

研究テーマ 手位置推定に関する研究

研究者 渡辺博己

財団法人ソフトピアジャパン

雇用研究員

ジャン・クリストフ・テリヨン

財団法人ソフトピアジャパン

雇用研究員

フェーズ I

1 研究の概要

人間の動作情報は、その人の意図や状況を推定するのに必要な情報の1つで、特に手の動きは、ユーザの意図を直感的に伝達することができる有効な手段である。手の動作における重要な要素には、形状、姿勢、位置等がある。その中で、我々は、手の位置を推定する技術について開発する。

手の位置を推定することで人物の意図を推定することができる動作の1つにポインティングジェスチャがある。ポインティングジェスチャは、手の動きによる日常的な動作の1つであり、ユーザの関心領域を相手に伝えるためには欠かせない動作である。

すでにポインティングジェスチャを対象とした研究がいくつか見受けられるが、これらは、ポインティング方向が限定された領域を対象として行われているため、その領域内のオブジェクトしか扱うことができない。そこで、我々は、室内空間でどの方向でもポインティングジェスチャを検出できるシステムの構築を目指す。

ポインティングジェスチャでは、顔と手、対象物が直線上に並ぶと考えられる。つまり、顔と手の位置を推定すれば、ポインティング方向の推定が可能であると考えられる。そこで本研究では、顔と手の位置を推定し、ポインティング方向を推定する手法を開発した。その結果、水平方向で平均誤差 3.30° 、分散 8.08、垂直方向で平均誤差 2.20° 、分散 4.06 という結果が得られた。

さらに、ポインティングジェスチャでは目と指先を結んだ直線方向に対象物が存在すると仮定し、目と指先の位置からポインティング方向を推定する手法についても開発した。その結果、水平方向で平均誤差 1.04° 、分散 1.75、垂直方向で平均誤差 0.89° 、分散 1.24 という結果が得られ、顔と手の位置を推定する手法よりも精度の高いポインティング方向推定が可能であることが分かった。

2 研究の目標

どの方向に対してでもポインティング方向を推定するために、人物の周囲に多数配置したカメラから肌色領域を抽出し、顔と手の空間位置を推定する技術を開発する。また、ポインティングジェスチャにおけるポインティング方向を顔と手の位置から推定する。さらに、目と指先の位置からもポインティング方向を推定する。

3 実施内容

3.1 顔と手の位置によるポインティング方向推定

全方位に対するポインティングジェスチャの検出を実現するために、複数のカメラで人物を撮影し顔向き推定を行い、その結果に基づいて正面顔を捉えたカメラの両隣のカメラ画像から手・顔領域を抽出し、ポインティング方向を求めるシステム及び手法について開発した。なお、本研究ではポインティングジェスチャを対象物に対して顔を正面に向けポインティングする動作と定義し実施した。

3. 1. 1 システム構成

図1にシステム構成を示す。1辺480cm四方で組み上げたパイプに、同期の取れたカメラ8台を45度間隔で放射状に配置し、光軸を室内中心に向け、高さ115cmの位置で床面と水平に設置する。各カメラにはPC（以後、カメラPCと呼ぶ）を1台ずつ接続し、ビデオレートのカラー画像をMotion JPEG圧縮でハードディスクに格納する。カメラ画像には、同期の確認を容易にするため、カメラPCに入力される前にタイムコードをスーパーインポーズ(VG-50, HORITA)する。カメラPCに入力された映像は画面合成スイッチャ（MV-1616、朋栄）を通してメインPCに入力される。メインPCは画面合成スイッチャを制御することで、入力映像を切り替えることが可能である。本システムで収集したポインティングジェスチャ画像例を図2に示す。

各カメラPCは、メインPCからの要求に従い、画像のキャプチャ、肌色領域抽出を行い、顔向き推定結果を送信する。メインPCは、カメラPCから受け取った結果をもとに顔向きを統合判定し、画面合成スイッチャを制御して2台のカメラを選択し、得られたカメラ画像からそれぞれ手・顔領域を検出する。検出されたそれぞれの手・顔領域の重心位置から空間内における手・顔領域の3次元位置を算出し、2点間を結んだ直線方向をポインティング方向とする。画像を収集する場合は、同じようにメインPCからの命令に従い、各カメラPCが収集する。なお、各PC間の通信はイーサネットを介したソケット通信で行い、画像合成スイッチャはSIOで制御する。照明は天井に埋め込まれた蛍光灯のみである。

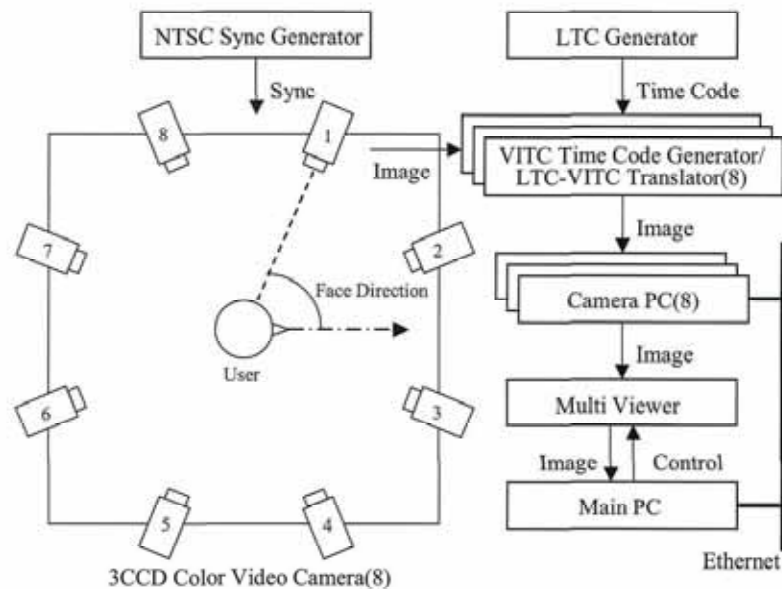


図1 システム構成

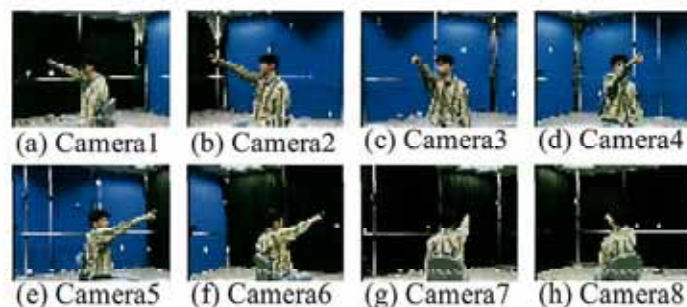


図2 収集したポインティングジェスチャの画像

3. 1. 2 顔領域の検出

顔領域検出は、色情報を用いた肌色基準値による手法を用いる。今回は、均等知覚色空間の1つであるLUV表色系を用いた。まず、入力画像よりU、V座標値による2次元色ヒストグラムを求め、予め定めた肌色有効範囲内のピーク値を肌色基準値とする。図3に2次元色ヒストグラムにおける肌色基準値の例を示す。その基準値からの色差に対して判別分析による閾値に

より肌色領域を決定する。今回は対象人物を1人としているので、最大領域を顔領域と判断する。

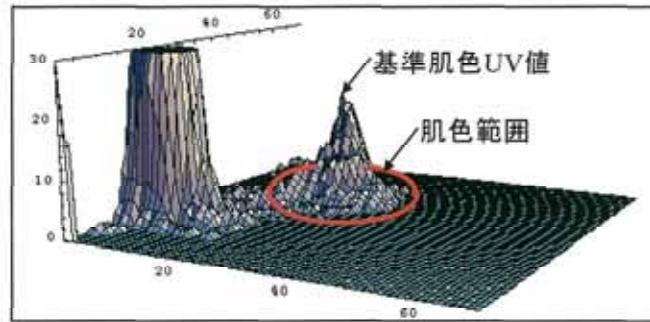


図3 UVヒストグラムにおける肌色範囲と基準肌色UV値

3. 1. 3 顔向き推定の推定

顔の向きを推定する方法としては、目や口などの顔特徴によるモデルベース手法とアピアランススペース手法とがあるが、モデルベース手法では個人差や顔向きによって構造解析が困難である。そこで、我々は、多視点からの顔向き推定結果をリアルタイムで容易に統合できる枠組みとして、アピアランススペースの手法を提案している。これは、顔領域から抽出した4方向面特徴を線形判別分析により、顔向きの判別空間を作成する方法である。

4方向面特徴は、文字認識の分野において開発され、有用性が証明された手法の1つである。特徴の抽出方法は、入力画像からPrewittオペレータを用いて、水平、垂直、右上がり、右下がりの4つの方向面を抽出する。次に、これら4方向面の画像を顔領域で正規化を行い、8x8に低解像度化し、各方向面の画素の濃淡値を特徴量として抽出する。この特徴量は4つの方向面に分けてから解像度を低くするため、入力画像の解像度を直接低くする場合よりも、高解像度でのエッジ情報が保持される。その結果、位置ずれや形状変化の影響を受けにくく、かつ計算コストを削減して処理の高速化を図ることが可能である。

線形判別分析は、学習データから識別に最適な特徴量を構成する多変量解析手法である。つまり、特徴量の分散を同一クラス内で小さく、各クラス間で大きくなるよう線形写像を求め、識別精度の向上を図っている。

未知データの識別では、まず、画像データから抽出した4方向面特徴を、学習の際に求めた係数行列により写像変換し、特徴ベクトルを生成する。次に、生成されたベクトルと、各クラスの平均特徴ベクトルとのユークリッド距離を測ることでパターン認識を行う。そこで、距離が最小となるクラスを識別結果とする。認識実験では図4のような結果が得られた。結果は未知データに対する学習クラス毎の判別距離の推移を表す。

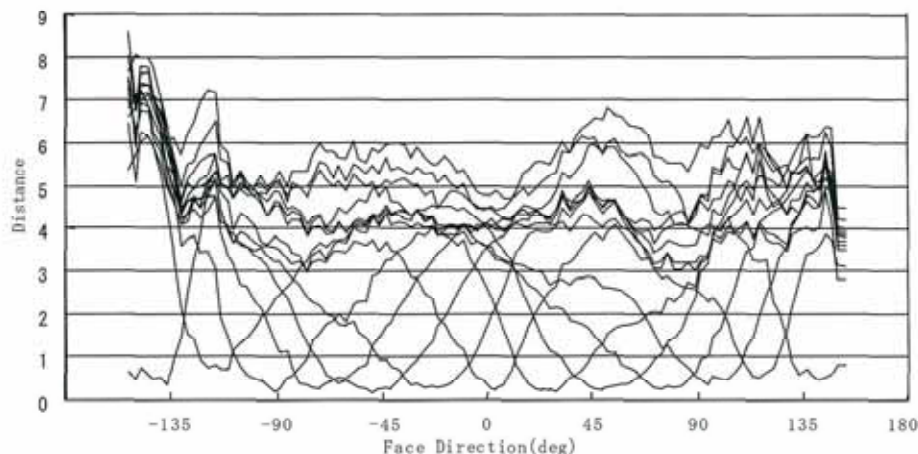


図4 判別空間における距離の推移

3. 1. 4 正面顔の検出

ユーザのポインティング方向を検出するためには、ユーザの顔向きを検出する必要がある。そこで、多視点カメラ画像からのそれぞれの顔向き推定結果を統合することにより顔向きを推定し正面顔を検出する。

顔向きを統合判定するには、前述の顔向き推定で得られたカメラ方向に対する相対顔方向 F_{th} を室内座標系 θ に変換する必要がある。1つのカメラ方向を基準軸 (0°) とし、基準軸とカメラ方向とがなす角度を C_{th} 、カメラからみた室内中央と人物位置がなす角度を P_{th} とすると、人物の絶対顔方向 θ は、 $\theta = F_{th} + P_{th} + C_{th}$ となる。しかし、本稿では、人物は常に室内中心に存在するものとしたため、多少の位置誤差があっても P_{th} の値は無視できる。よって、 $P_{th} = 0$ となる。

各カメラにおける顔方向を絶対顔方向に変換後、方向別に判別距離の逆数を加重和し、その最大値を顔向き評価値として統合結果とする。なお、肌色領域が検出されなかった方向は判別距離を無限大とし、評価値が0となるようにした。また、オクルージョンが発生した場合も統合結果を用いるため、顔方向の推定が可能である。

3. 1. 5 手・顔領域の抽出

まず、前述の正面顔検出方法を用いて図5のように中央カメラを決定する。斜線部分は中央カメラの選択範囲を示す。中央カメラの画像を用いて肌色領域を抽出すると、ポインティングジェスチャではオクルージョンが発生することが予想されるため、本稿では中央カメラに対して左右のカメラを用いることによりオクルージョンの発生を回避する。

次に、画面合成スイッチャを制御することにより左右カメラから画像を撮影する。得られた画像それぞれについて肌色基準値を再算出し、肌色領域を抽出する。抽出された肌色領域のうち最大領域を顔領域とし、次に大きい領域を手領域とする。顔領域が手領域より小さい場合は位置情報を用いる。図5に示すとおり、左右2台のカメラは直交に設置されているため、右カメラ画像では、手領域は顔領域の左側に存在し、左カメラ画像では、手領域は顔領域の右側に存在する。

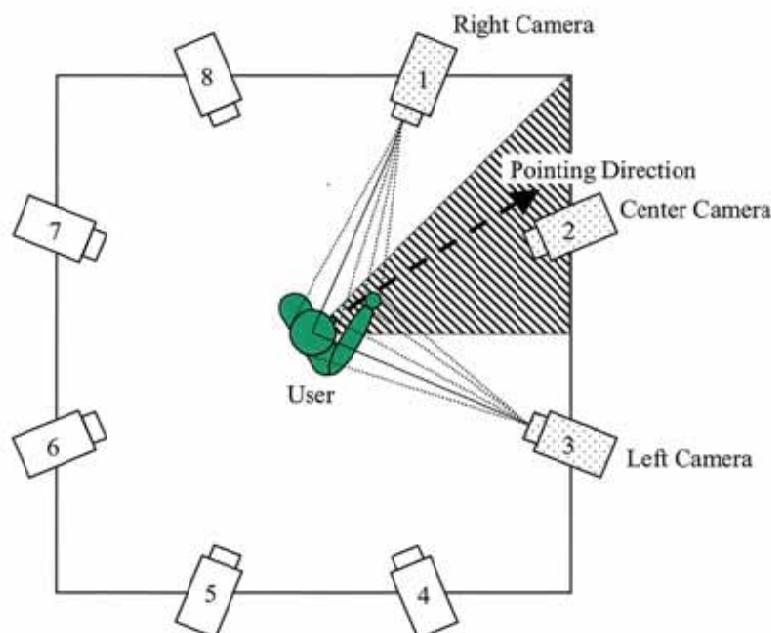


図5 カメラ選択の例

3. 1. 6 ポインティング方向の推定

ポインティング方向を推定するためには、手・顔領域の3次元空間位置を求める必要がある。そこで、2台のカメラから得られた手・顔領域の重心位置を求め、それぞれの重心位置をステレオマッチングすることによって顔領域、及び手領域の空間位置を算出する。しかし、腕方向によっては顔領域の一部が欠けるため、重心位置の算出において位置誤差を生じる可能性がある。そこで、高さ方向の位置の算出に関しては、顔領域が大きい画像の位置情報をもとに算出する。算出された顔位置を始点として手位置を通る直線上の対象物がポインティング対象物として得られる。

3. 2 目と指先の位置によるポインティング方向推定

全方位に対するポインティングジェスチャの検出を実現するためのシステム及び手法について述べる。ポインティング方向の推定では、人は物体を正確にポインティングする際、視線上に指先を置くと考えられるため、眼部と指先の空間位置を算出し、眼部と指先を結んだ直線方向にある物体をポインティング対象物とみなした。なお、本研究では、ポインティングジェスチャを対象物に対して顔を正面に向けポインティングする動作と定義した。

3. 2. 1 システム構成

システムは3. 1. 1と同様である。1辺480cm四方で組み上げたパイプに、同期の取れたカメラ8台を45度間隔で放射状に配置し、光軸を室内中心に向け、高さ125cmの位置で床面と水平に設置する。各カメラにはPC(以後、カメラPCと呼ぶ)を1台ずつ接続し、ビデオレートのカラー画像をMotion JPEG圧縮でハードディスクに格納する。カメラ画像には、同期の確認を容易にするため、カメラPCに入力される前にタイムコードをスーパインポーズ(VG-50、HORITA)する。カメラPCに入力された映像は画面合成スイッチャ(MV-1616、朋栄)を通してメインPCに入力される。メインPCは画面合成スイッチャを制御することで、入力映像を切り替えることが可能である。

各カメラPCは、メインPCからの要求に従い、画像のキャプチャ、肌色領域抽出を行い、顔向き推定結果を送信する。メインPCは、カメラPCから受け取った結果をもとに顔向きを統合判定し、画面合成スイッチャを制御して3台のカメラを選択し、得られたカメラ画像から顔・手領域を検出し、更に眼部・指先を検出する。検出された眼部・指先からそれぞれの3次元位置を算出し、2点間を結んだ直線方向をポインティング方向として推定する。画像を収集する場合は、同じようにメインPCからの命令に従い、各カメラPCが収集する。なお、各PC間の通信はイーサネットを介したソケット通信で行い、画像合成スイッチャはSIOで制御する。照明は天井に埋め込まれた蛍光灯のみである。

3. 2. 2 顔の方向推定

室内での方向に依存しないポインティングジェスチャを検出するために、マルチカメラにより顔領域検出および顔向き推定を行い、推定結果を統合することで、正面顔を検出し、人物の大まかな注視方向を推定する。処理は、3. 1. 2、3. 1. 3、3. 1. 4と同様の処理を行う。

3. 2. 3 カメラの選択

前述の正面顔検出方法を用いて図5のように中央カメラを決定する。斜線部分は中央カメラの選択範囲(-22.5°以上、22.5°未満)を示す。中央カメラの画像を用いて肌色領域を抽出すると、ポインティングジェスチャではオクルージョンが発生することが予想されるため、本稿では中央カメラとその左右のカメラも用いることによりオクルージョンの発生を回避する。なお、3台のカメラ画像は画面合成スイッチャを制御することにより、それぞれ320x240の解像度で取得可能である。

3. 2. 4 眼部・指先の抽出

眼部の抽出には、YIQ 基底の Y 成分を用いる。まず、右カメラ画像より顔領域を抽出する。ここで、右カメラ画像を用いるのは、ユーザが右利きの場合、ポインティングジェスチャにより顔領域に対するオクルージョンが生じないためである。ユーザが左利きの場合は左カメラ画像を用いる必要があるが、実験ではすべてのユーザが右利きであったため、利き腕の特定は本稿では触れない。次に、抽出した顔領域の中で Y 成分の値が低い領域を抽出する。抽出された領域には眼部、眉、鼻孔等があるが、それぞれの位置関係より眼部を特定する。本稿では、抽出された眼部の重心位置を目位置とした。

指先は左カメラ画像を用いることにより容易に抽出が可能である。つまり、中央カメラに対して -22.5° 以上、 22.5° 未満では、指先は手領域の端点となる。そこで、本稿では、手領域を抽出し、手領域の重心位置からもっとも離れた点を指先位置とした。

3. 2. 5 ステレオマッチング

ステレオマッチングを用いて抽出した眼部、及び指先の 3 次元位置を算出する。

一般に、3 次元空間点 $M(X, Y, Z)$ と画像点 $m(u, v)$ の間には次式が成り立つ。

$$sm = PM \quad (1)$$

ここで、 P は

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1^T & p_{14} \\ p_2^T & p_{24} \\ p_3^T & p_{34} \end{bmatrix}$$

であり、カメラパラメータと呼ばれている。 s はスケールファクターである。まず、8 台のカメラのカメラパラメータ P_i を、 $p_{34} = 1$ として、あらかじめ 3 次元位置の既知な 6 つ以上の基

準点を用いて求めておく。さらに、 P_i の実際のスケールを $\|p_3\| = 1$ となるように計算し直し、

カメラの内部変数を含むカメラ内部行列 A_i と外部変数を含む回転行列 R_i 、並進ベクトル t_i を求める。

次に、目位置、指先位置がそれぞれ 1 つの画像上で既知であるため、他の画像上での対応点をエピポーラ線上に沿って探索する。そこで、1 つの画像上の 1 点より求められるエピポーラ方程式を求める。2 つのカメラの回転行列と並進ベクトルを R_1 、 R_2 、 t_1 、 t_2 とすると、両カメラ間の回転行列 R と並進ベクトル t はそれぞれ

$$R = R_1 R_2^T \quad (2)$$

$$t = -R_1 R_2^T t_2 + t_1 \quad (3)$$

として求められる。 R と t が決まれば、2 のカメラ画像座標 m_1 と m_2 の間にはエピポーラ方程式

$$m_1^T F m_2 = 0 \quad (4)$$

が成り立つ。ここで、

$$F = A_1^{-T} E (A_2)^{-1}$$

$$E = \begin{bmatrix} t \\ t \end{bmatrix}_x R$$

である。

目位置の対応点は中央カメラ画像、左カメラ画像より求める。右カメラ画像より求められた特徴点に対して $(2m+1) \times (2n+1)$ のウィンドウを設定し、中央カメラ画像、左カメラ画像のそれぞれのエピポーラ線上の各点を中心とするウィンドウとの類似度をはかる。ここでは、類似度を評価するために、YIQ 基底の Y 成分を用いて相関の強さを求めた。2つのカメラ画像より得られたそれぞれの点のカメラ座標を $m_1(u_1, v_1)$ 、 $m_2(u_2, v_2)$ とすると、相関値 S は次のようになる。

$$S(m_1, m_2) = \frac{\sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n (Y_1(u_1+i, v_1+j) - \overline{Y_1(u_1, v_1)})(Y_2(u_2+i, v_2+j) - \overline{Y_2(u_2, v_2)})}{(2m+1)(2n+1)\sqrt{\sigma^2(Y_1)\sigma^2(Y_2)}} \quad (5)$$

ただし、 $\overline{Y_k(u, v)}$ は点 (u, v) を中心とするウィンドウの Y_k ($k=1, 2$) の平均値であり、 $\sigma(Y_k)$ はその標準偏差である。対応点は、中央カメラ画像に対する相関値と左カメラ画像に対する相関値をそれぞれ求め、2つの値のうち大きい値を取るカメラ画像上の点として決定する。図6に右カメラ画像で求められた目位置とその点に対応するエピポーラ線と最も相関の高かった点を示す。

指先位置の対応点は右カメラ画像より求める。指先位置の場合は、肌色領域の端点であるため、右カメラ画像におけるエピポーラ線を左側から探索し、最初に現れた肌色領域の点に対応点とする。図7に左カメラで求められた指先位置とその点に対応するエピポーラ線と肌色領域の端点を示す。3次元位置は、得られたそれぞれのカメラ座標を(1)式に適用することにより算出する。

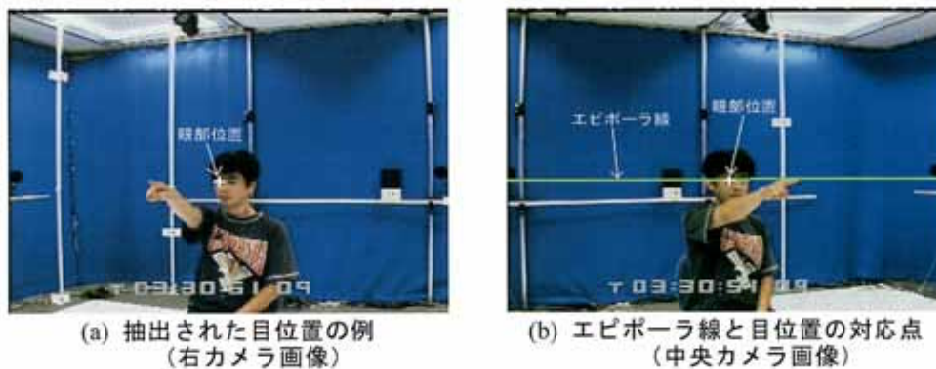


図6 抽出された目位置とその対応点

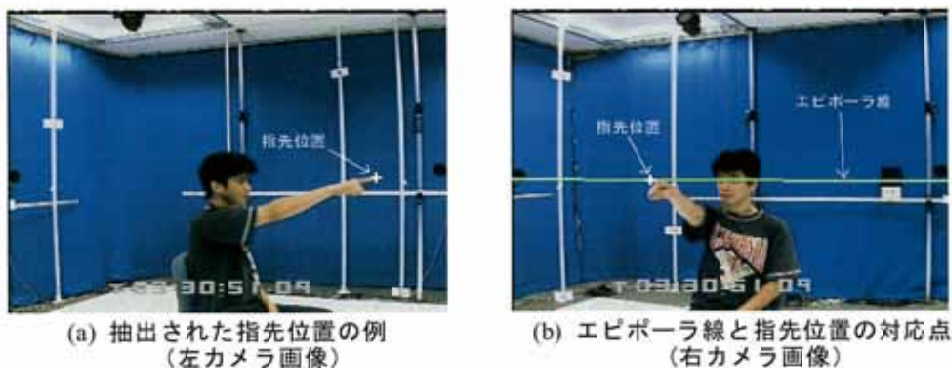


図7 抽出された指先位置とその対応点

3. 2. 6 ポインティング方向の推定

ポインティング方向推定に用いる座標系を図8に示す。3. 2. 5で求めた眼部、及び指先の空間位置をそれぞれ M_1 、 M_2 とすると、ポインティング方向は基準軸と線分 M_1M_2 がなす角度 ϕ として求めることができる。しかし、人物は空間内を自由に動けるため、 ϕ の値は同じ対象物をポインティングしても一意には定まらず、方向推定精度を求めるような場合には有効ではない。そこで、本稿では、既知の周辺環境情報から室内中央と対象物の空間位置 O 、 T それぞれを与え、 O を中心とし距離 \overline{OT} である円弧と線分 M_1M_2 を延長した直線の交点 T' を求め、基準軸と線分 OT' のなす角度 θ をポインティング方向として推定する。

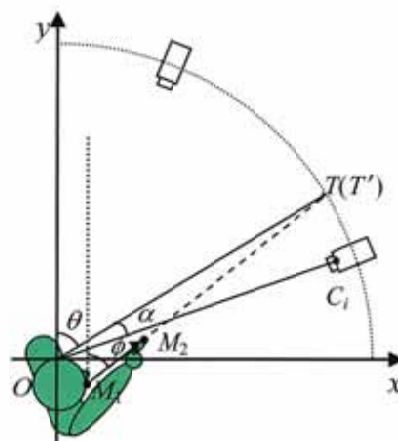


図8 ポインティング方向の座標系

4 結果

4. 1 顔と手の位置によるポインティング方向の推定実験

本システムを用いて評価実験を行った。被験者4人に対して、顔向き推定で正しく正面カメラを選択したフレームの中から任意に画像をカメラ毎に選出し、ポインティング方向推定のシミュレーション実験を行った。

実験では、カメラを中心として水平方向4通り（11.25度間隔、-22.5度～11.25度）、垂直方向5通り（11.25度間隔、-22.5度～22.5度）、計20個の指標をそれぞれの壁面に対し、重複する方向がないようランダムに配置した。被験者を中央に置いた回転可能な椅子に座らせ、それぞれの指標を1秒間指すよう指示し2回撮影した。その中から顔向き推定結果が正しかった画像をそれぞれ1フレームずつカメラ毎に収集した。

図9にポインティング方向推定に使用した画像例を示す。図9(a)、(b)、(c)はそれぞれ中央カメラをポインティングした時の左カメラ、中央カメラ、右カメラの画像である。画像から分かるように、ポインティング対象は顔と手の延長線上にある。他の被験者についても同様な画像を得ることができた。また、図10は図9(a)、(c)から肌色領域を抽出した画像である。

シミュレーション実験結果を表1に示す。表1は、実験結果を指標の垂直方向ごとに、5段に分けて示したものである。各段の1行目は指標の位置、2～4行目は水平方向の推定結果、5～7行目は垂直方向の推定結果である。なお、水平方向の22.5度の結果は-22.5度に設置した指標に対し、顔向き推定結果で右カメラを中央カメラとした場合の結果である。

実験より、水平方向で平均誤差 3.30° 、分散 8.08、垂直方向で平均誤差 2.20° 、分散 4.06 という結果が得られ、水平方向に比べ垂直方向の推定精度が高いことが示された。これは、

右カメラと左カメラで、顔領域の大きさが水平方向に対して異なるため、重心座標に影響を及ぼしたと考えられる。



図9 ポインティング画像例

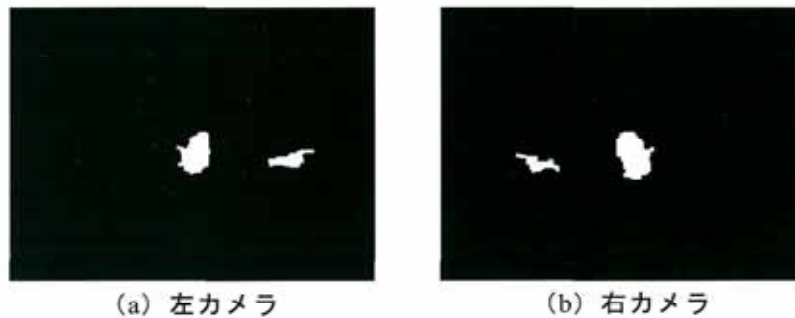


図10 肌色抽出結果例

4.2 目と指先の位置によるポインティング方向の推定実験

本システムを用いて評価実験を行った。被験者12人に対して、顔向き推定で正しく正面カメラを選択したフレームをカメラ毎に選出し、ポインティング方向推定のシミュレーション実験を行った。

実験では、室内中央を原点とし、カメラを中心に水平方向4通り（ 11.25° 間隔、 $-22.5^\circ \sim 11.25^\circ$ ）、垂直方向5通り（ 11.25° 間隔、 $-22.5^\circ \sim 22.5^\circ$ ）、計20個の指標を配置した。さらに、配置した指標は各カメラに対し、重複する方向がないように振り分けた。室内中央から指標までの距離は全て既知である。実験データは、被験者を室内中央に置いた回転可能な椅子に座らせ、それぞれの指標を約1秒間ポインティングするよう指示し撮影した。その際、被験者にはそれぞれの指標に対し体を正面に向け、腕を伸ばした状態でポインティングするよう指示した。その中から顔向き推定結果が正しかった画像を、被験者12人、指標20個に対し、それぞれ1フレームずつカメラ毎に収集した。

表2に実験結果を示す。表2は、実験結果を指標の垂直方向ごとに、5段に分けて示したものである。各段の1行目は指標の位置、2~4行目は水平方向の推定結果、5~7行目は垂直方向の推定結果である。ポインティング方向は、原点と中央カメラを結ぶ線分 OC_i と線分 OT' のな

す角度 α を結果として求めた。カメラ位置 OC_i が既知であるため、角度 α を求めることは、基準軸と OT' のなす角度 θ を求めることと等価である。また、ポインティングジェスチャには被験者毎に癖があるため、カメラレンズ（水平方向 0° 、垂直方向 0° ）をポインティングした場合のジェスチャをもとに推定結果に補正を加えた。

方向毎に多少のばらつきはあるものの、誤差平均、分散はそれぞれ水平方向に対して 1.04° 、 1.75 、垂直方向に対して 0.89° 、 1.24 、全方向に対して 0.97° 、 1.48 という良好な結果を得ることができた。中央から対象物までの距離が2mの場合、誤差 1° とすると、約35mmに相当する。

フェーズⅡ以降

以上のように、顔と手、および目と指先の位置によりポインティング方向を推定するシステムを開発した。しかしながら、顔と手、および目と指先の空間位置を算出したが、その精度を確認するまでには至らなかった。

また、アプリケーションとして使用するためにはポインティングジェスチャを様々な動作の中から検出する手法が必要となる。今後、ポインティングジェスチャを使ったアプリケーションの要望が発生する場合には、様々な動作の中からポインティングジェスチャを検出する手法の確立を目指す。

表1 顔と手の位置によるポインティング方向の推定結果

指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、22.50	-11.25、22.50	0.00、22.50	11.25、22.50
水平方向	平均角度	-16.09	-6.19	4.50	10.08
	誤差平均	6.41	5.06	4.50	1.85
	分散	0.53	0.86	1.13	2.71
垂直方向	平均角度	20.52	20.96	19.74	20.78
	誤差平均	1.98	1.57	2.76	2.14
	分散	0.46	1.39	0.86	4.01
指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、11.25	-11.25、11.25	0.00、11.25	11.25、11.25
水平方向	平均角度	-17.88	-6.06	-0.87	10.60
	誤差平均	4.62	5.19	1.90	1.62
	分散	1.46	0.47	4.16	3.07
垂直方向	平均角度	9.29	9.72	8.94	8.65
	誤差平均	1.97	1.53	2.31	2.79
	分散	1.42	0.70	2.69	2.55
指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、0.00	-11.25、0.00	0.00、0.00	11.25、0.00
水平方向	平均角度	-18.80	-6.97	1.76	9.47
	誤差平均	3.70	4.28	1.94	1.88
	分散	1.94	1.27	1.65	5.20
垂直方向	平均角度	-2.68	-1.34	-3.06	-2.49
	誤差平均	2.68	1.34	3.06	2.49
	分散	1.16	0.32	0.59	3.23
指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、-11.25	-11.25、-11.25	0.00、-11.25	11.25、-11.25
水平方向	平均角度	-17.68	-8.87	-0.15	13.52
	誤差平均	4.82	2.38	1.13	2.34
	分散	1.38	2.02	1.90	2.01
垂直方向	平均角度	-14.16	-12.87	-13.15	-10.80
	誤差平均	2.91	1.62	1.90	1.57
	分散	2.21	1.83	1.16	3.53
指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、-22.50	-11.25、-22.50	0.00、-22.50	11.25、-22.50
水平方向	平均角度	-19.22	-10.56	1.99	10.60
	誤差平均	3.28	1.46	2.81	1.16
	分散	2.12	2.16	4.49	1.24
垂直方向	平均角度	-22.89	-24.29	-23.15	-21.52
	誤差平均	2.23	2.94	2.30	2.29
	分散	12.56	8.52	5.49	5.63

表2 目と指先の位置によるポインティング方向の推定結果

指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、22.50	-11.25、22.50	0.00、22.50	11.25、22.50
水平方向	平均角度	-23.01	-11.59	0.10	12.05
	誤差平均	1.02	0.99	0.94	1.08
	分散	1.33	1.41	1.32	1.19
垂直方向	平均角度	21.64	21.21	21.96	22.40
	誤差平均	1.13	1.29	0.73	0.81
	分散	1.61	0.41	0.61	1.20
指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、11.25	-11.25、11.25	0.00、11.25	11.25、11.25
水平方向	平均角度	-22.76	-11.71	1.60	9.80
	誤差平均	1.03	0.72	1.92	1.58
	分散	1.33	0.73	3.98	1.76
垂直方向	平均角度	11.08	10.91	10.79	10.54
	誤差平均	0.72	0.76	1.03	1.08
	分散	0.88	0.79	1.22	1.39
指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、0.00	-11.25、0.00	0.00、0.00	11.25、0.00
水平方向	平均角度	-21.82	-12.41	0.65	11.40
	誤差平均	0.80	1.16	1.14	0.77
	分散	0.82	0.41	1.89	0.89
垂直方向	平均角度	-0.40	-0.18	-0.32	0.29
	誤差平均	0.88	0.81	0.49	0.65
	分散	1.15	1.11	0.27	0.56
指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、-11.25	-11.25、-11.25	0.00、-11.25	11.25、-11.25
水平方向	平均角度	-22.61	-10.92	-0.56	11.10
	誤差平均	0.89	1.02	0.93	0.82
	分散	1.42	1.35	0.98	1.05
垂直方向	平均角度	-11.30	-10.83	-11.77	-11.20
	誤差平均	0.74	0.69	0.91	0.91
	分散	0.87	0.55	1.26	1.21
指標（水平方向、垂直方向）		-22.50、-22.50	-11.25、-22.50	0.00、-22.50	11.25、-22.50
水平方向	平均角度	-22.04	-12.64	-0.31	10.91
	誤差平均	0.82	1.39	0.75	1.28
	分散	0.80	1.41	0.80	2.93
垂直方向	平均角度	-22.08	-21.70	-21.83	-23.01
	誤差平均	1.51	1.10	1.02	0.78
	分散	3.24	1.12	1.61	0.73