの概要と利用カメラデバイスについて述べ、3 章において実際に WVT を実現するために必要となる入力平面と指先の位置検出、入力非入力の判定、ならびに入力コンテンツを HMD 上に重畳表示するための具体的手法を提案し、4 章において実験による性能評価を行って、最後に 5 章においてまとめと今後の展望を示す。

## 2. ウェアラブル仮想タブレット

### 2.1 システムの概要

WVT は、頭部に小型 CCD カメラと HMD を着用し、カメラからの画像を用いて任意の点・線軌跡を入力可能な仮想インタフェースである。身近にあるノートやバインダなどの四角い平面状のものを手に持ち、その表面を仮想入力平面とし、指先で入力平面をなぞることによって絵や文字などのコンテンツを入力する。また、入力のオン・オフを指先の接触・非接触で検出するため、直感的に分かりやすく、自然な入力を行うことが可能である。

WVT を実現するための技術的課題をあげる。入力平面を検出 まず、ユーザが手に持っている入力平面を検出する。ただし本システムでは、後の「入力軌跡の重畳表示」を実時間かつ安定に行うために、入力平面の形状を矩形に限定した。

指先の検出と追跡 検出した平面領域中で、入力操作を行うための指先検出・追跡を行う。

入力時と非入力時の判定 入力のオン・オフを判定するために、検出された指先が入力平面に接触しているか否かを判定する。

入力軌跡の重畳表示 カメラを頭部に着用し、入力平面を手に持っているため、観測画像中の入力平面の位置・姿勢はつねに変化する。そのため、自然な連続入力を可能とするためには、観測画像中における入力平面の動きにあわせて、ユーザが入力済みの軌跡を重畳表示する必要がある。

図 1 に、上記技術の組合せによるウェアラブル仮想タブレットの処理の流れを示す。処理は登録モードと入力モードの 2 つに分けられる。登録モードにおいて、接触状態・非接触状態の判定を行うための基準を事前に決定しておく。この際、入力平面に接触している指先周辺の画像情報を解析するため、上記技術のうち「入力平面を検出」「指先の検出と追跡」のみが必要となる。入力モードでは、登録モードで決定した接触・非接触の判定基準に基づいて、入力・非入力状態の判定を行い、実際に指先での入力を行う。

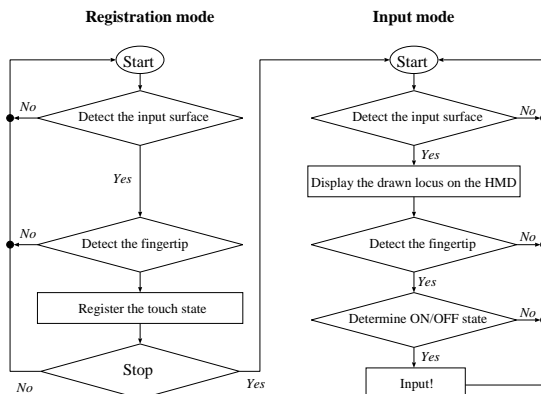


図 1 WVT の動作フローチャート  
Fig. 1 Flowchart of the WVT.

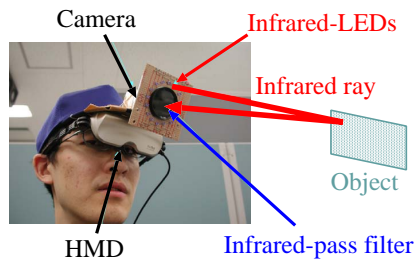


図 2 WVT の構成：赤外線照射カメラと HMD  
Fig. 2 Architecture of the WVT: an active-infrared camera and an HMD.

## 2.2 赤外線照射カメラ

本論文で提案する WVT では、仮想入力平面の検出や指先と仮想入力平面との接触・非接触の判定を行うために、小型 CCD カメラと赤外線発光ダイオードを組み合わせた赤外線照射カメラを利用した。この赤外線照射カメラは、空間中の物体に対してレンズ周辺から赤外線を照射し、その反射光の強度を濃淡画像（以降、赤外線反射画像と呼ぶ）として撮像するカメラシステムである。このように赤外反射光を観測するカメラシステムは、簡易な処理で注目物体の情報を抽出できるなどの利点（詳細は後述）を備えるため、人間が着用する<sup>6)</sup>・しない<sup>9)</sup>にかかわらず様々なタスクに対する有用性が示されている。

試作した赤外線照射カメラにより構成される WVT を装着した様子を図 2 に示す。この試作カメラでは、近赤外線領域で高感度の白黒 CCD カメラに赤外線透過フィルタを被せ、その周りに赤外線発光ダイオードを並べている。

空間中の物体に当たって反射してくる赤外光の強度は、光源から対象物体までの距離に応じて変化する（距離が近いほど強く、遠いほど弱くなる）。すなわち、



(a) カラー画像 (b) 赤外線反射画像 (c) 近接物体

図 3 赤外線照射カメラを利用した近接物体検出

Fig. 3 Close-object extraction using an active-infrared camera.

赤外線反射画像には疑似的に距離情報が含まれているといえる。ただし、反射光の強度は対象物体の材質、反射特性、法線方向など様々な要素に影響を受けるため、純粋な距離情報が得られるわけではない。

以下に、WVT に必要な機能を実現するために赤外線反射画像を利用するメリットをあげる。

- 背景の複雑さに影響されことなく手・入力平面領域の切り出しが可能：赤外線反射画像中では、カメラから近距离に存在するものだけが明るく撮像されるため、簡単に遠景領域を除去することが可能になり、カメラの正面・近距离に存在するはずの手および入力平面の検出が容易になる。図 3 に例を示す。図中、(a) が通常の色画像、(b) が赤外線反射画像、(c) が近接物体の検出結果を示している。
- 指先と入力平面との接触を検出可能：距離に依存した画像が取得可能であるため、入力平面と指先との接触を検出することが可能になる。

これらの特性を利用することで、入力平面の検出、指先の検出・追跡や入力時と非入力時の判定を容易に実現可能となる。

しかし、赤外線反射光を利用することによるデメリットも存在する。太陽光などの強い赤外線を含んだ環境光の下では、デバイスからの照射赤外光から必要な情報（濃淡値情報）が得られなくなってしまう。そこで、本論文では WVT の使用範囲を屋内に限定した。

## 3. 赤外線照射カメラを利用した指先入力手法

### 3.1 入力平面の検出

観測画像中から入力平面となる矩形物体領域を検出し、その位置・姿勢を決定するためには、カメラに近接する 4 辺形領域を抽出し、その 4 頂点の座標を決定しなければならない。

まず、入力された赤外線反射画像から、濃淡値が一

この問題を解決するための方法として、1) 環境光中の赤外線よりも強力なエネルギーを照射するデバイスの利用、2) 照射赤外光オン/オフの各瞬間における観測濃淡値の差分解析による外部赤外光へのロバスト化<sup>10)</sup>、などがあげられる。

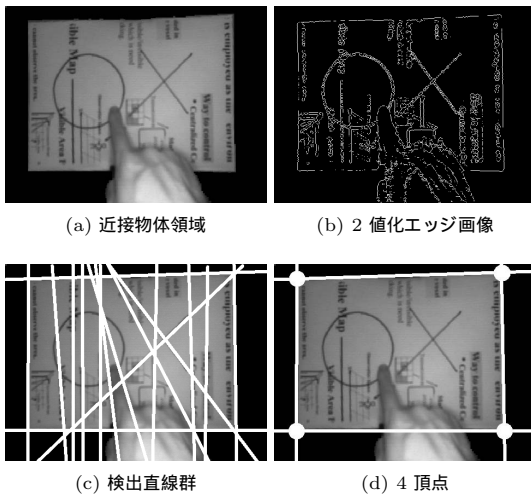


図4 入力平面物体の4頂点の検出

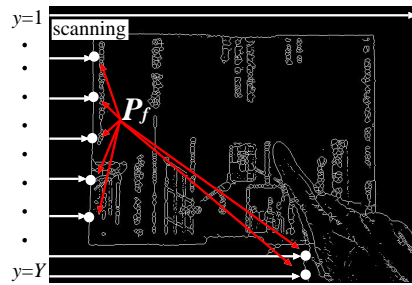
Fig.4 Detecting the corners of an input plane.

定値以上の領域を切り出す．この閾値処理によって切り出される領域は，カメラに近接する手領域と入力平面領域のみとなる（図4(a)）．こうして近接物体領域が切り出された画像に対して，sobel フィルタによるエッジ検出，2値化，細線化処理を行い（図4(b)），高速 Hough 変換<sup>11)</sup>を適用することにより画像中の直線群を検出する（図4(c)）．

図4(c)に示すように，入力平面の表面に模様を描かれている場合，その模様からなるエッジが直線として検出されてしまう可能性がある．この場合，複数検出された直線群の中から入力平面の4辺を検出しなければならない．本システムでは，まず閾値処理によって手領域と入力平面領域のみを画像中から切り出しているため，全検出線分群を囲むように配置されている長い線分が，検出すべき4線分となるはずである．そこで，以下の手順に従って4辺を決定する．

- (1) 図5に示すように，画像中の全水平軸 ( $y = \{1, \dots, Y\}$ ) において画像左端から右端に向けてエッジ点を探索する．各軸において，最初に検出されたエッジ点を  $P_{f_i}$  ( $i \in \{1, \dots, Y\}$ ) とする．このエッジ点探索は，画像右端から左端，画像上端から下端，画像下端から上端に向けても同様に行われる．こうして検出されるエッジ点は，すべて入力平面もしくはユーザの手の境界線に相当している．また，観測画像

通常のカメラで撮影された画像では，レンズ収差を原因とする幾何学的な歪みが生じているため，直線が曲線として観測されてしまう．本システムでは，文献12)で提案されている手法によって，この幾何学的歪みを補正している．

図5 画像左端から右方向に向けたエッジ点  $P_f$  の探索Fig.5 Scanning edge points  $P_f$ s from the left side of the image to the right.

中で入力平面は十分な大きさで映っており，また，ユーザの手領域の大部分は入力平面上に重なっていることから，ほとんどのエッジ検出点は入力平面の境界線上において検出されるはずである．

- (2) 各検出エッジ点に関して，最も近い検出直線  $L_y$  までの距離を計算する．この距離が閾値以下であれば， $L_y$  に対して投票が行われる．
- (3) 全検出エッジ点に関して検出直線への投票を行った結果，投票数の多い4直線を入力平面の4辺と見なす．

上記の手順によって，入力平面の模様や手と入力平面の位置関係に影響されることなく入力平面の4辺を求めることができ，この4辺で囲まれた領域を入力平面領域と見なすことができる．また，4辺の交点から入力平面の4頂点を求めることができる．この4頂点座標は，入力平面の移動に追従した「入力軌跡の観測画像上への重畳表示」のために必要となる（詳細は3.4節で述べる）．

### 3.2 指先の検出・追跡

次に，入力を行う指先の正確な座標を推定する．

従来提案されていた WVT<sup>13)</sup>では，入力平面領域中で画像上方から単純なエッジ探索を行い，最初に検出されるエッジ点を指先点と見なしていたため，

- 入力平面上の模様によってエッジが検出されてしまう場合，指先検出が不可能になる，
- 入力平面上に模様がない場合でも，画像上方からの単純な探索では，指の姿勢によって指輪郭上の異なる点が指先として検出されてしまう，

という問題があった．

文献14)では，手領域が正確に切り出されている2値化画像の中から，円形テンプレートマッチングによって複数の指先座標を推定する手法が提案されている．この文献で提案されているシステムでは，観測物体の熱放射を観測できるセンサを用い，観測画像中の

手領域のみを非常に正確に切り出すことができおり、また、カメラから指までの距離がつねにほぼ等しいため、シンプルな円形テンプレートによる指先探索・追跡が実現できている。このように、従来の指先検出法のほとんどは、まず肌色情報や温度情報に基づいて手領域を正確に切り出した後、手領域の中から指先に相当する点を探索している。しかし、我々の提案システムで利用する赤外線反射カメラで撮影される画像はカラー情報を含まない濃淡画像であるため、手領域の切り出しは困難である。よって、文献 14) の手法を、そのまま我々が提案するシステムに適用することはできない。そこで、文献 15) で提案されている「カラー画像と赤外線反射画像を同時に観測可能なカメラデバイス」を利用することにより、赤外線反射画像の特性とカラー画像からの肌色検出の結果を統合させた手領域検出を実現することも可能である。しかし、1) 任意の背景を含んだ画像中から安定に肌色領域を切り出すことが困難である、2) 実時間性を重視してより高速な処理を目的とする、という理由から、本システムでは赤外線反射画像のみを解析することによって指先検出を行う。

そこで本論文では、前節における処理で得られているエッジ画像中から指先座標を探索する手法を提案する。提案手法では、指先を半円としてモデル化し、検出エッジの中からモデルマッチングによって指先座標を決定する。エッジ画像中の指先領域の例を図 6 に示す。この図から、エッジ画像からの指先検出に関して以下のような問題が確認できる。

問題 1 指先の境界線は真の弧とは若干異なり、歪んだ弧として観測される。

問題 2 指先の位置・姿勢に応じて、観測される弧の大きさ・姿勢も変化する。

問題 3 エッジ検出の失敗によって、部分的に境界線がとぎれてしまう。

従来提案されてきた半円や弧の検出法<sup>17),18)</sup>では、反復計算やロバスト統計を利用することによって、上記の問題に対処していた。これらの手法は、画像中で

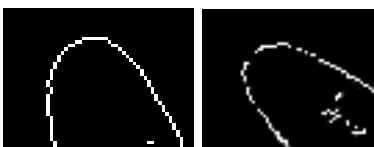


図 6 指先の輪郭線

Fig. 6 Edge line of a fingertip.

弧が大きく観測されている場合における正確な弧検出には適しているが、計算時間が非常に長く、小さな弧領域を検出するのに適していない。WVT システムでは、快適な使用のために実時間動作が求められ、また、検出目標となるユーザの指先は、観測画像中で小さな弧 ( $640 \times 480$  [pixel] の画像中で  $10 \times 10$  [pixel] 程度の大きさ) として観測されるため、従来の正確な弧検出を目的とした手法をそのまま適用することができない。

上記の問題に対処した実時間半円検出法を以下の手順によって実現する。

**Step1** あらかじめ、指先エッジのモデルとして図 7 (1) に示す Lookup Table を準備しておく。Lookup Table 中、指先エッジの存在可能範囲を表す半径  $r_{min}$  から  $r_{max}$  の範囲に対してエッジ点を配置する。 $r_{min}$  と  $r_{max}$  は、実際に指先をカメラで観測し、その観測像の大きさの変化を調べ、事前に求めた値である。

**Step2** Lookup Table 中の全エッジ点を、Lookup Table の中心を頂点とする  $N$  個の弧領域 (図 7 (2) 中の  $\{A(1), A(2), \dots, A(N_a)\}$ ) に分割する。弧領域  $A_i$  (ただし、 $i \in \{1, \dots, N_a\}$ ) 中のエッジ点群を、 $\{P_p^{A_i} | p \in \{1, \dots, N^{A_i}\}\}$  と表現する。ただし、 $N^{A_i}$  は弧領域  $A_i$  中のエッジ点の個数である。この処理も、WVT を利用する前にあらかじめ行われている処理である。

**Step3** WVT を実行中に観測される画像中、中心座標が  $(C_x, C_y)$ 、1 辺の長さが  $2 \times r_{max}$  [pixel] のウィンドウを  $W_e$  とする。すなわち、このウィンドウは、Lookup Table と同じ大きさである。もし、ウィンドウ  $W_e$  中のエッジ点の数が閾値以上であれば、Step4 に進む。

**Step4** ウィンドウ  $W_e$  中の弧領域  $\bar{A}_i$  が、Lookup Table 中のエッジ点  $P_x^{A_i}$  と同じ座標のエッジ点を含んでいる場合、この弧領域  $\bar{A}_i$  を相関弧領域と呼ぶ。図 7 (3) にその例を示す。

**Step5** エッジ画像中の弧領域  $\{\bar{A}_c, \bar{A}_c + 1, \dots, \bar{A}_c + \frac{N_a}{2} - 1\}$  の組合せが半円  $\bar{C}_c$  を成すとする。もし、これらの弧領域のすべてが相関弧領域であれば、図 7 (4) に示すように  $\bar{C}_c$  を画像中に観測されている半円と見なす。また、半円をなす相関弧領域  $\{\bar{A}_c, \bar{A}_c + 1, \dots, \bar{A}_c + \frac{N_a}{2} - 1\}$  において、中心座標  $(C_x, C_y)$  から見て検出エッジ点  $P_x^{A_i}$  よりも外側にある画素を半円外領域と見なす。すなわち、各相関弧領域における検出エッジ点までの距離に応じてその弧領域の半径が決まるため、正半

頭部着用カラーカメラによる肌色検出は、文献 16) などで提案されている。

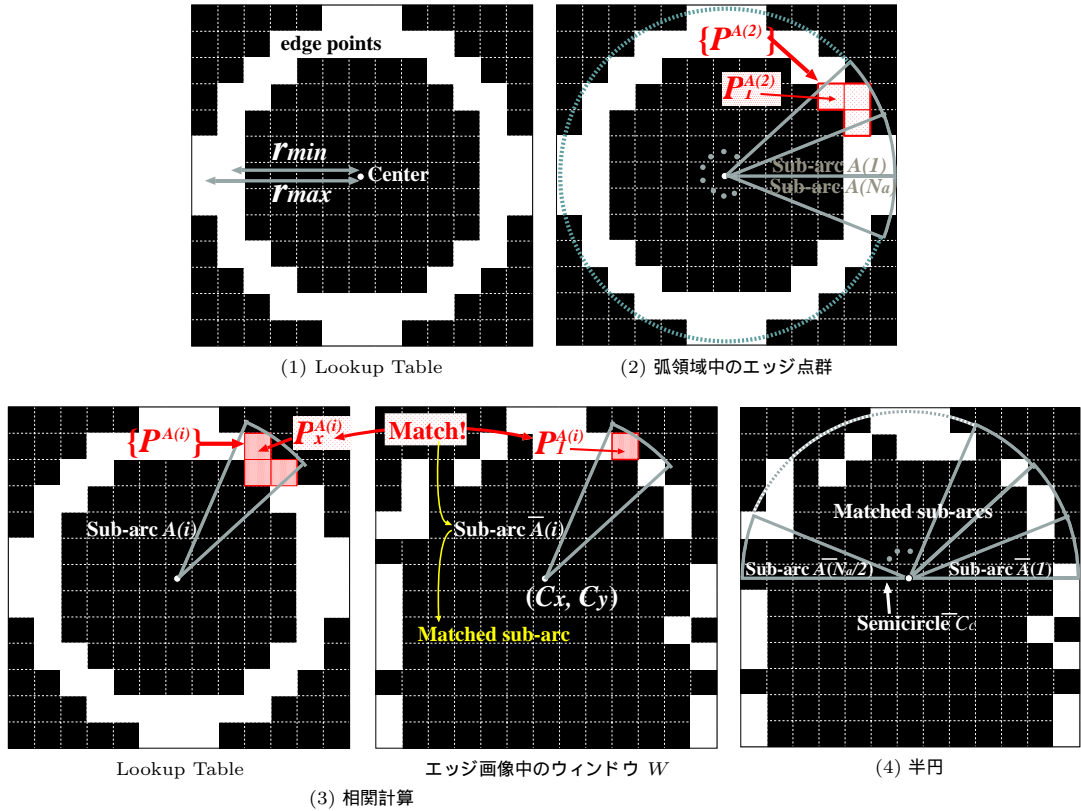


図 7 半円検出に基づく指先検出

Fig. 7 Fingertip detection based on arc detection.

円のみではなく歪んだ半円も許容している。

Step6 入力平面領域中の全領域に対して Step3, 4, 5 を実行し, 指先候補となる半円エッジを検出する。

Step7 検出されたすべての半円エッジに対して円形テンプレートマッチングを適用することにより, 最終的な解を求める。(1) まず元の観測画像から検出半円を中心としたウィンドウ画像  $W$  を得る。(2)  $W$  中, Step3, 4, 5 で得られた半円の中心とその半円を構成する各弧領域の半径に従って半円外の領域を求め, その領域の濃淡値を 0 にする。(3) ウィンドウ画像  $W$  と同じサイズのテンプレート画像を用意する。テンプレート画像中, ウィンドウ画像  $W$  における半円外領域の濃淡値は 0, 半円内領域における濃淡値は手領域に相当する値 (WVT 使用を想定したカメラと指の位置関係において実際に画像を観測して, あらかじめ求められた平均値) とする。(4) 検出されたすべての半円エッジにおいて, ウィンドウ画像  $W$  とテンプレート画像間で正規化相関を計算し, その相関値が最大となる半円を指先と見なし, その中

心を指先座標とする。

この手法では, 指先モデルの Lookup Table 中で指先エッジに幅を与えることにより, 探索する半円に対して歪みや半径の変化を許容しているため, 上述の問題 1, 2 に対処できている。また, Step5 において半円から分割された各弧領域単位でエッジ点の有無を評価しているため, 問題 3 も解決されている。よって, 観測された赤外線反射画像中からユーザの指先点を正確に検出することが可能となる。

### 3.3 入力・非入力の判定法

先に述べたように, 本システムでは, 赤外線反射画像の濃淡値が表現する擬似的な距離情報に基づいて指先の接触・非接触, すなわち入力・非入力の判定を行う。

赤外線反射画像の濃淡値は, カメラから観測物体までの距離だけでなく, 観測物体の反射特性や表面の法線方向によっても大きく変化する。よって, 入力平面の材質や位置・姿勢, 同じく入力を行う手の位置・姿勢に関する制約や事前知識なしで, 正確な距離情報を得ることは不可能である。そこで本システムでは, 実際に入力平面として利用する物体を手を持ち, その平

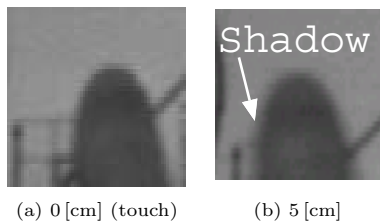


図 8 指先周辺画像

Fig. 8 Image of a fingertip.

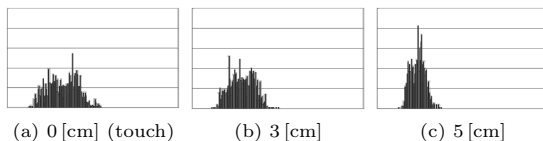


図 9 微分画像中の指先周辺における濃淡値の微分ヒストグラム  
Fig. 9 Histograms of gray values around a fingertip in a gradient image.

面物体に「指先で触れる」「指先を離す」という状態をカメラで事前に観測しておく。この処理は、2.1 節で述べた登録モードで行われる。こうして事前に獲得された「各状態における観測画像中の濃淡情報の差」に基づいて、接触・非接触の判定を行うことが可能となる。

以下では、登録モードにおいて行われる処理について具体的に述べる。ユーザは、入力平面として利用する物体を決めると、その平面物体を手に持ち、(1) 指先で平面物体上をなぞりながら指を動かす、(2) 指先を平面物体から離して指を動かす、という 2 種類の動作を行う。システムは、これらの様子を観測しながら前述の入力平面検出と指先検出を行い、指先周辺の微分画像を得る。この微分画像は、元の観測画像に対して sobel フィルタを適用することにより得られる。

はじめに、カメラから入力平面までの距離を一定とした場合について考える。この実験中、カメラと入力平面は固定し、カメラの光軸が入力平面とほぼ垂直になるように配置した。また、入力平面の表面には普通紙を貼り付けてある。図 8、図 9 に、実際に観測された指周辺の画像と微分画像のヒストグラムを示す。これらのヒストグラムは、指先を中心とする  $15 \times 15$  [pixel] のウィンドウ画像中、指の輪郭エッジに沿った幅 3 [pixel] の曲線上の画素のみを対象として生成されている。このように指の輪郭エッジ付近のみを評価することにより、入力平面上の模様によって生じるエッジに影響されることなく、指先と入力平面間の距離の変化に応じたヒストグラムの変化を観測でき

る。図 9 (a) は指先と入力平面間の距離が 0 [cm]、すなわち接触状態、図 9 (b), (c) は指先と入力平面間の距離が 3 [cm], 5 [cm]、すなわち非接触状態におけるヒストグラムをそれぞれ表している。(a), (b), (c) ともに、画像中の同じ位置に指先が写る状況で観測を行った際の結果である。図 9 から分かるように、得られたヒストグラム間ではそれらの分散の間に有意差が確認できる。この原因を以下に示す。

原因 1：距離変化による指領域の濃淡値の変化 指とカメラの間の距離が変化すると、赤外線反射画像中の指の濃淡値が増減する。よって、指と入力平面の境界領域における微分画像の値が変化するため、得られるヒストグラムも変化する。具体的には、指と平面間の距離が大きいくほど「カメラから指までの距離」と「カメラから平面までの距離」の差が大きくなり、指領域の濃淡値と平面領域の濃淡値の差（指領域：濃淡値大（明るい）、平面領域：濃淡値小（暗い））が大きくなる。その結果、接触時に指濃淡値が平面濃淡値よりも大きければ、指と平面間の距離が大きくなるほど両者の濃淡値の差が大きくなって微分ヒストグラムにはばらつきが生じ、その分散は大きくなる。逆に、接触時に指濃淡値が平面濃淡値よりも小さければ、指と平面間の距離が大きくなるほど微分ヒストグラムの分散は小さくなる。

このように赤外線反射光の強度によって観測物体までの大まかな距離の推定は、文献 9) で提案されている。しかし、WVT で観測ターゲットとなる人間の指先は曲率の大きな丸みを持っており、また入力動作中にその位置・姿勢は変化するため、同じ距離にある指先表面の反射光の強度であっても大きく変化してしまう。よって、この原理のみによって指先の移動を 1, 2 [cm] 程度の単位で推定することは困難である。

原因 2：入力平面上に映る指の影 入力平面と指の間の距離に応じて、照射赤外光によって入力平面上に映る指の影の濃さが変化する。その結果、入力平面に当たって反射する赤外光の強度が増減し、その程度に応じて指と入力平面の境界領域における微分画像の値が変化する。具体的には、指と平面が接触している際には影は観測されないが、指と平面間の距離が大きくなるにつれて指の輪郭周辺に影が広がる結果（図 8 参照）、指周辺の平面領域の濃淡値が小さくなる。よって、接触時に指濃淡値が平面濃淡値よりも大きければ、指と平面間の距離が大きくなるほど両者の濃淡値の差が大

微分ヒストグラムを特徴量として用いる理由は後述する。

きくなって微分ヒストグラムの分散は大きくなる。逆に、接触時に指濃淡値が平面濃淡値よりも小さければ、指と平面間の距離が大きくなるほど微分ヒストグラムの分散は小さくなる。

このように 3 次元空間中の指の位置に応じた影の変化から指の 3 次元位置を推定する手法は文献 19) でも提案されている。しかしこの手法では、カメラと点光源を環境に固定設置して、観測画像中の指とその影の幾何学的な位置関係から指の 3 次元位置・姿勢を推定しているため以下のような問題を持つ。

- (1) 指と別に、その影の像も検出・追跡しなければならぬ。しかし、文献 19) で提案されているシステムのように固定設置された非常に明るい照明を用いている場合と異なり、WVT で観測される赤外反射画像中において影の輪郭線はぼやけて観測されてしまうため、正確に切り出すことは難しい。
- (2) カメラとの相対的な位置関係が固定された点光源を仮定しているため、その幾何学的な位置関係を事前に求めておく必要があり、また、装置が大規模となるため着用途には向かない。
- (3) 指が入力平面に近接すると、指とその影の像を別々に検出することが困難となる。

特に 3 番目の問題は、指と平面の接触・非接触判定を必要とする WVT にとって致命的である。

これらの原因に起因する画像変化を直接観測しようとする、指先領域の明るさの変化や影領域全体の広がりや濃淡値の変化を観測すればよい。しかし、1) 指先領域の明るさの変化は指先表面の法線方向に強く依存しているため、正確な距離情報の推定に向いておらず、2) また影領域は輪郭がぼやけているだけでなく入力平面の模様に影響されるため、正確に影領域全体のみの濃淡値の変化を評価することは難しい。この問題は、図 9 で結果を示したように指の輪郭線上における微分値を計算し、そのヒストグラムの分散を特徴量とすることにより解決できる。すなわち、

- 前処理で正確に検出済の指輪郭線周辺を参照することにより指先領域と影領域を同時に観測可能であり、
- 指輪郭線周辺において微分値を計算することにより、指先領域と影領域を識別することなく両領域における濃淡値の変化を推定可能となる。

また、計算が容易で高速であるということも利点である。

上記 2 つの独立な原因の組合せによって指と指周辺の平面領域の濃淡値が変化し、その結果として微分ヒストグラムが決まる。両原因ともに、指と平面間の距離の大小と微分ヒストグラム分散の増減の関係は等しいため、最終的な微分ヒストグラムの変化は以下のようにまとめられる。

接触時に指濃淡値が平面濃淡値よりも大きい場合 指と平面間の距離が大きくなるほど微分ヒストグラムの分散は大きくなる。すなわち、( 接触状態の分散 ) < ( 非接触状態の分散 ) である。

接触時に指濃淡値が平面濃淡値よりも小さい場合 指と平面間の距離が大きくなるほど微分ヒストグラムの分散は小さくなる。すなわち、( 接触状態の分散 ) > ( 非接触状態の分散 ) である。

図 8 を見ると、接触時において指濃淡値のほうが平面濃淡値よりも小さいことが確認できる。また、図 9 のグラフを見ると、指先接触状態から指先・入力平面間の距離が大きくなるにつれ、微分ヒストグラムの形状が細長くなっている。したがって、上述の特性どおりのヒストグラム変化が観測されていることが確認できる。

このように接触時における指濃淡値と平面濃淡値の大小に応じて場合分けしなければならない理由、すなわち、接触時における指濃淡値と平面濃淡値の大小が一意に決まらない理由は、指と平面表面の赤外線反射特性の差である。実際に、いくつかの材質( 黒い紙、薄い紙、光沢のある厚紙、木材 ) の平面物体で実験を行ったところ、黒い紙と薄い普通紙で ( 接触状態の分散 ) < ( 非接触状態の分散 ) となり、それ以外では ( 接触状態の分散 ) > ( 非接触状態の分散 ) となった。また、黒い紙以外では、各材質における反射赤外光の強度にあわせてカメラの絞りを調節することにより、接触・非接触時における分散ヒストグラムに有意差が現れることも確認した。黒い紙の使用時には、平面表面の影による観測濃淡値の変化がまったく現れなかったため、分散ヒストグラムにもほとんど変化が現れなかった。すなわち、前述の微分ヒストグラム変化の原因のうち「入力平面上に映る指の影」に比べて「距離変化による指領域の濃淡値の変化」の影響は非常に小さなものであることが分かる。また、入力平面として利用する物体として極端に赤外光を吸収する物体は使用困難であるということがいえる。

本システムでは、微分ヒストグラムの特徴量を分散によって表現し、その大小によって接触・非接触を判定する。よって、カメラから入力平面までの距離が一定、すなわち入力平面の濃度が均一な場合、登録モー



ドにおいて接触状態と非接触状態での分散の値をそれぞれ取得し、それらの大小関係に応じて、入力モードでは以下のルールに従って接触・非接触の判定を行うことができる。

(接触状態の分散) < (非接触状態の分散) の場合 接触状態の分散を閾値と見なし、観測分散値がその値より小さければ接触状態と判定する。

(接触状態の分散)  $\geq$  (非接触状態の分散) の場合 接触状態の分散を閾値と見なし、観測分散値がその値以上であれば接触状態と判定する。

したがって図 9 の例の場合、微分ヒストグラムの分散が閾値 (図 9 (a) のヒストグラムの分散値) よりも大きければ接触、小さければ非接触と判定できる。

しかし、実際に WVT システムを使用する場合、頭の動きや入力平面を持っている手の動きに応じて、観測画像中の入力平面領域やその濃淡値はつねに変化する。よって、カメラと入力平面との距離が固定されていない場合について対処する必要がある。先に結果を示したカメラ・入力平面固定の場合では、入力平面領域の濃淡値が固定であったため処理が簡単化できた。しかし、カメラと入力平面の相対的な位置・姿勢が変化する場合、接触・非接触状態を固定の閾値のみで判定することは不可能である。

しかし、先に述べたように、接触・非接触時の微分ヒストグラムの大小は、平面物体表面の赤外光反射特性によって決まる。よって、入力平面の位置・姿勢を変化させて平面の濃淡値が変化しても、接触・非接触時の微分ヒストグラムの大小は一意に定まる。ただし、各平面濃淡値ごとに接触時、ならびに非接触時の微分ヒストグラムの分散はそれぞれ変化するため、それらの境界値 (閾値) は指先周辺の入力平面領域の濃淡値に応じて適応的に決定する必要がある。

そこで、指先を中心とした  $15 \times 15$  [pixel] のウィンドウ画像内における入力平面領域の濃淡値を参照して、閾値を動的に変化させる。まず接触状態において、指先エッジ周辺の微分ヒストグラムの分散と入力平面の平均濃淡値の関係を調べた。実験に使用した平面物体は、先の実験で用いた普通紙である。実験結果を図 10 に示す。図中の各点は、カメラと入力平面間の相対的な位置・姿勢を変化させながら、入力平面上で移動している指先を観測した際の分散 (縦軸) と濃淡値 (横軸) の関係を表している。また、同様の条件で指先非接触状態のデータを撮影すると、そのヒストグラム分散は接触状態時における値よりも小さい値が得られることが確認できた。そこで図 10 のグラフ中、横軸の各濃淡値において観測された分散の中からそれぞれ

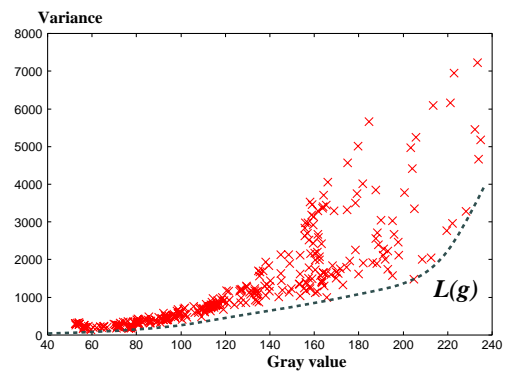


図 10 観測画像中の入力平面領域の濃淡値に応じた閾値決定のための曲線  $L(g)$

Fig. 10 Variable threshold  $L(g)$  which are determined depending on the gray value of the observed input plane.

最小の値を選び、その点群を結んで得られる曲線を  $L(g)$  で近似する。この曲線  $L(g)$  は、登録モードであらかじめ決定しておく。その結果、WVT システムが入力モードで動作している際、検出された指先周辺において計算されたヒストグラム分散が曲線  $L(g)$  よりも小さい場合に指先は非接触状態にあり、曲線  $L(g)$  よりも大きい場合に指先は接触状態にあると判定することが可能となる。

### 3.4 入力コンテンツの追従重畳表示

本システムでは、必要に応じて指先で入力したコンテンツ (指先の軌跡) 画像は HMD 上に重畳表示される。カメラを頭部に着用し、入力平面を手に持っているため、観測画像中の入力平面領域はつねに動いてしまう。そのため、観測画像中における入力平面の動きに合わせて、ユーザが入力した軌跡の形状を変化させながら重畳表示させなければ、連続的に入力を行っているユーザに対して違和感を与えてしまう。

重畳表示する軌跡の形状を正確に求めるためには、毎観測時に入力平面の 3 次元位置を推定し、透視投影変換に基づいて軌跡の記録・再投影を行う必要がある。本システムは単一のカメラから構成されているが、観測された時系列画像集合から観測物体の 3 次元形状を復元する手法を利用することにより、入力平面の正確な形状を得ることも可能である (文献 20) などを参照)。しかし、このような 3 次元形状復元は、観測画像中のノイズに大きく影響を受け、計算コストも大きいというデメリットがあり、赤外線反射画像の特性を用いた簡易な画像処理による対象検出や距離情報獲得

指先非接触状態におけるヒストグラム分散が接触状態時における値よりも大きい場合、最大の値を選ぶ。

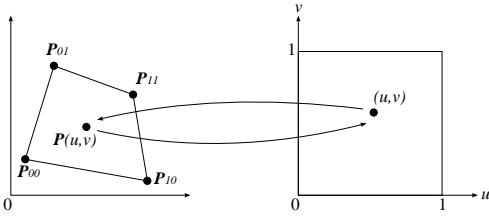


図 11 入力点の記録と再投影

Fig. 11 Record and reprojection of an input point.

という本システムのメリットが損なわれてしまう。また、本システムのように「ユーザに対して直感的かつ違和感のない入力」を目的とするのであれば、正確な投影画像と多少異なった重畳表示が行われても問題にはならない。

そこで本システムでは、複雑で処理に時間のかかる透視投影変換は行わず、以下の式を用いた軌跡の記録と再投影を行う。

$$P(u, v) = (1 - v)((1 - u)P_{00} + uP_{10}) + v((1 - u)P_{01} + uP_{11}) \quad (1)$$

式 (1) は、 $0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$  を満たす点  $(u, v)$  によって定義される正方形領域  $S$  中の点を、 $(P_{00}, P_{01}, P_{10}, P_{11})$  を頂点とする四角形  $P$  中の点  $P(u, v)$  へ変換する式である。例を図 11 に示す。

実際には、コンテンツ入力画像用の正方パツファ(正方形領域  $S$  に対応)を用意し、指先の接触が検出されるたびに、式 (1) の逆変換により接触した指先点をパツファに書き込んで保存する。パツファへの投影時の  $(P_{00}, P_{01}, P_{10}, P_{11})$  はそれぞれ、観測画像中における入力平面の 4 頂点(四角形  $P$  に対応)の座標である。こうしてパツファ上に記録される入力軌跡は、新しい画像が撮影されるたびに、式 (1) の変換により、その画像中の入力平面に重畳表示される。

4. 実験と評価

本論文で提案したシステムを実装し、(1)ユーザの両手による遮蔽に対してロバストに平面検出が可能、(2)入力・非入力の判定が可能、(3)高い位置精度で指先入力が可能、(4)入力平面移動に追従して入力軌跡を違和感なく重畳表示可能、(5)実際に文字認識可能な精度で文字入力可能、であることを示すための実験を行った。

すべての実験で、あらかじめ図形(と×)を描いてある平面物体(A4サイズの発泡スチロールに模様が印刷された普通紙を貼り付けたもの)を入力平面として利用した(図 12)。実験(2)、(3)では、被験者は描画された図形をなぞる。実験(4)は、同じ平面

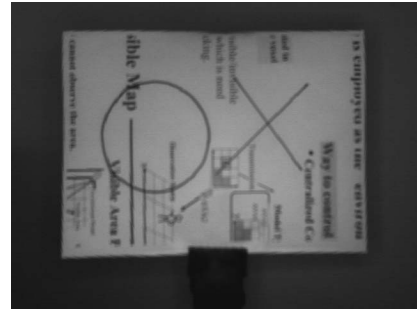


図 12 入力平面物体

Fig. 12 Plane object used as an input plane.

物体を垂直に立てた状態で入力面上に描かれている図形を入力軌跡として表示し、その後、入力平面を傾けることによってどれだけ重畳表示される図形と入力平面上に描かれている実際の図形のずれが生じるかを測定する。

本実験で使用した機器は、PC(PentiumIV, 2.4GHz)、赤外線照射カメラ(Sony製白黒CCDカメラ(XC-EI50)、赤外線透過フィルタ、赤外線発光ダイオード24個から構成される)である。画像は、解像度  $640 \times 480$  [pixel] の256階調濃淡画像であり、毎秒約16フレームの速度で画像撮影と各種処理を繰り返すことができた。

4.1 平面検出のロバスト性

提案手法では4辺の交点から4頂点を求めているため、頂点自身が画像中に観測されていなくてもその座標を求めることができるが、4辺はすべて画像中に観測されている必要がある。図5の例では、入力を行う手のみが観測されており、平面を持つ手が観測されていないため、比較的辺の検出が容易である。しかし、観測画像の枠内に4辺すべてが収まっていても、両手の位置によっては辺の大部分が遮蔽されて4辺すべての検出が難しくなる可能性がある。そこで、入力平面中の1辺をユーザの両手で遮蔽させ、遮蔽の割合に応じた辺の検出成功率の変化を調べた。

本実験では、4辺すべてが観測画像枠内に収まっている状況下で、最も遮蔽が起りやすい入力平面の底辺の平均検出成功率を調べた。また実験中、平面を持つ手による遮蔽が大きくなるように平面の隅を片手で持ち、もう一方の手を入力動作をイメージしながら自由に移動させた。実験結果を図13に示す。横軸が底辺の遮蔽率、縦軸が平均検出成功率を表している。この結果を見ると、遮蔽率が60%を超えると検出成功率が大きく低下していることが分かるが、実験中に遮蔽率が60%を超えた瞬間は全観測時間の約5%と小さい割合であった。したがって、実際の入力動作中に

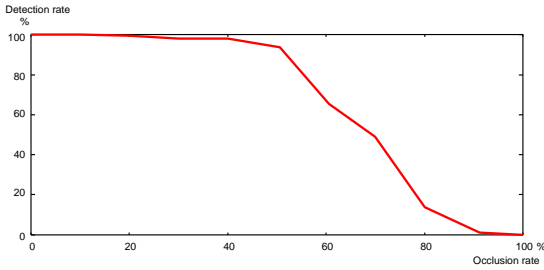


図 13 入力平面の辺の検出成功率

Fig. 13 Success rate of side detection.

表 1 true positive と false positive fraction の説明  
Table 1 True positive and false positive fractions.

true positive fraction (ROC 曲線の縦軸)	指先が入力平面に接触したとき、システムが接触したと判断した確率
false positive fraction (ROC 曲線の横軸)	指先が入力平面に接触していないとき、システムが接触したと判断した確率

遮蔽率が大きくなり、さらに辺検出が失敗する確率は非常に低い(全観測画像 980 枚中、辺検出失敗画像は 23 枚)ということが確認できた。

4.2 入力・非入力の判定精度

入力・非入力の判定精度を、ユーザが行う接触・非接触動作に対するシステムの判定成功率によって評価する。実験は以下の 2 種類の条件で行った。

- (1) カメラの光軸に対して平面物体を垂直に立てる。
  - (2) カメラの光軸に対して平面物体の姿勢を傾ける。
- また、システムに関する知識を持たない被験者 5 人がそれぞれ 5 回ずつ操作した結果をまとめて評価を行った。

先に述べたように、被験者は図 12 に示した入力平面物体上に描かれている図形(と×)の線上のみを指でなぞる。よって、判定の評価に際して、図形上の点は指先が接触しているべき点、それ以外の点は接触しているべきでない点と仮定できる。本実験では、接触判定した指先点から最も近い図形上の点までの距離を求め、その距離が 5 [pixel] 未満なら接触しているべき点、5 [pixel] 以上なら接触しているべきでない点と見なした。すなわち、システムが接触点と判定した指先点から図形までの最近距離が 5 [pixel] 以上であれば、接触判定に失敗していると思なした。

入力・非入力の判定の評価には、縦軸、横軸にそれぞれ表 1 に示す値をとる ROC (Receiver Operating Characteristic) 曲線を用いた。ROC 曲線では、認識成功率が高く、誤認識率が小さくなるほど、グラフの形状が左上凸になる性質を持つ。実線は、提案手法を用いて閾値を指先周辺領域の濃淡値平均に基づいて動的に変化させた場合の判定結果を示している。破線

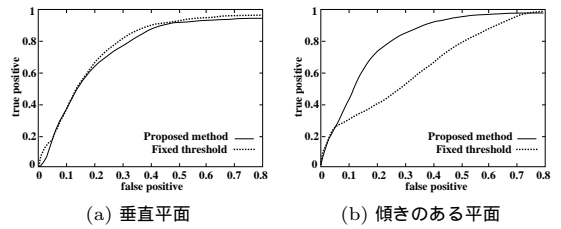


図 14 入力判定精度を評価する ROC 曲線

Fig. 14 ROC curves in two experiments.

は、ある値に固定した場合の結果を示している。

カメラの光軸に垂直になるように入力平面を配置した際の実験結果(図 14(a))を見ると、閾値を固定した場合と動的に変化させる提案手法を用いた場合で、ほぼ同じ曲線を描いている。これは、カメラに対して対象物体を垂直に置いているため、入力平面領域の濃淡値が一樣となり、提案手法においても閾値の値がほとんど変化しないことが原因である。しかし、図 14(b)のグラフを見ると、閾値を動的に変化させる提案手法が優れた結果を示している一方、閾値を変化させない手法では大きな性能の低下が確認できた。以上の結果から、提案手法が、カメラに対して入力平面物体の位置・姿勢が大きく変化するような利用環境においても、より正確な入力・非入力の判定が可能であることが確認できた。

4.3 入力座標の精度

本節の実験では、被験者が入力を意図した座標と実際の入力座標との距離を測定することにより、観測画像中での入力点の精度を評価した。具体的には、前節の実験と同様、被験者は平面物体上に描かれた図形の上を指でなぞるので、検出された入力座標と平面物体上の図形との間の距離を評価した。本実験も、システムに関する知識を持たない被験者 5 人がそれぞれ 5 回ずつ操作した結果をまとめて評価を行っている。

実験は、入力平面をカメラの光軸に対して垂直に置いた場合と斜めに傾けた場合の 2 つの条件で行い、誤差距離を横軸、各誤差に相当する入力点の個数を縦軸としたヒストグラムを作成した。測定結果を図 15 に示す。また、各ヒストグラムの統計量を表 2 に示す。この結果より、誤差が 5 [pixel] 以内の点が約 90%であることを確認した。640 × 480 [pixel] の観測画像中で図 15 に示した程度の大きさで A4 サイズ(29.57 × 21 [cm])の入力平面が観測されている際、5 [pixel] の誤差は約 5 [mm] に相当する。よって、使用時の約 90%という多くの瞬間において、A4 サイズの平面物体に文字を入力する程度には十分な精度が得られていると考える。しかし、表 2 に示したように、垂直平面と傾いた平面

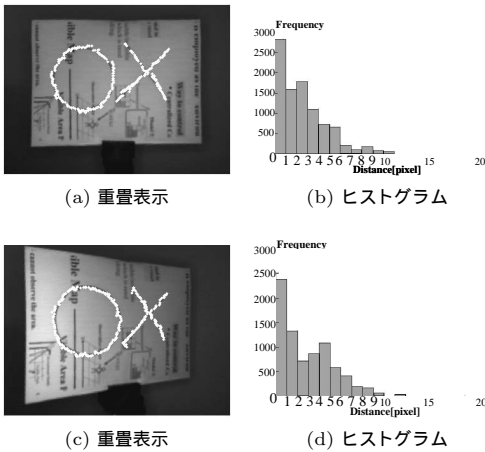


図 15 入力精度 . 上 : カメラの光軸に垂直な平面 , 下 : 傾いた平面  
 Fig. 15 Input accuracy. Upper: Input plane perpendicular to the optical axis of the camera, Lower: Slanted input plane.

表 2 入力誤差  
 Table 2 Input error.

	平均	中央値	分散	最大
垂直に置いたとき	2.5	2.3	4.9	10
斜めに置いたとき	3.0	2.8	5.8	11

への入力時の最大誤差はそれぞれ 10 [pixel], 11 [pixel] となってしまっている . この最大誤差の発生確率は非常に低いが (それぞれ 0.6%, 0.9%), こうした大きな誤差が入力インタフェースとしての有用性・信頼性を大きく低下させてしまうことは否定できない . しかし, こうした大きな誤差のすべては接触・非接触の境界, すなわち入力開始と入力終了の瞬間で生じており, 指先位置の検出誤差ではなく接触・非接触の判定の誤りが大きな誤差を生んでいることが分かる . したがって, 指先位置の推定手法は本論文で提案した手法をそのまま採用したとしても, 接触・非接触の判定精度を向上させることにより入力操作の妨げとなる大きな誤差は生じなくなると考えられる .

4.4 入力平面移動時の重畳表示の追従性

入力平面の位置・姿勢を変化させた際の入力画像 (軌跡) の重畳表示の有効性を検証する .

先の実験でも使用した入力平面を垂直に立てた状態で表面に描かれている図形を検出・重畳表示した後, 入力平面を傾けた際に重畳表示される図形の形状を確認する . 入力平面上に描かれている図形を検出・重畳表示しているので, 入力平面を傾けた際の「重畳表示される図形の形状」と「入力平面上に描かれている実際の図形の形状」を比較することにより, 入力平面の位置・姿勢の変化に対する重畳表示の追従精度を確認

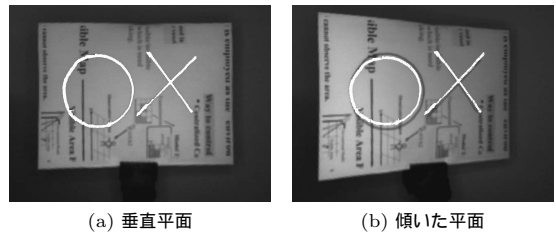


図 16 入力平面の位置・姿勢の変化に対する重畳表示の変化  
 Fig. 16 Superimposition while the input plane moves.

できる . 重畳表示の結果を図 16 に示す . 重畳表示された軌跡の各点から最も近い実際の図形上の点までの距離の平均, 中央値, 分散はそれぞれ 5.2, 4.1, 6.4 であった . ユーザが連続的に入力を行う際の補助のためには, 入力した軌跡の概形と次に描こうとする軌跡の位置関係が分かればよいので, 提案システムでは十分に実用的な精度が得られているということが出来る .

4.5 文字入力と入力文字の認識結果

実際に WVT によって文字入力を行い, その入力結果を一般的な文字認識ソフト (富士通製スキャナ ScanSnap! に付属の OCR ソフトを使用) を用いて文字認識した結果を示す . 実験は以下の条件で行った .

- 書き順に依存しないオフライン文字認識 .
- 入力文字はひらがなとアルファベット .
- 正方バッファに記録された軌跡を  $340 \times 240$  [pixel] (入力平面と同様の縦横比  $1 : \sqrt{2}$ ) に変形した結果を文字認識した (HMD 表示画像中に写っている「入力平面領域の形状にあわせて歪んでいる重畳表示軌跡」を文字認識するのではない) .
- $340 \times 240$  [pixel] の画像中, 各入力点を直径 5 [pixel] の点として表現 .

認識を行った画像を図 17 (ひらがなで「ならけん」), 図 18 (アルファベットで「NARA」) に示す . 両図ともに, (a) が HMD にも表示されているユーザへの提示画面, (b) が . 実際に文字認識を行った正方バッファを縦横比  $1 : \sqrt{2}$  に変形した画像である . これらの画像を文字認識ソフトに入力した結果, とともに正しく認識された .

5. おわりに

絵や手書き文字などの入力やポインティングデバイスとしての機能を実現するために, 任意の点・線軌跡の入力を指による直感的な操作で実現可能なウェアラブル入力インタフェースとしてウェアラブル仮想タブレット (WVT) を提案した . WVT は, ウェアラブルコンピュータを使用するうえで非常に重要な要素である入力インタフェースとして, 頭部に小型 CCD カメ

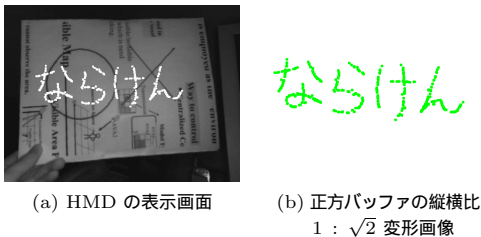


図 17 文字入力：ひらがな  
Fig. 17 Input result: Japanese hiragana.

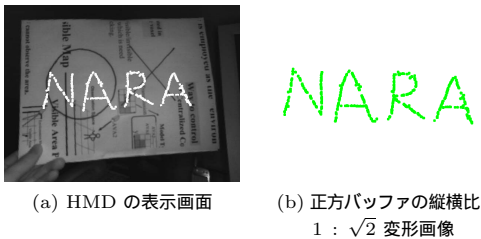


図 18 文字入力：アルファベット  
Fig. 18 Input result: alphabet.

ラと HMD というシンプルな構成で、携帯性に優れ、直感的な操作で入力可能なインタフェースである。

本論文では、表面に模様のある入力平面物体を利用した場合でも WVT に必要な機能を実現するために、

- 入力を行う指先の位置を正確に検出する手法、
  - 指先と平面物体の接触・非接触を判定できる手法、
- を新たに提案した。また、実験により、入力平面の位置・姿勢が変化しながらでも、違和感なく任意の軌跡を描くこと、また、見ることが可能であることを示した。

以下に、今後の課題として、現在のシステムの解決すべき問題点を示す。

**接触・非接触の判定精度の向上** 入力開始と入力終了の瞬間に起こる接触・非接触の判定失敗をなくすことにより、入力精度を大きく向上させることができる。本論文では、各観測結果をヒストグラムの分散によって表現し、その大小によって接触・非接触の判定を行ったが、これをヒストグラム形状の比較を行うなど、より多くの情報に基づいた判定を行うことによって接触・非接触の判定精度向上が期待できる。

**入力平面の位置・姿勢推定手法** 現在のシステムでは、入力平面としたい矩形物体の 4 頂点を求めるために、その 4 辺すべてが観測画像内に収まっていなければならない。しかし、カメラを頭部に着用し、入力平面を手を持っているため、観測画像中から入力平面の一部が外れることもありうる。よって、4 辺がすべて観測画像内に収まっていない場合でも、追従可能である必要がある。

**重畳表示の手法** 本論文では、正確な指先座標の検出と入力・非入力状態の判定の実現に焦点を当てたため、入力済軌跡の重畳表示は実時間性・安定性を重視して単純な手法を採用した。この手法は、ユーザの連続的な入力を補助する目的にとっては十分な精度を提供できるが、より高精度な操作を要求するタスクに対しては、幾何学的に正確な重畳表示が必要となることも考えられる。このような場合には、確実に検出・追跡できる入力平面の頂点座標などを特徴点として、入力平面の 3 次元位置・姿勢を逐次推定する必要がある。

**謝辞** 本研究は、科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 CREST プログラム「高度メディア社会の生活技術」の支援によるものである。

## 参考文献

- 1) 木戸出正継：日常生活を拡張する着用指向情報パートナー，電子情報通信学会 PRMU 研究会技術報告書，PRMU2000-159，pp.93-94 (2001).
- 2) Handkey Corporation:  
<http://www.handykey.com/>
- 3) Fukumoto, M. and Tonomura, Y.: Body Coupled FingerRing: Wireless Wearable Keyboard, *Proc. ACM CHI '97*, pp.147-154 (1997).
- 4) Cheng, L.T., Robinson, J. and Vardy, A.: The Wristcam as Input Device, *Proc. International Symposium on Wearable Computing (ISWC 99)*, pp.199-202 (1999).
- 5) 佐々木博史，黒田知宏，眞鍋佳嗣，千原國宏：『てのひらめにゆう』：ウェアラブルコンピュータ用入力インタフェース，日本バーチャルリアリティ学会誌，Vol.7, No.3, pp.393-401 (2002).
- 6) Starner, T., Auxier, J., Ashbrook, D. and Gandy, M.: The Gesture Pendant: A Self-illuminating, Wearable Infrared Computer Vision System for Home Automation Control and Medical Monitoring, *Proc. International Symposium on Wearable Computers 2000*, pp.87-94 (2000).
- 7) 園田智也，村岡洋一：空中での手書き文字入力システム—ウェアラブルコンピュータ環境での入力インタフェース，インタラクシオン 2001 講演論文集，pp.3-10 (2001).
- 8) 椎尾一郎，山本吉伸：コミュニケーションツールのための簡易型 AR システム，WISS2000 講演論文集，pp.117-124 (2000).
- 9) 沼崎俊一，森下 明，梅木直子，土井美和子：ジェスチャ入力に適した画像入力装置の提案とその 3 次元情報検出性能の検討，情報処理学会論文誌，Vol.41, No.5, pp.1267-1275 (2003).
- 10) Lee, C.M., Schroder, K.E. and Seibel, E.J.: Ef-

- efficient image segmentation of walking hazards using IR illumination in wearable low vision aids, *Proc. International Symposium on Wearable Computers 2002*, pp.127–128 (2002).
- 11) Koshimizu, H. and Numada, M.: On a Basic Consideration of the Warp Model of Hough Transform, *Proc. Machine Vision Application (MVA '92)*, pp.7–9 (1992).
- 12) Tsai, R.Y.: A efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 86)*, pp.364–374 (1986).
- 13) 寺部亮紘, 浮田宗伯, 河野恭之, 木戸出正継: ウェアラブル仮想タブレット—赤外線照射カメラを利用した指先入力インタフェース, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU) 2002 論文集, Vol.2, pp.25–30 (2002).
- 14) Oka, K., Sato, Y. and Koike, H.: Real-time Tracking of Multiple Fingertips and Gesture Recognition for Augmented Desk Interface Systems, *Proc. IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG 2002)*, pp.429–434 (2002).
- 15) Sasaki, H., Kuroda, T., Manabe, Y. and Chihara, K.: Hand-Area Extraction by Sensor Fusion Using Two Cameras for Input Interface of Wearable Computers, *Proc. 12th Scandinavian Conference on Image Analysis*, pp.779–784 (2001).
- 16) 蔵田武志, 興梠正克, 加藤文和, 大隈隆史, 坂上勝彦: ハンドマウスとその応用: 色情報と輪郭情報に基づく手の検出と追跡, 映像情報メディア学会研究会技術報告書, VIS2001-103, Vol.25, No.85, pp.47–52 (2001).
- 17) Guil, N. and Zapata, E.L.: Lower order circle and ellipse Hough Transform, *Pattern Recognition*, Vol.30, No.10, pp.1729–1744 (1997).
- 18) Rosin, P. and West, G.: Segmentation of Edges into Lines and Arcs, *Image and Vision Computing*, Vol.7, No.2, pp.109–114 (1989).
- 19) Kumar, S. and Segen, J.: Shadow Gestures: 3D Hand Pose Estimation using a Single Camera, *Proc. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR99)*, pp.479–485 (1999).

- 20) Tomasi, C. and Kanade, T.: Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method, *International Journal of Computer Vision*, Vol.9, No.2, pp.137–154 (1992).

(平成 15 年 5 月 30 日受付)

(平成 15 年 12 月 2 日採録)



浮田 宗伯 (正会員)

2001 年京都大学大学院博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2002 年より科学技術振興機構さきがけ研究 21 (「情報基盤と利用環境」領域) 研究員兼任。コンピュータビジョン, 分散協調視覚に関する研究に従事。1999 年電子情報通信学会論文賞。



寺部 亮紘

2000 年東京理科大学理学部卒業。2002 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士課程修了。現在, (株) 東芝テック勤務。在学中, 視覚情報に基づいた着用型インタフェースの研究に従事。



木戸出正継 (フェロー)

1970 年京都大学大学院工学研究科修士課程修了。同年東京芝浦電気 (現, 東芝) 総合研究所入社。同社総合企画部, 関西研究所, 東芝アメリカ社を経て, 2000 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。京都大学工学博士。パターン認識, ロボットビジョン, ヒューマンインタフェース, ウェアラブルコンピュータに関する研究に従事。IAPR (国際パターン認識協会) フェロー, 電子情報通信学会業績賞, 高柳記念奨励賞等を受賞。情報処理学会関西支部長, 電子情報通信学会理事, MVA 国際ワークショップ組織委員長等を歴任。