

人工現実感インタフェースのための単眼画像からの マーカの位置と姿勢の計測

高橋 章[†] 石井 郁夫[†] 牧野 秀夫^{††} 中静 真^{††}

A Measuring Method of Marker Position/Orientation for VR Interface by Monocular Image Processing

Akira TAKAHASHI[†], Ikuo ISHII[†], Hideo MAKINO^{††}, and Makoto NAKASHIZUKA^{††}

あらまし 人工現実感インタフェースを構築する手段として、画像処理による位置と姿勢の計測法を提案する。長方形で構成したマーカと単眼カメラを用い、マーカの投影像から得られる消失点の情報をもとに最適化処理により高精度に姿勢を推定する。計測対象にマーカを貼り付けるだけでよいので拘束感が少ない、複数を対象とする計測への拡張が容易、システムを安価に構成可能、カメラの設定を変えただけで計測範囲の変更が容易といった特徴をもつ。シミュレーションと実画像による計測を行い、ひずみの大きい小型カメラを用い、市販の装置だけで構成されたシステムで、姿勢について標準偏差 0.5 度、奥行きについて標準偏差 1mm 未満の精度で計測を行えることを示した。

キーワード 人工現実感インタフェース、実時間 3 次元計測、単眼カメラ、長方形マーカ

1. まえがき

仮想世界における行動や作業を実現するには、実世界の対象物の位置・姿勢を計測し仮想世界に反映させる必要がある。そのような人工現実感インタフェースには拘束感が少なく、高速で高精度な手段が望まれる。これまで直交電磁界を用いた位置・姿勢計測や [1]、ジャイロを用いた姿勢計測、超音波伝搬遅延を用いた位置計測 [2] などが実現されているが、計測対象となる部位にセンサ等の計測装置を装着することによる拘束感、計測範囲や計測条件がシステムの性能により限定され汎用性が低いこと、外乱や雑音に弱いことなどの問題がある。

一方、近年のマルチメディア化により、小型カメラや画像入力装置は手軽に利用されるようになってきている。そこで本論文では 1 台のカメラと長方形マーカを利用した画像処理による位置・姿勢計測法を提案する。この方法は、計測対象にマーカを貼り付けるだけでよ

いので拘束感が少ない、レンズの変更などにより計測範囲の変更が容易、複数対象の計測への拡張が容易といった利点をもつ。これまでに画像処理を用いた手指の計測法が提案されており [4], [5]、位置・姿勢の精度が十分でないことが問題とされていたが、本方法を併用することで問題の軽減が期待できる。また、運動視差表現のための観察者の頭部の計測や、仮想物体操作のための手やツールなどの計測が可能である。更に、カメラ配置の工夫などにより、頭部と手などの複数の対象を同時に 1 台のカメラで計測することも可能となる。この方法では計測精度と処理時間が問題となる。以下では処理の高速化を考慮した高精度な計測法を示す。また、シミュレーションと実画像を用いた実験により、計測精度と処理時間について検討し、実用性を示す。

2. 方法

2.1 画像による位置・姿勢計測法

応用例として図 1 に単眼カメラによる仮想ペンの位置と姿勢計測を示す。操作者のもつペン握り部に貼り付けたマーカ B の位置・姿勢を単眼カメラ A の画像より計測し、仮想空間に立体表示された仮想のペン先 C を制御することにより、仮想物体の彫刻や彩色など

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市
Graduate School of Science and Technology, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan

^{††} 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan

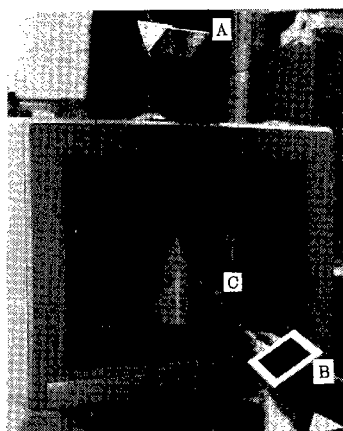


図1 単眼カメラによる仮想ペンの位置・姿勢計測
Fig.1 Measurement of position and orientation of VR pen.

従来の CAD ベースのシステムでは実現困難であった操作を実現できる [3].

既知の形状をもつマーカの位置と姿勢（回転）を定めるには、3点以上の投影像が与えられていればよいが、3点の場合には四つの解の候補が与えられ、一意に位置と姿勢を定めることはできない [6]. 長方形を計測対象とすると、投影像より得られる二つの消失点から辺の方向を表すベクトルが定まるが、直交性は保証されない。直交性を保証する方法として視差直交化が提案されている [8]. この方法では二つの消失点を結ぶ直線上で、視差中点を不動として2点の位置を補正するが、補正条件の妥当性が不明確で、高精度化を保証するものではない。また、3次元計測は位置の推定と姿勢の推定に分けて考えることが可能であるが、位置推定はスケール推定問題に帰着できるので、一般には姿勢の決定の方が重要である [7]. そこで本論文では消失点から得られる辺の方向を表す単位ベクトルを、画像面内の回転角と奥行き方向の回転角の二つの方向成分で表し、辺の直交性を拘束条件として方向成分を最適化する方法を提案する。姿勢は3自由度をもつので、厳密には3自由度の最適化を必要とするが、シミュレーションをもとに誤差の異方性を考慮して、1自由度最適化問題に簡単化する。

計測の手続きは画像処理による頂点の検出と、数値演算による位置と姿勢の推定の二つに大別できる。画像処理では長方形領域の抽出、頂点の抽出、辺の検出を行う。また、数値演算では消失点を求め、最適化による姿勢推定、位置の推定を行う。

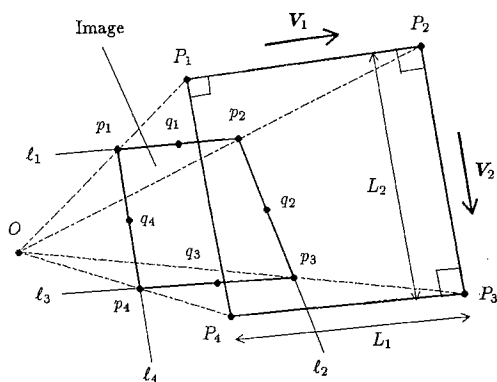


図2 長方形と投影像
Fig.2 A rectangle and its image.

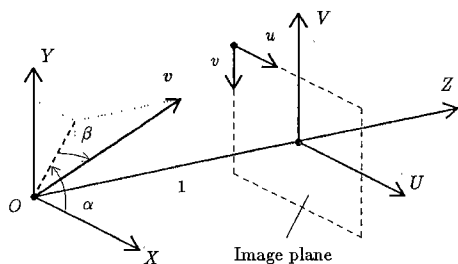


図3 座標系の設定
Fig.3 Coordinate systems.

2.2 マーカの構成と座標系の設定

処理の高速化と高精度化を考慮して、マーカは同心の二つの長方形による縁取りされた長方形パターンとする。長方形の抽出を容易にするため、内側の長方形と縁取りの明るさはそれぞれ一様とみなせるものとし、それぞれに明確なコントラストを与える。計測対象とするのは縁取りと内側の長方形の境界となる長方形 $P_1P_2P_3P_4$ である (図2 参照)。

図3のようにフレーム座標系 uv と、視点を原点 O 、光軸方向を Z 軸とするカメラ座標系 $O-XYZ$ を設定する。フレーム座標系からカメラ座標系への変換は、Weng らの方法を参考に次のように定める [10]. まずフレーム座標値 (u, v) を座標値 (U, V) へ変換する：

$$(U, V) = (u/f_u + u_0, v/f_v + v_0) \tag{1}$$

ここで、 (u_0, v_0) は画像中心、 $f_u, f_v (< 0)$ はそれぞれ列、行方向の焦点距離である。従ってカメラ座標系では焦点距離 1、画像面が $z = 1$ のピンホールカメラモデルを仮定しても一般性は失われない。次に画像ひ

ずみを補正し、カメラ座標値 $(x, y, 1)$ を求める：

$$x = U + (g_2 + g_4)U^2 + g_3UV + g_2V^2 + k_1U(U^2 + V^2) \quad (2)$$

$$y = V + g_1U^2 + g_4UV + (g_1 + g_3)V^2 + k_1V(U^2 + V^2) \quad (3)$$

ここで、 $d = (g_1, g_2, g_3, g_4, k_1)$ は放射方向ひずみ (radial distortion), 偏心ひずみ (decentering distortion), 薄プリズムひずみ (thin prism distortion) の3次以上の項を無視してモデル化した画像ひずみの係数である。

空間中の単位ベクトル v を画像面内の回転角 α と、奥行き方向への傾き β の二つの方向成分を用いて

$$v(\alpha, \beta) = (\cos \alpha \cos \beta, \sin \alpha \cos \beta, \sin \beta) \quad (4)$$

と表す。以下では直線の方法を表す単位ベクトルを方向ベクトルと呼ぶ。

2.3 長方形領域の抽出

マーカの投影像 $p_1p_2p_3p_4$ は画像フレーム上である大きさのウィンドウ内に常に収まるものとし、次の画像内の投影像は現在の投影像と共通領域をもつものとする。よって、新たな画像における投影像内部の1点 p は、手前の画像の投影像の情報から与えられる。

点 p を中心とするウィンドウを定め、その内部で1/2の解像度で固定しきい値による2値化を実行する。

2.4 頂点の抽出

抽出された投影像について輪郭線追跡を行い、 u, v 座標が最大、最小となる4点 p_L, p_R, p_T, p_B を求める (図4参照)。4点が重複せず、4点のなす四角形の周囲長と輪郭線長との差がしきい値以下の場合 (a) には次節の処理へ進む。重複がある場合 (b, c) は対角線となる直線からの距離が最大となる点を検索する。周囲長と輪郭線長の差が大きい場合 (d) は4点のうち対角線となる直線からの距離が最小となる点 (図では p_L) を誤検出と判定し、対角線 (p_Bp_T) からの距離が最大となる点を検索する。

2.5 辺の検出

前節の処理で得られる頂点座標は整数座標値であり、2値化処理は1/2の解像度で行っているため、頂点座標の精度は十分ではない。そこで、四角形の各辺を高精度に検出し、辺の交点として頂点座標を求める。

辺 $p_i p_j$ が水平に近い場合には u 座標ごとに垂直方向に走査し、サブピクセル単位のエッジ検出を行

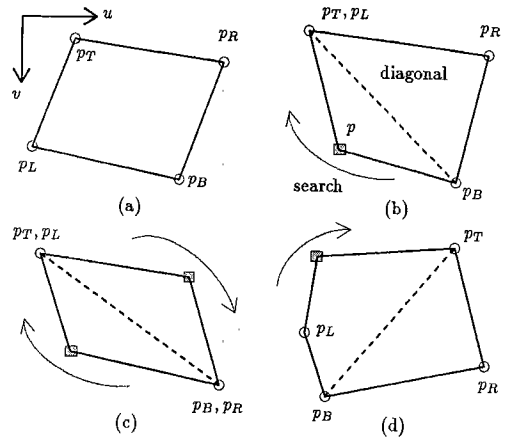


図4 投影像からの頂点抽出
Fig. 4 Extraction of aspect points from image.

う [9]. エッジ座標 (u, v) をカメラ座標系へ変換し、最小2乗法により直線 l_i に回帰する。同時に直線の重心 q_i と方向ベクトル v_i を定める。但し、雑音を減らすため p_i, p_j の近傍は直線の検出に含めない。辺が垂直に近い場合には走査方向を水平方向として同様の処理を行う。

2値化の結果は辺の検出を行う走査範囲を定めるためだけに参照するので、辺の検出精度は2値化のしきい値に依存しない。よって、しきい値は内側の長方形の概形が抽出されるように定めるだけでよい。

2.6 消失点からの姿勢情報

2直線 l_1, l_3 の交点である消失点 $p_{13} = (x_{13}, y_{13}, 1)$ より辺 P_1P_2 の方向ベクトル V_1 が定まる [6]:

$$V_1(\alpha_1, \beta_1) = \frac{1}{\sqrt{x_{13}^2 + y_{13}^2 + 1}} (x_{13}, y_{13}, 1) \quad (5)$$

同様に l_2, l_4 の交点である消失点 p_{24} より辺 P_2P_3 の方向ベクトル V_2 が定まる。

二つの方向ベクトルから得られる自由度は4であるため、長方形の姿勢を一意に決定するには冗長であり、かつ二つの方向ベクトルの直交性も保証されていない。

計測対象が長方形であることを利用し、ベクトルを直交させる方法として視差直交化が提案されている [8]。この方法では、二つの消失点を結ぶ直線上で中点 (視差中点) を不動として2点を動かし、方向ベクトルを直交させる。従って反復を要さず一意に姿勢を決定できるが、消失点の移動範囲を直線上に限定し、視差中点を不動とすることの妥当性や、精度の点で問題がある (3.参照)。そこで辺の直交性を拘束条件に、

最適化を行うことを考える。

2.7 3自由度最適化による姿勢推定

二つの方向ベクトル V_1, V_2 の直交性は、内積より、

$$\tan \beta_1 \tan \beta_2 = -\cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (6)$$

と表される。姿勢は3自由度で表現できるので、4変数からなるベクトル $\hat{x} = (\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2)$ を考え、いずれか一つの要素は式(6)に従うものとして、3自由度最適化を行えば厳密な姿勢推定が行える。

次に、最適化の目的関数について考える。ベクトル \hat{x} から定まる方向ベクトルの推定値 $\hat{V}_1(\hat{\alpha}_1, \hat{\beta}_1), \hat{V}_2(\hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_2)$ の消失点をそれぞれ $\hat{p}_{v1}, \hat{p}_{v2}$ と表す。また、重心 q_1, q_3 から \hat{p}_{v1} へ向かう直線をそれぞれ $\hat{\ell}_1, \hat{\ell}_3$, それぞれの方向ベクトルを v_1, v_3 とする。同様に q_2, q_4 から \hat{p}_{v2} へ向かう直線を $\hat{\ell}_2, \hat{\ell}_4$, 方向ベクトルを v_2, v_4 とする。このとき、ベクトル \hat{x} が解に近いほど、検出された直線 ℓ_i と推定された直線 $\hat{\ell}_i$ が平行に近づくことから、次式を最小にするベクトル \hat{x} を求めればよい。

$$F(\hat{x}) = 4 - \sum_{i=1}^4 |v_i \cdot \hat{v}_i|^2 \quad (7)$$

今回は最適化の手法として Simplex 法を用いた。この方法では四つの初期ベクトルを必要とするが、消失点から得られるベクトル x の要素の組合せによって用意できる。3自由度最適化では、計算量が多く、収束速度が一定でないことが問題となる。

2.8 1自由度最適化による姿勢推定

画像の特徴抽出による誤差の性質を利用した、収束速度が一定となる1自由度の最適化法を示す。

シミュレーションより、消失点から得られる方向成分について、 α の誤差は β の 1/10 以下であることがわかった(3.参照)。そこで、式(6)の右辺は一定と考え、 β_1 (または β_2) に関する1自由度最適化を行う。但し、式(6)で右辺が零でないとき、明らかに $\beta_1 \neq 0$ であるから、2区間 $[-\pi/2, 0], [0, \pi/2]$ についてそれぞれ最適化を行い、得られる解のうち目的関数の値がより小さい方を最適解として採用する。

式(7)を目的関数とし、最適化法として黄金分割による方法を採用する。この方法では、反復ごとに一定の比率で区間を縮小できるので、要求精度までの収束速度が一定となる。各区間についてそれぞれ15回の反復を行うと0.1度未満の精度で解が得られる。

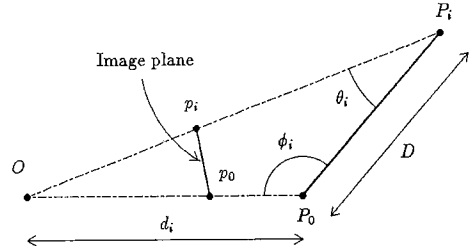


図5 対角線交点の位置推定
Fig.5 Estimation of position.

2.9 位置の推定

姿勢が定まると、位置の推定はスケール推定問題に帰着できる[7]。以下では長方形の対角線交点 P_0 と、投影像の対角線交点 p_0 , 視点 O の3点が共線であることを仮定し、位置を推定する。

図5のように三角形 OP_0P_i を考える。 O から p_0 , O から p_i へ向かうベクトルはそれぞれ投影像から定まり、 P_0 から P_i へ向かうベクトルは \hat{V}_1, \hat{V}_2 から与えられるので、角 θ_i, ϕ_i はベクトルの内積から定まる。また、長方形の辺長は既知なので、対角線の1/2である D は既知である。従って距離 d_i は簡単に求まる：

$$d_i = \frac{D \sin \theta_i}{\sin(\theta_i + \phi_i)} \quad (8)$$

4頂点から得られる距離の平均値 \bar{d} を、 OP_0 間の距離としてそれぞれの頂点座標を求める。ここで、距離の標準偏差により信頼区間や信頼度を示すことができる。

3. シミュレーション

計測系の設定や、長方形の長辺と短辺の比などによる姿勢推定の精度、姿勢推定法による位置推定の精度を調べるためにシミュレーションを行った。

3.1 設定

画像フレームは 640×480 とし、画像中心を $(u_0, v_0) = (320, 240)$, フレーム座標系での焦点距離を $f_u = |f_v| = f$ とする。2.5の辺の検出におけるサブピクセル単位のエッジ検出の誤差が姿勢、位置の検出精度に及ぼす影響を調べるため、水平方向に走査する際には各エッジ点の u 座標に正規分布 $N(0, N_u^2)$ に従う誤差を加え、垂直方向に走査する際には各エッジ点の v 座標に $N(0, N_v^2)$ に従う誤差を加える。その他の画像ひずみなどによる誤差は考慮しない。計測対象の画像を NTSC 方式の輝度信号のフレーム画像とする

場合には $N_u = N_v = 0.1$, フィールド画像とする場合には $N_u = 0.1$, $N_v = 0.2$ として v 方向は偶数座標のラインだけを利用する。これらの値は 4. の計測系で、計測対象を固定して連続して 10 回の画像入力を行った場合のエッジ座標の標準偏差をもとに定めた。

長方形の対角線交点のフレーム座標値を $P_0 = (0, 0, 2f)$, 法線ベクトルを $V_N(\alpha_N, \beta_N)$ とする。マーカの法線まわりの回転は α_1 で規定できるので、 α_1 を $-45 \sim 45$ 度の範囲で 1 度ずつ変化させ、方向成分の真値との差 (誤差) の統計値を求めた。姿勢推定法として消失点からの値を用いる方法 (A), 視差直交法 (B) と、今回提案する 3 自由度最適化法 (C), 1 自由度最適化法 (D) を比較する。また、B~D について位置推定結果を比較する。

3.2 姿勢推定シミュレーション

姿勢推定では 4 通りのシミュレーションを行った。

第 1 に、 $L_1 = L_2 = 200$ のマーカについて、奥行き方向への傾き β_N を 5 度ずつ変化させて計測を行った。焦点距離は $f = 543.4$ と定めた。カメラの水平画角は 61 度で、4. で用いるカメラ 1 に相当する。 $\alpha_N = 45$ 度とし、各 α_1 について 20 回の反復を行って求めた方向成分の誤差の標準偏差 $\sigma_\alpha, \sigma_\beta$ を図 6 に示す。画像面に占める投影像の面積の割合 (面積率) は 2.1~3.2% であった。フィールド画像の結果はフレーム画像の結果と傾向が一致しており、約 1.7 倍に増加している。A の $\sigma_\alpha/\sigma_\beta$ は β_N によらず約 1/10 であり、 α 成分は β 成分に比べ安定である。 σ_α について、B を除く三つは β_N によらずほぼ一定で、 $\beta_N < 50$ 度について A と C の差は 1.2% 未満である。 σ_β について、A は奥行き方向への傾きが大きい (β_N が小さい) ほど増加しているが、B は β_N によらずほぼ一定であり、C, D はある程度 β_N が大きい方が精度が良い。 $\beta_N < 75$ 度で C と D の差は 3.5% 未満である。

第 2 に、4. のカメラ 2 に装着可能なレンズを想定し、 $f = 349.2 \sim 5015.7$ (水平画角 85.0~7.3 度) について計測を行った。 $(\alpha_N, \beta_N) = (45, 75)$, $L_1 = L_2 = 200$ のフィールド画像の計測結果を図 7 に示す。 OP_0 間の距離は $2f$ なので、面積率は f によらず約 3.1% である。 σ_α は B を除き一定であるのに対し、 σ_β は f に比例して増大している。 β について最適化の効果がみられる。

第 3 に、長方形の 2 辺の長さの比 (縦横比) $R = L_1/(L_1 + L_2)$ を変化させて計測を行った。 $(\alpha_N, \beta_N) = (45, 75)$, $f = 543.4$ について、 $L_1 + L_2 = 400$ の下で L_1 を変化させて求めた、A と D による σ_β の計測結果を図 8 に示す。A の非対称性が、D では軽減されている。B の結果は (a) では D と同様に対称であったが、(b) では A とほぼ一致し、非対称であった。また、C の結果はいずれも D とほぼ一致した。縦横比 0.35~0.65 で σ_β がほぼ一定である。

最後に、長方形の辺の長さを変えて投影像の面積率を変化させて計測を行った。その結果、 $\sigma_\alpha, \sigma_\beta$ は面積率にほぼ反比例して減少し、面積率 3% 以上で $\sigma_\beta < 0.5$ 度となることがわかった。

上記のすべてのシミュレーションにおいて、方向成

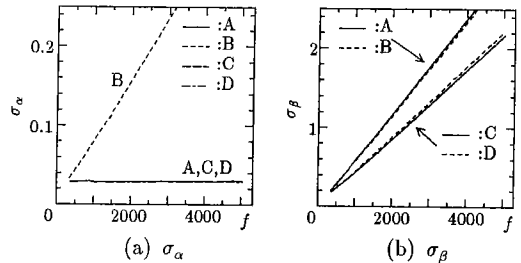


図 7 f に対する姿勢計測精度
Fig.7 f vs. orientation.

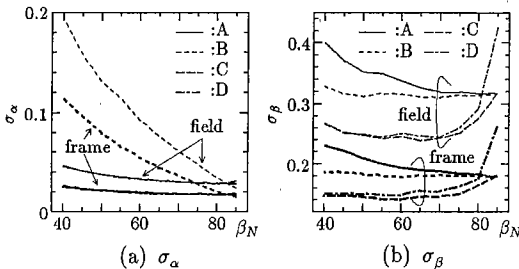


図 6 β_N に対する姿勢計測精度
Fig.6 β_N vs. orientation.

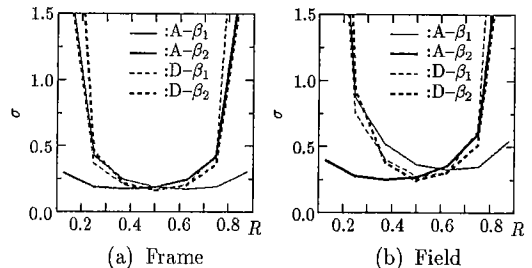


図 8 縦横比に対する姿勢計測精度
Fig.8 Aspect ratio vs. orientation.

分の真値との差の平均はいずれの方法も常に 0.01 度未満であった。最適化の収束時間は C では平均 23.5 ms, D では 5.0 ms であった (80486DX/50 MHz)。

3.3 位置推定シミュレーション

位置推定については、視点から対角線交点までの奥行き推定精度を計測して比較した。

$f = 543.4$, $L_1 = L_2 = 200$, $\alpha_N = 45$ 度の場合の β_N に対する奥行きの誤差の平均値を図 9(a) に示す。姿勢推定法による差は見られず、 β_N に従い誤差の平均値が変化している。各 β_N における誤差の標準偏差はいずれも 3 未満であった。奥行き値の真値は $2f$ であるから、誤差の標準偏差の相対値は 0.3% 未満である。

次に $f = 543.4$, $L_1 = L_2 = 200$, $\beta_N = 75$ 度として、 α_N を 0~150 度まで 30 度ずつ変化させ、 α_1 ごとに求めた、B の奥行き値の誤差の平均値を図 9(b) に示す。誤差の平均値は α_N によらず、 α_1 に応じて変化している。各 α_1 における誤差の標準偏差の相対値は 0.2% 未満であった。他の姿勢推定法についても同様の結果が得られた。

3.4 評価

はじめに姿勢計測法を比較する。視差直交化法では σ_β が β_N によらず一定であることから、この方法は β 成分の誤差を変えずに方向ベクトルを直交させる方法であると言える。しかし σ_α は β_N によって増大し、精度が低下する。3 自由度最適化は α に関する精度を保ちながら β に関する誤差を効果的に減少させており、最も高精度な方法である。1 自由度最適化は 3 自由度最適化にわずかに劣るものの、 β に関する誤差の軽減について同様な効果を示している。しかし 3 自由度最適化に対し 1/5 程度の演算量で、一定の速度で収束することから、本方法は最も実用的であると言える。但し、画像面と長方形が平行に近い場合には視差直交

化の方が精度が良いので、消失点から得られる姿勢について $\beta_N \geq 80$ となる場合には視差直交化を用いる。

次に位置推定では、姿勢推定法による差は見られないが、奥行き方向への傾きや、投影像の回転角によって誤差の平均値が変化する。誤差の標準偏差は小さいので、関数近似などによる補正が可能である。

最後に計測条件について考えると、長方形の縦横比は 0.35~0.65、投影像の面積率は 3% 以上が目安となる。フレーム画像を用いる方が精度が良いが、実装では対象の動きを考慮してフィールド画像を利用する。この場合、誤差の標準偏差は約 1.7 倍に増加する。投影像の面積率が等しい場合には、焦点距離が短く、画角が広い方が精度が良い。しかし、高精度化のためにレンズを広角にするには、マーカを大きくするか、被写体距離を短くして面積率を保つ必要がある。実際には計測対象に装着できるマーカの大きさと、計測レンジを考慮してレンズ設定を行う必要があり、それにより計測精度が定まる。同一の計測条件で精度を向上させるには、解像度の高いカメラを使用すること、より高性能なディジタイザを使用することが考えられる。

4. 実験

4.1 システム構成

小型汎用カメラ (AShin ASC-307M-AA, 以下カメラ 1) からの映像をパーソナルコンピュータ (Proside JD1994-50, 80486DX/50 MHz) 上のディジタイザ (Canopus Super CVI) で単色 256 階調、640×400 画素の画像として取り込む。また、精度比較のために高解像度で画像ひずみの少ないカメラ (SONY DXC-151 + Canon J6×11-1.4-II, 以下カメラ 2) からの画像による計測も行った。二つのカメラの主な仕様を表 1 に示す。

計測対象のマーカは内部を黒、縁取りを白で構成した。2 値化を行うウィンドウサイズは 256×256 とし、

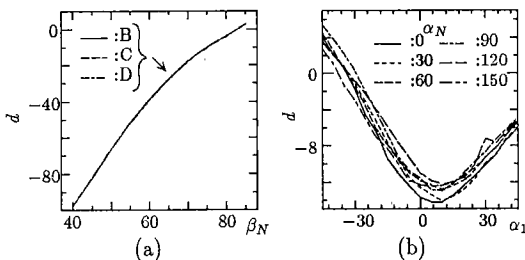


図 9 位置の計測精度
Fig. 9 Error of position estimation.

表 1 カメラの仕様
Table 1 Configurations of cameras.

項目	カメラ 1	カメラ 2
撮像素子	1/3" CCD	2/3" CCD
水平解像度	380 TV lines	460 TV lines
S/N 比	45 dB 以上	48 dB 以上
映像信号	NTSC (輝度)	RGB+sync.
焦点距離	3.6 mm	11.5 mm
画角	61 度	42 度
使用画像	フィールド	フレーム
サイズ	38 × 38 × 29 mm	65 × 50 × 170 mm
重量	20 g	520 g

表2 カメラパラメータ
Table 2 Camera parameters.

項目	カメラ1		カメラ2	
u_0, v_0	332.2745,	129.2260	234.1610,	65.0199
f_u, f_v	566.8152,	-528.1897	1084.9102,	-1196.4092
g_1, g_2	0.05500,	0.04960	0.01921,	-0.01664
g_3, g_4	-0.01315,	-0.01055	-0.07581,	0.00927
k_1	0.33253		0.14891	

表3 正方形パターン計測結果
Table 3 Results of measurements of square marker.

項目 [units]	カメラ1		カメラ2	
	3自由度	1自由度	3自由度	1自由度
$\sigma_{\alpha 1}$ [deg.]	0.082	0.023	0.147	0.168
$\sigma_{\beta 1}$ [deg.]	0.361	0.517	0.111	0.150
$\sigma_{\alpha 2}$ [deg.]	0.179	0.119	0.090	0.034
$\sigma_{\beta 2}$ [deg.]	0.467	0.360	0.153	0.103
d [mm]	20.667	20.791	20.348	20.317
σ_d [mm]	0.449	0.845	0.462	0.754

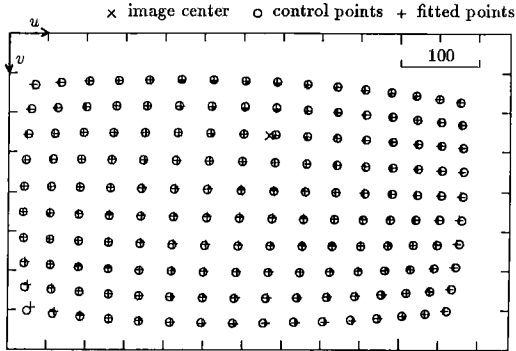


図10 カメラキャリブレーション結果の例
Fig.10 An example of camera calibration.

2 値化の固定しきい値は 128 とした。

カメラキャリブレーションは、 16×10 点の平面上の格子点を、法線方向に 30 mm ずつ移動させて得られた 480 点を制御点として実行した。Weng らの方法に従い [10]、100 回の反復から得られたカメラパラメータを表 2 に、カメラ 1 の画像の一例を図 10 に示す。カメラパラメータから求めた投影点と、制御点との距離の 2 乗平均は約 1 で、ひずみの大きい画像周辺部でも良好に補正されている。

4.2 精度計測実験

1 辺 80 mm の正方形マーカを法線方向に 20 mm ずつ計 80 mm 移動させ、姿勢と位置の計測を行った。カメラは、 $\beta_N \geq 45$ 度、投影面の面積率が 4~7% となるように設置した。この場合、計測対象領域は 48×32 cm 程度になる。姿勢計測では最適化を行う 2 方法を用いた。位置計測では対角線交点の移動量 s を求めた。方向成分の標準偏差と、移動量の平均と標準偏差を表 3 に示す。カメラ 2 の計測精度は、直交電磁界による方法と同等である [1]。

1 自由度最適化の α の標準偏差を見ると、カメラ 1 では α_1 の方が 1/5 程度小さい。このことより、カメラ 1 ではフィールド画像を用いているにもかかわらず垂直方向のエッジ検出精度が水平方向よりも高いと言

える。これは、水平解像度が低いことや、デジタル化の際の水平同期の問題などによるものと思われる。一方カメラ 2 では、水平解像度が高いこと、同期信号が独立であること、フレーム画像で計測したことなどの理由で、水平方向の検出精度が高い。

次に姿勢計測法を比較すると、3 自由度最適化では誤差の異方性が軽減され、いずれのカメラでも標準偏差が約 10% 縮小されている。また、移動量の標準偏差も 6~7 割小さくなっている。しかし、移動量の誤差に関しては有意の差は見られない。

最後に、カメラによる計測精度を比較する。カメラ 2 の方向成分の標準偏差はカメラ 1 の 1/3 程度になっている。移動量に関しては、誤差の平均値は 1/2 程度になっているが、標準偏差はほぼ等しい。シミュレーション結果より、フィールド画像ではフレーム画像より方向成分の標準偏差が約 1.7 倍になるので、カメラ 1 でフレーム画像を用いる場合の誤差の標準偏差は、0.3 程度になることが予想される。この場合、カメラ 2 との性能差は 1/2 程度まで小さくなる。

4.3 仮想ペンの位置・姿勢計測実験

カメラ 1 で、ペン握り部に取りつけた辺長 50 mm の正方形マーカの計測実験を行った (図 1 参照)。作業領域としては 30×20 cm を想定し、ペン握り部を動かしながら連続して 505 回の姿勢と位置の計測を行った。所要時間は 65.64 秒で、1 画像当りの処理時間は 130 ms、1 秒当りの処理画像数は約 7.7 枚であった。計測条件として、前後する画像間で投影面の領域が重なっていることを仮定している。理論上は水平方向について 350 mm/s の移動速度まで追従できることになる。計測開始時のマーカの位置は、ペンのホームポジションとなる位置を指定することで獲得する。図 1 のように、仮想物体はすべて画面内にあり、操作者は着座して物体操作を行うので、ペンを軸まわりに回転させる操作を除いてオクルージョンは生じない。

マーカを移動させずに計測を行った際の処理時間の

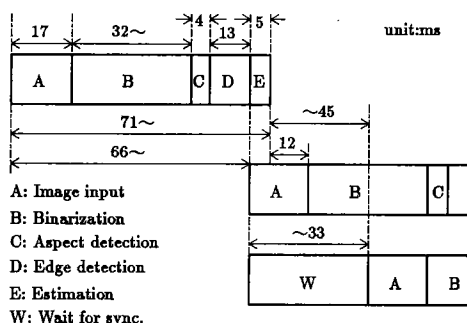


図 11 処理時間
Fig.11 Computational time.

詳細を図 11 に示す。A では 1 フィールド分の画像をデジタル化する。この処理はデジタル化上で、CPU の動作と無関係に実行される。B では 2.3 の処理を行っており、画像フレームとのメモリアクセス速度に依存する。C では 2.4 の処理、D では 2.5 の処理を行っている。D の処理時間は画像フレームとのメモリアクセス速度と実数の乗除算速度に依存する。E では 1 自由度最適化による姿勢推定と位置推定を行っており、数値演算速度に依存する。E では画像フレームを参照しないので、この処理の前に次の画像取り込みを開始する。このため、理想的な場合には最初の画像は 71 ms、次の画像からは 66 ms で処理され、理論上の処理レートは 15 画像/s となる。しかし、実際にはウィンドウ修正による B の処理時間の増加や、指定フィールド画像の入力のために生ずる最大 33 ms の同期待ちなどにより、処理レートが低下すると考えられる。

処理の高速化を考えた場合、問題となるのは B の処理である。しかし、2 値化アルゴリズムは簡単なので、専用のデジタル化を構成し、画像入力と同時に実行すれば A と B の処理時間は合計 17 ms となる。メモリアクセス速度と、CPU の演算能力の向上により C から E までの処理時間を合計 17 ms 未満にすれば、30 画像/s で処理可能となる。なお、CPU を Pentium/90 MHz とした場合の E の所要時間は 1 ms 未満であった。

5. むすび

画像処理を用いた位置と姿勢検出法として、1 自由度最適化による長方形マーカの計測法を提案し、シミュレーションと実画像の計測を行い有効性を示した。姿勢計測精度は、厳密な 3 自由度最適化よりも数%劣るが、収束速度が一定で高速な処理を実現できる。

実画像の計測では、画像ひずみの大きい小型カメラ

を用い、市販の装置だけでシステムを構成した。このシステムでは、姿勢計測について標準偏差 0.5 度、位置計測について標準偏差 0.8 mm の精度で、毎秒 7 枚以上の画像の計測が可能であった。また、分解能が高く、画像ひずみの小さいカメラを用いた場合、姿勢計測について標準偏差 0.2 度未満、位置計測について標準偏差 0.5 mm 未満の精度で奥行きを計測可能であることを示した。本システムでは画像処理を利用しているので、長方形内部に識別のためのコード情報を付加することにより複数の対象の計測へ容易に拡張できる。また、カメラのレンズを交換することで、計測対象の大きさや計測範囲の変更に対応できるので可塑性が高い。計測対象の部位にマーカを貼り付けるだけでよいので、運動視差表現のために観測者の頭部の計測や、仮想物体操作を行うための仮想ペンの計測などへ適用できる。更に、複数計測への拡張を行えば 1 台のカメラで頭部と仮想ペンなどを同時に計測することも可能である。

位置計測における誤差補正法の検討、視点位置計測や手指の計測への応用、専用ハードウェアの構成による処理の高速化が今後の課題である。

文 献

- [1] POLHEMUS 社, “3 SPACE FASTRAK カタログ,” 日商エレクトロニクス.
- [2] 石井郁夫, 五十嵐透, 大和淳二, 牧野秀夫, “視点移動に追従するステレオ像表示の一方法,” 信学論 (D-II), vol.J72-D-II, no.9, pp.1348-1355, Sept. 1989.
- [3] 石井郁夫, 柄沢達明, 牧野秀夫, “触覚機能をもつ仮想物体操作システム,” 信学論 (D-II), vol.J76-D-II, no.9, pp.1860-1867, Sept. 1993.
- [4] 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, PRU94-4, May 1994.
- [5] 中嶋正之, 柴 広有, “仮想現実世界構築のための指の動きの検出法,” 信学論 (D-II), vol.J77-D-II, no.8, pp.1562-1570, Aug. 1994.
- [6] 出口光一郎, “画像と空間,” 昭晃堂, 1991.
- [7] 尺長 健, “既知構造の単眼視姿勢推定における基本問題,” 情処学論, vol.35, no.11, pp.2308-2319, Nov. 1994.
- [8] 小野寺康浩, 金谷健一, “射影幾何学的補正によるサブ画素精度の直線あてはめ,” 情処研報, 90, 92, 1990.
- [9] 野村由司彦, 相良道弘, 成瀬 央, 井手敦志, “エッジ位置計測のサブピクセル化と誤差解析,” 信学論 (D-II), vol.J73-D-II, no.9, pp.1458-1467, Sept. 1990.
- [10] J. Weng, P. Choen, and M. Herniou, “Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation,” IEEE Trans. Pattern Anal. & Mach. Intell., vol.14, no.19, pp.965-980, Oct. 1992.

(平成 7 年 3 月 14 日受付, 8 月 14 日再受付)



高橋 章 (正員)

平3新潟大・工・情報卒。平5同大大学院修士課程了。同年同大大学院自然科学研究科博士課程進学。3次元情報計測、人工現実感インタフェースに関する研究を行っている。



石井 郁夫 (正員)

昭38新潟大・工・電気卒。同大・助手、助教授、教授を経て現在同大大学院自然科学研究科・教授。この間、電子回路、画像・図形処理等の研究に従事。現在、人工現実感、立体視、画像・図形処理装置などの研究を行っている。工博(東工大)。情報処理学会、日本ME学会各会員。



牧野 秀夫 (正員)

昭51新潟大・工・電子卒。昭53同大大学院修士課程了。同大・情報・助手、助教授を経て平7同教授、現在に至る。平1より1年間カナダ・トロント大にて生体信号処理の研究に従事。最近は、植込み型医用機器、人工現実感、画像処理などの研究を行っている。工博。日本ME学会、IEEE、電気学会各会員。



中静 真 (正員)

昭63新潟大・工・電子卒。平2同大大学院修士課程了。平5同大大学院自然科学研究科博士課程了。平5より新潟大・工・情報・助手、現在に至る。デジタル信号処理、特に時間・周波数解析と時間・スケール解析に関する研究に従事。工博(工学)。IEEE会員。