

指先の単眼カメラ画像を用いた3次元マウスの構成

中山 弘伸, 阪本 邦夫

島根大学総合理工学部 数理・情報システム学科

A 3-D Pointing Device Using a Single Camera Image of Fingertip

Hironobu NAKAYAMA and Kunio SAKAMOTO

*Department of Mathematics and Computer Science,
Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University*

Abstract

A 3-D mouse system is described that can specify the position and movement of the fingertip in a 3-D space. When mouse-moved event occurs to control the 2-D object on the screen and the 3-D object within the display, a touch panel on the screen can detect the movement of the fingertip. On the other hand, it is necessary to track the fingertip in a space for interaction to the 3-D floating object as the touching image appears out in front of the display, serving as a virtual touch panel in the air. A 3-D position is generally detected and measured using a stereo viewing. A series of two or more stereo images allows us to obtain the 3-D information about the object. However it is possible to estimate the position of fingertip using a single image without stereo images. This paper proposes the measuring method of the position of fingertip using a single camera image. This measuring system can provide 3-D information to control 3-D virtual objects. The system finds out the tip point and width of finger on the image, and approximately calculates the 3-D position of fingertip.

1. ま え が き

近年, バーチャルリアリティ (仮想現実感) の研究が盛んになり, 医療, 教育, CAD/CAM など様々な分野へ, 3次元画像技術が応用されるようになってきた^{1)~3)}. 筆者らも立体映像を用いた3Dワークスペースシステムの構築を目指し, 立体映像表示装置^{4)~8)}や映像とのインタラクション⁹⁾¹⁰⁾について研究を行っている. テレビモニタの映像に対して, 「人差し指」の指先の動きにシステムが応答するようなインタラクションの実現には, モニタ画面の表面にセンサを取り付けて操作者の指先の動きをセンシングする. しかし, モニタ画面から飛び出すように表示された立体映像に対しては, 操作者から見た立体映像と操作位置の関係が不自然にならないように, モニタ画面より手前の位置で指先の動きをセンシングする必要がある.

仮想的に作られた広い空間の中で物を掴んだり動かしたりする場合には, 3次元的なジェスチャを高い精度で認識することが求められ, 手全体の形状をモデルとしてあらかじめ用意しておくなど, 手の動きを認識するために複雑な処理が必要となる¹¹⁾. これに対し, 立体テレビモニタ装置などにより比較的小さな空間に提示された

立体映像へのインタラクションを実現するような場合には, 表示された物体を直接掴んだりする操作ではなく, 物体の移動や回転の方向を指示したり, 3次元空間に表示されたマウスポインタの操作を行うことが多いため, 3次元的な動き (変位と方向) を指示するための3次元ポインティングデバイスが有用であることが多く, 指先の「位置」のみの計測であれば, 手の「形状」認識のように複雑な処理を必要としないため, リアルタイムなインタラクションを容易に実現することができる.

立体テレビモニタ装置により提示された立体映像に対して「指先」の動きにより, システムが何らかの応答を行うようなインタラクションシステムを構築するためには, 操作者の指先の位置を検出しなければならない. このような人間の動作のセンシングを行う技術には, 磁気式のセンサなどを用いるセンサ装着型の方式や, ビデオカメラの映像から3次元動作の計測を行う非装着型の方法が提案されている. 立体映像技術を用いて没入感や臨場感を伴った立体映像の提示を行い, これらの映像に対して操作者がより自然に操作指示を行うことができる環境を整えるには, センシングシステムは非装着型とすることが望ましいといえる.

非装着型のセンシング方式である3次元画像計測法に

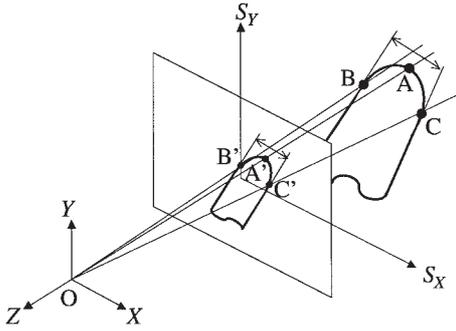


図 1 指先位置の計測

は、2台以上のカメラを用いた受動型のステレオ画像計測、受動型のステレオ法に用いられるカメラ1台を光を発するプロジェクタに置き換えたアクティブステレオ法などが提案されている¹²⁾。このように、任意の点の3次元位置情報を得るには、2台以上のカメラが必要となる場合が一般的であり、ステレオカメラを用いた指先の3次元位置計測の方法が提案されている¹³⁾。しかし、指先のように関節などの特徴部位の情報を利用すれば、1台のカメラ画像から3次元位置情報を得ることが可能であり、先に筆者らは指の先端部および関節位置にカラーマーカを装着することにより、直線上に並んだ3つのマーカのカメラ画像から、各マーカ位置の3次元座標および指の方向（傾き）が検出可能であることを示した⁹⁾。

本稿では、さらに簡易な指先の3次元位置計測法について提案する。「指先」を用いて3次元マウスを構成するのであれば、指の先端部の座標のみ計測できれば十分であるため、カメラ画像上での指の先端部の座標と指の太さ（幅）の情報のみを用いて、指先の3次元位置を計測することが可能であることを示す。指先の移動（変位と方向）を検出することにより、3次元的なマウスポイントの操作を行える入力デバイスを構成することができ、空間に飛び出した立体映像などに対してインタラクションを実現するための3次元マウスを提案する。

2. 指先位置の3次元空間座標計測

2.1 指先の3次元位置計測

「指先」を利用して3次元マウスなどのポインティングデバイスを構成するためには、指先位置の3次元空間座標を求めなければならない。3次元マウスを構成する場合に必要な座標情報は、3次元空間での指先の座標位置情報のみであるため、既知の指先の太さ（幅）の情報を利用することにより、1台のカメラ画像から指先の3次元位置を計測でき、画像上の計測点から実空間での3次元座標の情報を得る関係式を導出することができる。

図1は、ピンホールカメラを用いて指先を撮影した場合について、実空間に存在する指先とカメラの撮像面に映った映像を模式的に図示したものである。図1において、ピンホールカメラの焦点位置を原点Oとする絶対座

標系を考え、右手系でX-Y-Z軸をとる。さらに、カメラ画像上の画素位置を表すスクリーン座標系を考え、これを S_X - S_Y 座標系とする。また、指先の先端部分を半球形状と考え、指先の位置を点A、指先の直径部分の両端をそれぞれ点B、点Cとし、これら各点に対応するカメラ画像の点をそれぞれ A' 、 B' 、 C' とする。このとき指の太さ（BC間の距離）を R とすると、半径 $R/2$ の球は直線OA、OB、OCと、それぞれ点A、B、Cで接しているため、

$$|\overline{BC}| = R \quad (1)$$

$$|\overline{AB}| = |\overline{AC}| = R/\sqrt{2} \quad (2)$$

が常に成立し、次節で述べるように式(1)、(2)を満たす指先の3次元位置は一意に決定される。

2.2 カメラ画像による指先位置の計測

ピンホールカメラの焦点距離（焦点と撮像面間の距離）を $f(>0)$ 、点 A' 、 B' 、 C' のスクリーン座標をそれぞれ、 (x_A, y_A) 、 (x_B, y_B) 、 (x_C, y_C) とすると、点 A' 、 B' 、 C' の絶対座標はそれぞれ、 $(x_A, y_A, -f)$ 、 $(x_B, y_B, -f)$ 、 $(x_C, y_C, -f)$ となる。

$\overline{OA} = t_A \overline{OA'}$ 、 $\overline{OB} = t_B \overline{OB'}$ 、 $\overline{OC} = t_C \overline{OC'}$ (t_A 、 t_B 、 t_C は変数)とすると、点A、B、Cの絶対座標はそれぞれ、 $(t_A x_A, t_A y_A, -t_A f)$ 、 $(t_B x_B, t_B y_B, -t_B f)$ 、 $(t_C x_C, t_C y_C, -t_C f)$ と表せる。式(2)が成立するため、 $|\overline{AB}| = R/\sqrt{2}$ より、 t_B についての2次方程式

$$(x_B^2 + y_B^2 + f^2)t_B^2 - 2(x_A x_B + y_A y_B + f^2)t_A t_B + (x_A^2 + y_A^2 + f^2)t_A^2 - \frac{R^2}{2} = 0$$

を得る。この2次方程式の解 t_B を得ることにより、点Bの絶対座標を求めることができる。ここで、

$$\alpha = x_B^2 + y_B^2 + f^2$$

$$\beta = (x_A x_B + y_A y_B + f^2)t_A$$

$$\gamma = (x_A^2 + y_A^2 + f^2)t_A^2 - \frac{R^2}{2}$$

とおくと、2次方程式 $\alpha t_B^2 - 2\beta t_B + \gamma = 0$ の一般解は、

$$t_B = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \alpha\gamma}}{\alpha}$$

として求められる。点Bが直線OBと球との接点であることを考慮すると、解 t_B は重解、すなわち、

$$t_B = \frac{\beta}{\alpha} = B t_A \quad \text{ただし、} \quad B = \frac{x_A x_B + y_A y_B + f^2}{x_B^2 + y_B^2 + f^2}$$

と求まる。直線OCと球との交点Cについても同様にして、

$$t_C = \Gamma t_A \quad \text{ただし、} \quad \Gamma = \frac{x_A x_C + y_A y_C + f^2}{x_C^2 + y_C^2 + f^2}$$

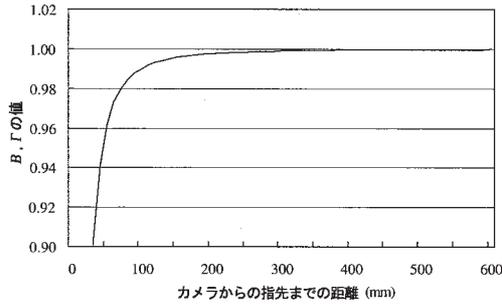


図2 B, Γ の値

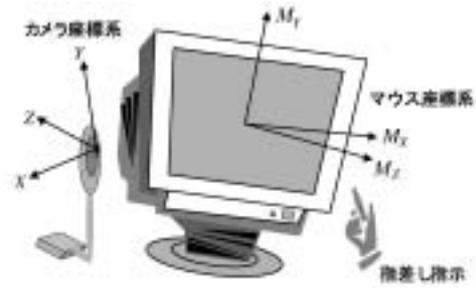


図3 マウス座標系 M_X - M_Y - M_Z

を得る. 式 (1) より, $|\overline{BC}| = R$ ゆえ,

$$t_A^2 \{ (\Gamma x_C - Bx_B)^2 + (\Gamma y_C - By_B)^2 + f^2 (\Gamma - B)^2 \} = R^2$$

が得られ, 点 A の Z 座標は常に負であることより,

$$t_A = \frac{R}{\sqrt{(\Gamma x_C - Bx_B)^2 + (\Gamma y_C - By_B)^2 + f^2 (\Gamma - B)^2}} \quad (3)$$

を得る. 以上のようにして, t_A, t_B, t_C の値が求まることにより, カメラ画像上の点 A', B', C' のスクリーン座標を用いて, 点 A, 点 B, 点 C の絶対座標が一意に求まる.

ここで, 係数 B および Γ について考える. 図 2 は, 指の太さ (BC 間の距離) R を 20mm と仮定して, カメラから指先 (点 A) までの距離と B, Γ の値の関係を示したものである. 図 2 に示すように, 指先がカメラから離れた位置では, $B \approx \Gamma \approx 1$ と近似できる. このとき $t_A \approx t_B \approx t_C$ となり,

$$t_A \approx \frac{R}{\sqrt{(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2}} = \frac{|\overline{BC}|}{|\overline{B'C'}|} \quad (4)$$

を得る. このように指先がカメラから離れた位置にある場合には, 直線 OA' 上の点である指先 (点 A) の位置は, カメラ画像の点 A' の座標と, 既知である指の太さ (BC 間の距離) R とカメラ画像上での指の太さ (B'C' 間の距離) との比を用いて, 近似的に求めることができる.

計測に使用するカメラの解像度および測定対象の物体 (指先) までの距離を考慮して, 式 (3) あるいは近似式 (4) を用いて点 A の座標を得る. 次節以降では, 指先までの距離が 250mm 以上離れており低解像度の USB カメラを使用して計測を行うことを想定し, 近似式 (4) を用いて指先の座標を近似的に求めることとする.

2.3 マウス座標系

「指先」を利用した 3 次元マウスなどのポインティングデバイスを構成するためには, マウスポインタの縦, 横方向および前後方向への移動に対応する「指先」の動き (変位) を検出しなければならない. 図 3 に示すように, 縦, 横方向および前後方向に, それぞれ M_X, M_Y, M_Z 軸を設定し, これをマウス座標系とする. 指先の動きを撮影するカメラやテレビモニタの設置場所や方向は

任意であるため, カメラ座標系とマウス座標系は一般に異なり, 計測を実施する前にキャリブレーションを行い, カメラ座標系とマウス座標系との相対関係を求めておく必要がある. このキャリブレーションの作業は一般に複雑な処理を必要とし, モニタ画面 (表示面) を基準として「指先」の位置を決定する必要がある場合には厳密に行わなければならない. しかし, マウスポインタの操作においては, 現在コンピュータに使用されているマウスと同様に, 3 次元マウスにおいてもモニタ画面のマウスポインタと指先の移動方向は一致している必要は無く, マウスポインタの移動に対応する指先の移動方向および移動量 (変位) を検出できれば十分である.

操作者が初期設定の際に決定したマウスポインタの縦, 横方向および前後方向の移動に対応する指先の移動方向を, それぞれ M_X, M_Y, M_Z 軸とし, 各軸の方向ベクトルを $\overline{m_X}, \overline{m_Y}, \overline{m_Z}$ (長さ 1 の単位ベクトル) とする. 指先の移動を変位ベクトル \overline{DE} と表記すると, マウスポインタの縦, 横および前後方向の移動量 X_M, Y_M, Z_M は,

$$X_M = k \overline{DE} \cdot \overline{m_X}, \quad Y_M = k \overline{DE} \cdot \overline{m_Y}, \\ Z_M = k \overline{DE} \cdot \overline{m_Z}$$

(ただし, スケールファクタ k は定数) として求められる.

指先の移動の始点 D および終点 E に対応するカメラ画像上の点を, それぞれ D', E' とし, カメラ画像上での指の幅を W_D, W_E とする. 図 1 と同様にカメラの焦点位置を原点 O とすると,

$$\overline{OD} = \frac{R}{W_D} \overline{OD'}, \quad \overline{OE} = \frac{R}{W_E} \overline{OE'}$$

の関係が成り立ち, マウスポインタの移動量は,

$$X_M = M \left(\frac{1}{W_E} \overline{OE'} - \frac{1}{W_D} \overline{OD'} \right) \cdot \overline{m_X}, \\ Y_M = M \left(\frac{1}{W_E} \overline{OE'} - \frac{1}{W_D} \overline{OD'} \right) \cdot \overline{m_Y}, \\ Z_M = M \left(\frac{1}{W_E} \overline{OE'} - \frac{1}{W_D} \overline{OD'} \right) \cdot \overline{m_Z}$$

(ただし, $M = k \cdot R$) と求まる. ここで, 定数 M はマウスの感度調節を行う値とする. このように, 操作者が

M_X , M_Y , M_Z 軸の方向を初期設定の際に決定すれば, 「指先」の移動方向および移動量(変位)に応じて, マウスポインタの縦, 横, 前後方向への変位量を求めることができる。

3. 画像計測と3次元マウスの構成

カメラ画像から指先部分の抽出を行うことで, 指先の動きを利用した入力デバイスを構築することができる。画像から特定の物体の位置検出などを行う場合には, テンプレートマッチングによるパターン認識を用いることが多く, 円形テンプレートを利用した指先抽出の例¹⁴⁾などが報告されている。また手指の形状に着目し, モルフォロジー演算(膨張・収縮)により指先部分の抽出を行う方法¹⁵⁾など様々な画像処理の手法が提案されている。しかし, 指先の動き検出においては5本の指を区別して認識する必要はなく, 操作者の手の形状も「指差し」状態に限定しており, 人差し指のみ検出できればよいため, 六本木らの提案した線分長さの累積度を用いた抽出方法¹⁶⁾により人差し指の検出を行う方法を採用し, 腕の部分を含んだ肌色抽出画像から指先部分の抽出を行う。

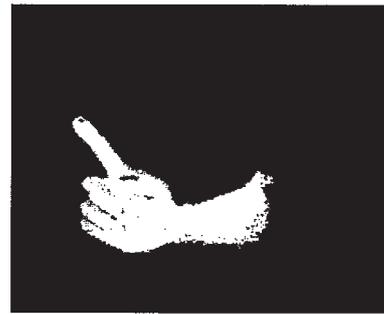
3.1 カメラ画像からの指先抽出

1台のカメラ画像から指先の3次元位置計測を行うためには, カメラ画像上での指先の位置と指の幅(太さ)を検出しなければならない。カメラ画像上で指先を検出するには, まず肌色抽出を行い, 指, 手, 腕を含んだ領域の抽出を行う。肌色抽出は画像からヒトの肌色領域のみを抜き出す処理であるが, 色の濃度値による閾値処理のため, 手腕以外に背景などに含まれる肌色部分も抽出され, ノイズとなる。そこで, 肌色抽出部分と非抽出部分で2値化した画像において, 画像中のつながっている画素(連結成分)に, それぞれ固有の番号付け(ラベリング)を行い, 連結成分の最大面積(画素数)の領域を抜き出すことにより, 肌色抽出画像から手腕部分のみを抜き出す。図4(b)の画像は, 肌色抽出およびラベリング処理により, (a)のフレーム画像から手腕部分のみ抽出した結果である。

次に, 画素線分の累積度を用いた抽出方法を利用し, この手腕抽出画像から指先部分のみを抽出する処理を行う。図5に示すように, 手腕抽出後の2値化画像を横方向(S_X 軸), 縦方向(S_Y 軸)にそれぞれ走査し, 各軸方向別に連結する画素数(線分長さ)を測定し, 得られた線分長さの値の累積度数を算出する。図6は線分長さの累積度数分布を示したものであり, 度数分布のグラフ(ヒストグラム)上で指領域の線分長さに一致する部分で山を形成するため, 図6の結果より, 指領域に該当する線分長さで閾値を設け, 線分長さに一致する部分のみ手腕抽出画像から抽出する。図7(a)は, 線分長さの閾値により指先部分を抽出した結果であるが, 人差し指以外の領域にも指線分長さの線分が存在するため, これらの



(a) フレーム画像



(b) 手腕抽出画像

図4 肌色抽出による手腕部分の抽出



図5 ライン走査による線分長さの測定

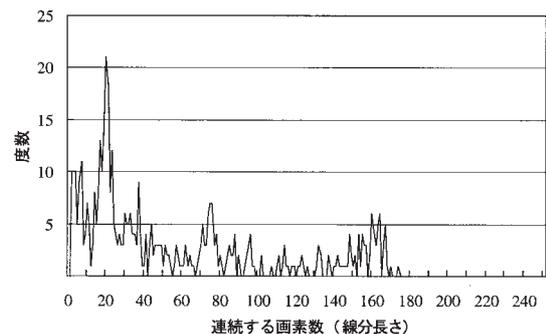
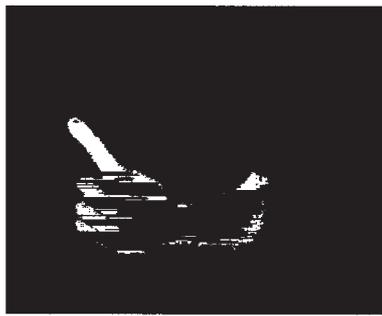


図6 線分長さの累積度数分布

線分を取り除く必要がある。指先を利用した3次元マウスの操作においては, 人差し指を伸ばして指示を行うため, カメラ画像中では同じ指の幅をもつ領域は人差し指の部分が最大となる。そこで図7(a)の結果に対しラベリング処理を行うことで, 図7(b)に示すように, 最大領域の抽出により人差し指以外の領域を除去することができる。

3.2 指差し方位と指の太さの検出

指先部分のみ抽出された図7(b)の結果に対し, 中心線



(a) 指線分抽出画像



(b) 指先抽出画像

図 7 指先抽出の結果



図 8 手領域と指先領域



(a) 中心線検出



(b) 指先の円検出

図 9 指先検出の結果

検出の処理を行うことにより、カメラ画像上での人差し指の向き（指差し方位）を検出できる。検出された中心線の両端の一方が指先の位置となるが、手腕の矩形領域と指先の矩形領域の位置から指先の位置を決定する。図 8 に示すように、これまでの処理で手腕の矩形領域と指先の矩形領域は検出されており、指先位置は両方の矩形領域の位置関係より決定する。さらに、指先抽出画像よりエッジを検出し、指先部分の円弧に一致する円の検出を行うことにより、指先の位置を確定する。また、指先抽出画像より検出された中心線に直交する直線を求め、この直線の方向に連続する画素数を算出することで、カメラ画像上での指の太さを決定する。図 9(a) には、指の中心線と直交直線の検出結果を、図 (b) には円の検出を示す（処理結果はフレーム画像に重畳した）。以上のような処理を経てカメラ画像上での指先位置および指の太さを求めることにより、指先の 3 次元座標位置を算出できる。このように、手の形状モデルやカラーマーカを用いた関節などの特徴部位の検出プロセスが不要であり、手指のシルエット画像において指先位置と指の太さのみ検出できれば指先の 3 次元座標位置の計測を行うことができるため、赤外線画像カメラの映像など入力カメラ映像の種類や指抽出の画像処理の方法に関わらず、提案した計測方法を適用することができる。

3.3 3次元ポインティングデバイスの構成

本稿で提案する 1 台のカメラ画像を用いた指先位置の計測手法と、カメラ画像から指先領域の抽出を行う画像処理を、パーソナルコンピュータ上で動作するソフトウェアとして実装し、「指先」を用いた 3 次元マウスを実

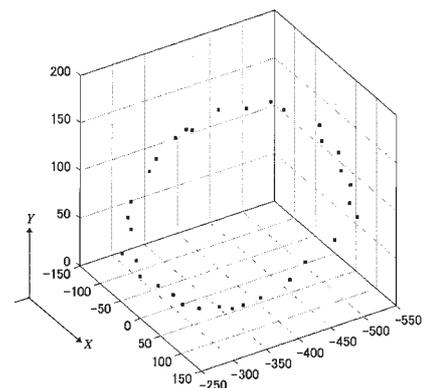


図 10 3次元位置計測の結果

現するポインティングシステムの構築を行った。試作システムは、Windows が動作する IBM PC/AT 互換機を使用し、このコンピュータに一般に市販されている USB カメラ（対角画角 54° ）を 1 台接続して、カメラ映像の入力、画像認識、計測処理すべてを 1 台のコンピュータで行う構成とした。なお、カメラ画像より得られる計測結果は、指先の 3 次元位置座標のみであるため、座標指定以外の機能はボタンスイッチを利用して 3 次元マウスの機能を実現している。カメラにより入力された縦 352 画素、横 288 画素の解像度をもつ画像から、画像処理により指先部分の抽出を行い、カメラ画像上での指先の先端部の座標および指の太さを検出した後、提案手法により指先の 3 次元位置座標を算出する。図 10 は、カメラの前方で指先を円を描くように回転させた場合の 3 次元位置計測の結果を示したものである。計測された座標はカメラ座標系での位置を示しており、指先の運動の様子が捉えられている。

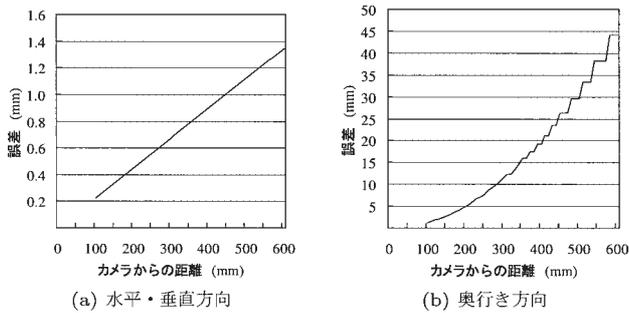


図 11 位置計測の精度評価

また、図 11 は試作システムで使用したカメラを用いた場合の位置計測の精度を示したものである。デジタル画像を用いた計測では、3次元空間がサンプリングされているため、図 11 に示す量子化誤差が生じ、水平・垂直 (X, Y 軸) 方向に比べ、奥行き方向の空間分解能が粗く、カメラからの距離に応じて空間分解能は悪くなる。このような量子化誤差は、高解像度のカメラを使用することにより改善することが可能であるが、試作システムに使用した低解像度のカメラを用いた場合でも、カメラから 400mm 離れた位置での奥行き方向の量子化誤差は、指の太さ程度の 20mm であるが、システムへの指先による指示は、指の幅より大きな移動動作により行うため、図 10 に示すように指先の動きを十分に捉えることができ、3次元マウスとして入力デバイスを構築することができる。以上のように、指先位置の計測においては1台のカメラ画像のみを用いて、水平・垂直方向の動きをセンシングすることができ、カメラからの距離に応じて精度は悪くなるが、奥行き方向の動きも計測できるため、本手法がモニタ画面より手前の位置での指先の動き検出に適用できることが確認できた。

4. む す び

モニタ画面より手前の位置での「人差し指」の指先の動き検出に適用可能な3次元位置計測法について述べた。カメラ1台のみの画像から、カメラ画像上での指先の先端部の座標と指の太さ(幅)を検出することにより、指先の3次元位置座標を算出できるため、指先の変位に応じたマウスポインタなどの3次元的な操作指示を実現でき、「指先」を用いた3次元ポインティングデバイスを構成することができる。本提案の指先位置の計測手法は、カメラ1台のみで計測システムを構成できる簡易なものであり、3次元位置計測の精度は、使用するカメラ画像の解像度に影響するが、安価で入手可能な低解像度タイプのUSBカメラであっても、カメラの設置場所から400mm離れた位置の指先の動きが、指の太さ程度の分解能で検出できるため、この計測結果を利用して3次元マウスなどの入力デバイスを構築することができる。今後は、空間に立体映像として表示された仮想物体への

「指」によるインタラクションを実現するため、手指によるジェスチャ認識や、ジェスチャ認識に適用するための指画像抽出処理の改良、操作者の動作意図の解析システムについて検討を行う予定である。

〔参 考 文 献〕

- 1) 大越孝敬：“三次元画像工学”，朝倉書店（1991）
- 2) 泉武博監修：“3次元映像の基礎”，オーム社（1995）
- 3) 志水英二，岸本俊一：“ここまできた立体映像技術”，工業調査会（2000）
- 4) 阪本邦夫，木村理恵子：“解像度劣化のないパララックスバリア方式立体表示の一手法”，映情学誌，**59**，1，pp.155 - 157（2005）
- 5) 阪本邦夫，木村理恵子：“偏光パララックスバリア方式透過型立体ディスプレイ”，映情学誌，**59**，2，pp.296 - 301（2005）
- 6) 阪本邦夫，高木美和：“偏光スリットを用いた多眼式立体ディスプレイの試作”，映情学誌，**59**，5，pp.791 - 793（2005）
- 7) 阪本邦夫，木村理恵子：“逆視領域の無いメガネなし立体ディスプレイ”，映情学誌，**59**，8，pp.1199 - 1203（2005）
- 8) 阪本邦夫，西田雅貴：“偏光ダブルスリットを用いた視差バリア方式3Dディスプレイ”，情報科学技術レターズ，**4**，pp.241 - 244（2005）
- 9) 阪本邦夫，高木美和：“立体映像へのインタラクションのための3次元位置計測の一手法”，映情学誌，**57**，9，pp.1152 - 1154（2003）
- 10) 阪本邦夫，木村理恵子：“単眼カメラ画像を用いた指差しポインタの構成”，映情学誌，**58**，5，pp.721 - 723（2004）
- 11) 島田伸敬，白井良明，久野 義徳：“三次元モデルを用いた二次元動画からの手指姿勢の推定”，信学技報 PRU94-5，pp.25 - 32（1994）
- 12) 井口征士，佐藤宏介：“三次元画像計測”，昭晃堂（1990）
- 13) 松原，浮田，木戸出：“基線長の短い2眼カメラによる visual hull からの正確な指先3次元位置推定”，情処研報 CVIM，Vol.2003，No.41，pp.215-222（2003）
- 14) 小林，佐藤，小池：“赤外線画像を用いた指先実時間追跡による Enhanced-Desk の実現”，ヒューマンインタフェースシンポジウム'99 論文集，pp.417 - 422（1999）
- 15) 入江，梅田，若村：“ジェスチャ認識を利用したマン・マシン・インタフェースの構築—インテリジェントルームへの適用—”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03 講演論文集，1A1-3F-D1（2003）
- 16) 六本木，田中，安部，八木：“網膜チップカメラと CCD カメラを用いた指差しとその対象の同定”，http://www.sein.mse.kyutech.ac.jp/avatar_system/ropon/ropon.pdf