

複合現実感システムのためのテクスチャの局所特徴を用いた マーカー識別と方向推定

谷藤 誠† 菅谷 保之†

† 豊橋技術科学大学情報・知能工学専攻 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

E-mail: †{yato,sugaya}@iim.cs.tut.ac.jp

あらまし 円形マーカー内に描画したテクスチャからマーカー種類の識別とマーカーの方向を推定する手法を提案する。マーカー識別には画像から抽出した局所特徴を利用した Bag-of-Keypoints を利用する。局所特徴は画像のスケール変化、回転、照明変化にロバストであるが、射影変換などによる画像のゆがみには弱いという性質がある。本研究では、楕円検出によって得たマーカー外周の円情報を用いてマーカー内のテクスチャを真上から見た画像に変換して画像のゆがみをなくすことでマーカーの認識精度を向上させる。また、基準画像から得られる局所特徴量との対応づけを行い、基準画像とマーカーの相対的な回転量を求めることで、マーカー方向を推定する方法を提案する。最後に、実画像実験により提案手法の有効性を確認する。

キーワード 複合現実感, 円形マーカー, 局所特徴, Bag-of-Keypoints

1. はじめに

ARToolKit [5] をはじめとして、現在マーカーを利用した複合現実感システムが我々の身近な環境でも使用されるようになってきている。マーカーを利用した複合現実感システムの問題点の一つとしてマーカーの隠れの問題がある。ARToolKit では矩形マーカーを複数組み合わせることでこの問題に対応した。立野ら [8] は ARToolKit で用いられる矩形マーカーを拡張した入れ子型マーカーを提案し、隠れに対応しつつ画像中に写るマーカーの大きさに依らないロバストな動作を実現した。今泉ら [3] は中心と半径の異なる円を組み合わせた円形マーカーを提案し、楕円当てはめ手法を利用してマーカーを検出することでマーカーの隠れに対応した。また、このマーカーを複数組み合わせることで、カメラの位置姿勢推定を安定化させるとともに、その中の一部のマーカーが完全に隠蔽された場合でも観測されたマーカーのみからカメラの位置姿勢を推定することが可能である。この手法では、複数のマーカーを色によって識別しているため、マーカー数が増えるとマーカー間の色の差異が小さくなり、識別が困難になるという問題がある。

本研究では円内にテクスチャを描画した円形マーカーを設計し、テクスチャから抽出した局所特徴量を用いた Bag-of-Keypoints [2] によってマーカーの種類を識別する。Bag-of-Keypoints は SIFT [6] や SURF [1] などの局所特徴の集合を画像特徴として画像認識を行う手法である。そのため、画像の一部が隠れていても高い認識結果が得られる利点があり、同じように隠れに強い円形マーカーとの親和性が高い。しかし、SIFT や SURF などの局所特徴は画像のスケール変化や回転に不変であるが、アフィン変換や射影変換などの画像のゆがみには不変でな

いため、学習画像と認識対象の画像とのゆがみが大きい場合には認識精度が低下することが考えられる。そこで本研究では、楕円検出によって得たマーカー外周の円情報を用いてマーカー内のテクスチャを真上から見た画像に変換して画像のゆがみをなくすことでマーカーの認識精度を向上させる。

また、今泉らの円形マーカーではマーカー内の二つの円の中心を結んだ方向をマーカーの方向と定義し、これによってカメラの位置姿勢を推定していた。マーカー方向の推定精度を上げるには二つの円の中心間の距離が大きいたことが望まれる。一方、テクスチャからマーカーを精度よく認識するためにはできるだけマーカー内にテクスチャが大きく写っていることが望まれるが、この二つを同時に満足することは非常に困難である。そこで、画像の回転に影響されることなく得られる局所特徴の方向に注目する。まず向き基準となる画像を用意し、この基準画像と識別画像との間で抽出した局所特徴の対応づけを行う。そして、対応づけられた局所特徴間の方向の角度差からマーカー方向を推定する。これにより、テクスチャのみからマーカー識別とマーカーの方向推定が可能となる。

第 2 章では本研究で構築する複合現実感システムの概要について述べる。第 3 章では、円形マーカーを検出する手法について述べ、第 4 章では円形マーカーを識別する手法について述べる。第 5 章では、楕円を円に変換する射影変換行列の導出方法とカメラの位置姿勢を推定する手法について述べる。そして、第 6 章で静止画像を用いた実験を示し、円形マーカーの識別、カメラの位置姿勢推定が正しく行えているかを確認する。また、複数の画像を用いた実験によって各処理の精度を確認した結果について述べる。最後に、第 7 章でまとめを行う。



図 1 本研究で使用する円形マーカー

2. 提案マーカーを用いたカメラの位置姿勢推定

本研究で使用する円形マーカーを図 1 に示す。マーカー外側の一定範囲は楕円当てはめ手法を用いた楕円検出によって安定してマーカーを検出できるように均一色とする。また、検出した楕円がマーカーであるかを判定する際にも、この領域内の色情報を利用する。また、内側のテクスチャ領域は Bag-of-keypoints によるマーカー種類の識別とマーカー方向の推定に使用する。

本手法では、まず楕円検出によってマーカー候補を検出し、得られた楕円パラメータから仮のカメラ位置姿勢を計算する。円の投影像である楕円から得られるのは、その円が乗っている支持平面の法線ベクトルのみであるため、カメラの光軸方向を支持平面に投影した方向に仮の軸を定めることで一時的に仮の世界座標を定義し、カメラの位置姿勢を計算する。次に、得られたカメラの位置姿勢をもとにマーカー候補領域を真上から見た視点に射影変換する。そして、マーカー外側の均一色を調べることで検出した候補がマーカーであるかを判定する。

検出したマーカーに対して、歪みを除去したマーカー内のテクスチャから局所特徴を抽出して、予め作成しておいた学習データをもとに Bag-of-keypoints によってマーカー種類の識別を行う。マーカー識別の結果をもとに予め用意したマーカーの方向基準画像と局所特徴の対応づけを行い、検出したマーカーの基準画像からの回転量を計算する。この回転量からマーカーの向きを計算し、世界座標系を一意に定めてカメラの位置姿勢を計算する。

以下に提案マーカーを用いたカメラの位置姿勢推定の手順を示す。

(1) 入力画像からエッジ検出を行い、連結したエッジ点列を抽出する。

(2) 抽出したエッジ点列に対して楕円当てはめを行い、楕円パラメータを求める。

(3) 楕円パラメータから仮のカメラ位置姿勢を計算する。

(4) 入力画像をマーカーの真上から見た見え方に変換する射影変換を求め、画像を変換する。

(5) マーカー外側の均一色から検出した楕円がマーカーであるかを判定する。

(6) マーカー内側のテクスチャから Bag-of-keypoints によりマーカー識別を行う。

(7) 基準画像と検出画像から SURF 特徴量を検出し、特徴量の対応づけを行う。

(8) 対応づけられた特徴量の方向の差からマーカーの方向を決定する。

(9) 求めたマーカーの方向をもとにカメラの位置姿勢を計算する。

3. 楕円当てはめによる楕円検出

画像から抽出したエッジ点の座標を次の 3 次元ベクトルで表現する。

$$\boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} x/f_0 \\ y/f_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、 f_0 は仮の焦点距離である^(注1)。このとき、楕円の方程式は次のように書ける。

$$Ax^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2f_0(Dx + Ey) + Ff_0^2 = 0 \quad (2)$$

ここで 6 次元ベクトル $\boldsymbol{u}, \boldsymbol{\xi}$ を

(注1): 実験ではカメラ校正によって求めたカメラの焦点距離を用いた。

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} A & B & C & D & E & F \end{pmatrix}^T \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\xi} = \begin{pmatrix} x^2 & 2xy & y^2 & 2f_0x & 2f_0y & f_0^2 \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

と置けば、式 (2) は次のように書ける。

$$(\mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}) = 0 \quad (5)$$

以下、ベクトル \mathbf{a} , \mathbf{b} の内積を (\mathbf{a}, \mathbf{b}) と書く。

誤差のある点列 (x_α, y_α) , $\alpha = 1, \dots, N$ に対して楕円を当てはめる最も簡単な方法は最小二乗法である。これは式 (5) の表現を用いて次の残差平方和を最小にするパラメータベクトル \mathbf{u} を求めるものである。

$$J_{LS} = \sum_{\alpha=1}^N (\mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}_\alpha)^2 = (\mathbf{u}, M_{LS} \mathbf{u}) \quad (6)$$

ただし、 M_{LS} は次のように置いた。

$$M_{LS} = \sum_{\alpha=1}^N \boldsymbol{\xi}_\alpha \boldsymbol{\xi}_\alpha^T \quad (7)$$

よく知られているように、式 (6) の 2 次形式を最小にする解 $\hat{\mathbf{u}}$ は行列 M_{LS} の最小固有値に対する単位固有ベクトルを計算すればよい。ただし、式 (2) は 2 次曲線の式であるから、楕円以外の双曲線や放物線が当てはまることもある。そこで当てはめによって得られたパラメータの中から、 $AC - B^2 > 0$ を満たし、かつ次式で定義する楕円までの垂直距離の 1 次近似 [7] の平均があるしきい値^(注2)よりも小さいものを楕円として検出する。

$$J = \frac{1}{2N} \sum_{\alpha=1}^N \sqrt{\frac{(\mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}_\alpha)^2}{(\mathbf{u}, V_0[\boldsymbol{\xi}_\alpha] \mathbf{u})}} \quad (8)$$

ここで $V_0[\boldsymbol{\xi}_\alpha]$ は式 (4) で定義したデータベクトル $\boldsymbol{\xi}_\alpha$ の正規化共分散行列を表す。

また、検出した楕円の中には同一円上に複数の楕円が検出されたり、極端につぶれた楕円が含まれることがある。そこで検出した楕円から楕円中心、長軸と短軸の長さをそれぞれ計算し (具体的な計算方法は付録 1, 2 を参照)、次の処理を行う。

- 楕円の長軸 a と短軸 b の比 b/a があるしきい値^(注3)よりも小さい場合は、検出した楕円から削除する。
- 楕円中心間の距離があるしきい値よりも小さい場合は、式 (8) の値が最小となる楕円パラメータのみを残して、検出した楕円から削除する。

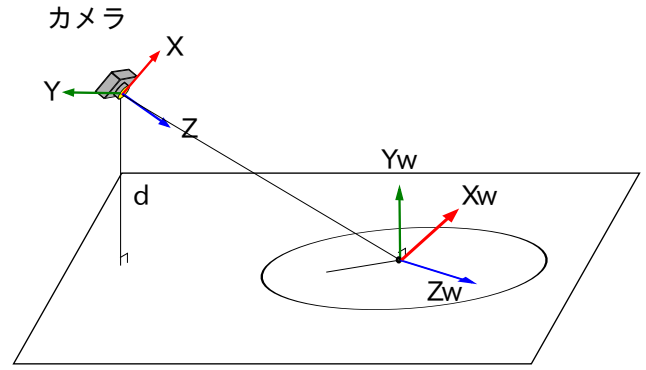


図 2 カメラ座標系と世界座標系

4. 仮のカメラ位置姿勢の推定

楕円検出によって得られた楕円パラメータを用いて、それを撮影したカメラの仮の位置姿勢を計算する。ここでは、カメラのレンズ中心を原点として、光軸方向を Z 軸、垂直方向を X 軸とするカメラ座標系 (図 2 中の XYZ) を考える。また、仮の世界座標系はマーカの円の中心を原点として、円の乗っている支持平面の法線方向を Y 軸、カメラの光軸方向を指示平面に射影した方向を Z 軸と定義する (図 2 中の $X_w Y_w Z_w$)。カメラの位置姿勢推定に必要なカメラの焦点距離や円の半径は既知であるとす。

3 次元空間中の円の投影像である楕円からは、その円が乗っている支持平面の法線ベクトルのみしか得られないため、ここではカメラの光軸方向を支持平面に投影した方向に仮の軸を定めることで一時的に仮の世界座標系を定義する。まず、楕円当てはめによって得た楕円パラメータから、その支持平面の法線とカメラ座標系における円の中心座標を計算する方法 [4] をまとめる。

(1) 楕円パラメータベクトル \mathbf{u} を並べ替えた次の 3×3 行列 Q を定義し、行列式が -1 になるように正規化する。

$$Q = \begin{pmatrix} A & B & D \\ B & C & E \\ D & E & F \end{pmatrix} \quad (9)$$

(2) Q の固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 、それに対応する単位固有ベクトル $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$ を計算する。ただし、 $\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0 > \lambda_3$ とする。

(3) 支持平面の単位法線ベクトル \mathbf{n} を式 (10) のように計算する。

$$\mathbf{n} = \mathcal{N} \left[\sqrt{\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}} \mathbf{v}_1 \pm \sqrt{\frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_1 - \lambda_3}} \mathbf{v}_3 \right] \quad (10)$$

ここで、 $\mathcal{N}[\mathbf{a}]$ はベクトル \mathbf{a} のノルムを 1 とする正規化作用素である。

(注2): 実験ではしきい値は経験的に 1 とした。

(注3): 実験ではしきい値は経験的に 0.3 とした。

(4) 式 (10) で得られる解のうち, $n_1 \geq 0, n_3 \leq 0$ となる解を選択する.

これは, 円を見下ろしても見上げて画像として同じであるためであり, $n_1 \geq 0, n_3 \leq 0$ となる解は見下ろす解となる. ここで, n_i はベクトル n の第 i 成分を表す.

(5) カメラのレンズ中心から支持平面までの距離 d を式 (11) により求める.

$$d = \sqrt{\lambda_2^3 r} \quad (11)$$

ここで, r は円の半径を表す.

(6) 画像中の円の中心位置方向を指すベクトル x_c を式 (12) により求める.

$$x_c = \mathcal{Z}[Q^{-1}n] \quad (12)$$

ここで, $\mathcal{Z}[a]$ は 3 次元ベクトル a の第 3 成分を 1 に正規化する正規化作用素である.

(7) カメラ座標系から見た円の中心位置を表すベクトル r_c を式 (13) により求める.

$$r_c = \frac{dx_c}{(-n, x_c)} \quad (13)$$

次に世界座標系の原点を円の中心, Y 軸を支持平面の法線方向, Z 軸をカメラの光軸方向を支持平面に投影した方向に定め, カメラの位置姿勢を計算する. 計算手順を以下に示す.

(1) 支持平面の法線ベクトル n を Y_w とする.

$$Y_w \leftarrow n \quad (14)$$

(2) Z_w を次のように計算する.

$$Z_w = \mathcal{N}[(I - Y_w Y_w^\top)k] \quad (15)$$

ここで, I は 3×3 単位行列, $k = (0, 0, 1)^\top$ である.

(3) X_w を Y_w と Z_w に直交する方向に定める.

$$X_w = Y_w \times Z_w \quad (16)$$

ここで, $a \times b$ はベクトル a, b の外積を表す.

(4) カメラの回転行列 R と並進ベクトル t を次のように定める.

$$R \leftarrow \begin{pmatrix} X_w & Y_w & Z_w \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$t \leftarrow r_c \quad (18)$$

5. 視点変換のための射影変換の算出

3 次元点 P を世界座標系から見た座標とカメラ座標系から見た座標をそれぞれ w, w_c とする. ここで二つの座標間には次の関係が成り立つものとする.

$$w_c = R w + t \quad (19)$$

ただし, R はカメラの回転行列, t は並進ベクトルを表す. 同様に仮想カメラのカメラパラメータが R', t' であるとき, 仮想カメラから見た点 P の座標 w'_c は次のようになる.

$$w'_c = R' w + t' \quad (20)$$

式 (19) を式 (20) に代入すると次式を得る.

$$w'_c = R' R^\top (w_c - t) + t' \quad (21)$$

ここで, 指示平面上の点 $w = (X, 0, Z)^\top$ について考える. この点の画像座標を (x, y) とし, そのベクトル表現を $x = (x/f_0, y/f_0, 1)^\top$ と表す. ベクトル x を用いると式 (19) は次のように書ける.

$$w_c = \frac{dx}{(-n, x)} \quad (22)$$

式 (22) を式 (21) に代入すると次式を得る.

$$w'_c = \frac{d}{(-n, x)} \left(R' R^\top + \frac{(R' R^\top t - t') n^\top}{d} \right) x \quad (23)$$

また, 仮想カメラからの投影像のベクトル表現 x' と w'_c との関係式 $x' = \mathcal{Z}[\text{diag}(1, 1, f_0/f') w'_c]$ より, x と x' の間には次の関係が成り立つ. ただし, f' は仮想カメラの焦点距離, $\mathcal{Z}[\cdot]$ はベクトルの第 3 要素を 1 とする正規化作用素を表す.

$$x' = \mathcal{Z} \left[\frac{d}{(-n, x)} \text{diag}(1, 1, \frac{f_0}{f'}) \left(R' R^\top + \frac{(R' R^\top t - t') n^\top}{d} \right) x \right] \quad (24)$$

ここで $\mathcal{Z}[\cdot]$ の性質から定数を省略して次のように書ける.

$$x' = \mathcal{Z}[Hx],$$

$$H = \text{diag}(1, 1, \frac{f_0}{f'}) \left(R' R^\top + \frac{(R' R^\top t - t') n^\top}{d} \right) \quad (25)$$

以上より H は 2 画像間の射影変換行列を表すことがわかる. したがって, 仮想カメラがマーカーの真上に位置するようにパラメータ R', t' を定めることで, 楕円として投影されたマーカー画像の歪みを解消する射影変換を得ることができる.

6. Bug-of-keypoints によるマーカー識別

マーカー種類の識別はマーカー内部のテクスチャを利用した Bag-of-keypoints によって行う. 認識の流れは一般的な Bag-of-keypoints による画像識別と同様であるが, 本研究では射影による局所特徴の変化に対応するために,



図3 局所特徴の方向を利用したマーカーの方向推定. 左:基準画像の局所特徴の方向, 右:入力検出した画像の局所特徴の方向.

識別に使用するテクスチャ領域を前節で求めた射影変換によって真上から見た視点に変換して識別を行う.

マーカーの真上に設定する仮想カメラのパラメータは, 射影変換後のマーカー領域が一定の大きさになるように設定する. これによりマーカー外側の均一色領域の大きさがわかるので, 入力画像から色相値を計算してしきい値処理を行いマーカー色と判定された画素数がマーカーに隠れない場合の75%以上であった場合に検出した領域をマーカーであると判定する. 検出した領域がマーカーであった場合, マーカー内側のテクスチャ領域を抽出して Bag-of-keypoints によりマーカー認識を行う.

7. マーカー方向の推定とカメラ姿勢の再推定

マーカーの方向推定は, 予め用意した方向の基準となる画像と入力画像から検出したマーカー領域を射影変換した画像間で局所特徴量の対応づけを行い, 基準画像の局所特徴の方向との角度差からマーカーの回転を求めることを行う(図3). ただし, 局所特徴の誤対応や方向推定の安定化のために, 対応づけられた複数の局所特徴から得られるマーカーの回転角を投票して, 最多得票を得た角度をマーカーの回転角度とする. また, 前節で説明した射影変換は仮の世界座標系の Z 軸が仮想カメラの X 軸(垂直上向き)に一致するように定める. 以下にマーカー方向推定の手順を示す.

(1) 射影変換したテクスチャ領域から SURF によって局所特徴 $v_\alpha, \alpha = 1, \dots, N$ を検出する.

(2) 基準画像の局所特徴 $u_\beta, \beta = 1, \dots, M$ と v_α との差のノルムがしきい値よりも小さく, かつ最小となる組み合わせ (v_α, u_β) を対応点とする.

(3) 得られたすべての対応点について, SURF 特徴の方向の差の投票を行い^(注4), 最多得票を得た角度差 ϕ をマーカーの回転角度とする.

次に局所特徴の対応付けから得たマーカーの回転角度を実際の3次元空間でのマーカーの方向に反映させ, その方向を世界座標系の Z 軸とするために次式の変換を行う.

(注4): 実験では角度差を2度刻みで量子化して投票を行った.

$$Z_w = \mathcal{N}[(I - Y_w Y_w^T) R l] \quad (26)$$

ただし, $l = (\sin \phi, 0, \cos \phi)^T$ と定義した. 再計算した Z 軸から式(16)により X 軸も再計算して, カメラの回転行列を更新する.

8. 実験

8.1 実験環境

以下の実験では, Point Gra Research 社のカメラ GRAS-50S5C-C を用いて入力画像の大きさは 1024×768 画素とした. カメラの焦点距離は Zhang [9] の方法によって予め計測した値 $f = 2100$ 画素/mm を用いた. また, マーカーには図1に示す8種類のテクスチャを持つマーカーを使用し, 半径は60mmとした.

マーカー認識に使用する Bag-of-keypoints の学習データは, 8種類のマーカーに対して様々な位置から撮影したマーカー画像を真上からの視点に射影変換したものをマーカーごとに100枚用意して学習データとした. そして, 学習データから SURF により局所特徴を抽出して K-means 法により局所特徴のクラスタリングを行い, visual word を作成した. 実験では visual word のクラスタ数を経験的に50とした.

8.2 実画像実験

実画像に対して提案手法を適用してマーカー検出からカメラの位置姿勢推定を行う実験を行った. 実験では図1に示した8種類のマーカーを使用した.

図4(a)は一つのマーカーを撮影した入力画像である. これに対して Canny オペレータによってエッジ検出を行い(図4(b)), 楕円当てはめによって楕円を検出した結果が図4(c)である. 次に当てはめた楕円パラメータから仮の世界座標系を定め(図4(d)^(注5)), マーカー領域を真上から見た視点に射影変換したものを図4(e)に示す. 実験では射影変換後のマーカー領域が 500×500 画素の画像に収まるように並進ベクトルの大きさを設定した. この結果から射影変換によってマーカーが真上から見た視点に正しく変換されていることがわかる.

図4(f)は図4(e)からテクスチャ領域のみを抽出した結果である. このテクスチャ画像を入力として Bag-of-keypoints によるマーカー識別およびマーカーの方向推定を行った. 図4(i)は対応づけした特徴点について局所特徴から得られるマーカーの回転角度を投票したヒストグラムである. 誤対応の影響で間違った角度にも投票されているが, 正しい角度に投票が集中しており, 最多得票の角度を採用することでマーカーの回転角度が推定できている. 図4(g)は推定したマーカー方向をもとに世界座標系を計算して描画したもので基準画像の上方向(図3

(注5): 実際は Z 軸は画像面上方向であるが, 視認性をよくするために 180° 回転して表示している

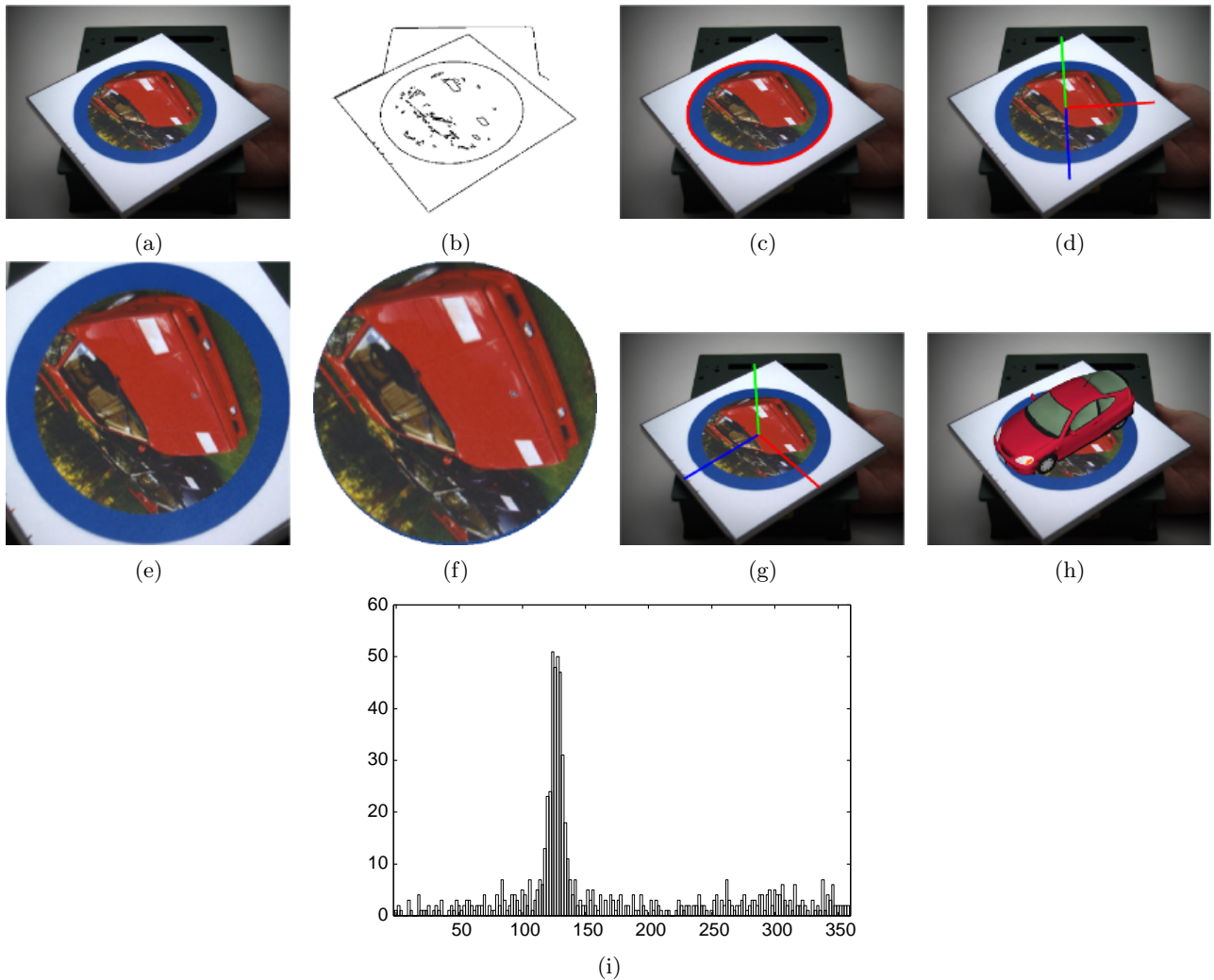


図4 提案マーカーを用いたCG合成までの実験結果。(a) 入力画像, (b) エッジ画像, (c) 検出した楕円, (d) 仮の世界座標系, (e) マーカー領域の射影変換, (f) 検出したテクスチャ領域, (g) 推定した世界座標系, (h) マーカー識別結果に応じたCG合成, (i) マーカー方向の投票結果

を参照)に正しく軸が設定されている。また、図4(h)は計算したカメラの位置姿勢をもとにマーカーの種類の応じたCGを合成した画像である。

図5はマーカーの一部を指で隠した画像例である。このような隠れがある場合でも楕円当てはめによって正しく楕円を検出し、Bag-of-keypointsによって正しいマーカーが識別できている。マーカーの方向推定に関しても、一部の局所特徴が隠れても安定して動作していることが確認できる。図6は画像中に複数のマーカーが存在する例である。この例でもマーカー検出からマーカーの方向推定まで正しく動作していることがわかる。

8.3 精度評価実験

次にマーカーの識別精度およびマーカーの方向推定精度の評価実験を行った。実験画像はマーカーごとに図7に示す4種類の視点からそれぞれ100枚撮影した画像を使用した。まず入力画像からマーカー検出を行い、正しくマーカーと判定したものに対してマーカー識別と方向

推定を行った。

表1にマーカー検出率およびマーカー識別率を示す。表1の結果より、高い精度でマーカーを検出できていることがわかる。また、マーカー識別も比較的高い精度で行えていることがわかる。今回の実験ではマーカー認識を単純な学習データとの距離の比較によって行っているため、SVMなどの識別器を用いて識別することによって更なる精度の向上が期待できる。表2は検出したマーカーに対して方向推定を行った結果を示したものである。方向推定の精度評価は、正しい方向との角度差が5度以内、5度以上15度以内、15度以上の基準を設けて目視で行った。実験結果からほとんどの場合で推定したマーカーの角度が5度以内の誤差に収まることわかった。

9. おわりに

本稿では円形マーカー内に描画したテクスチャからマーカー種類の識別とマーカーの方向を推定する手法を提案した。提案手法では、Bag-of-keypointsによるマ-

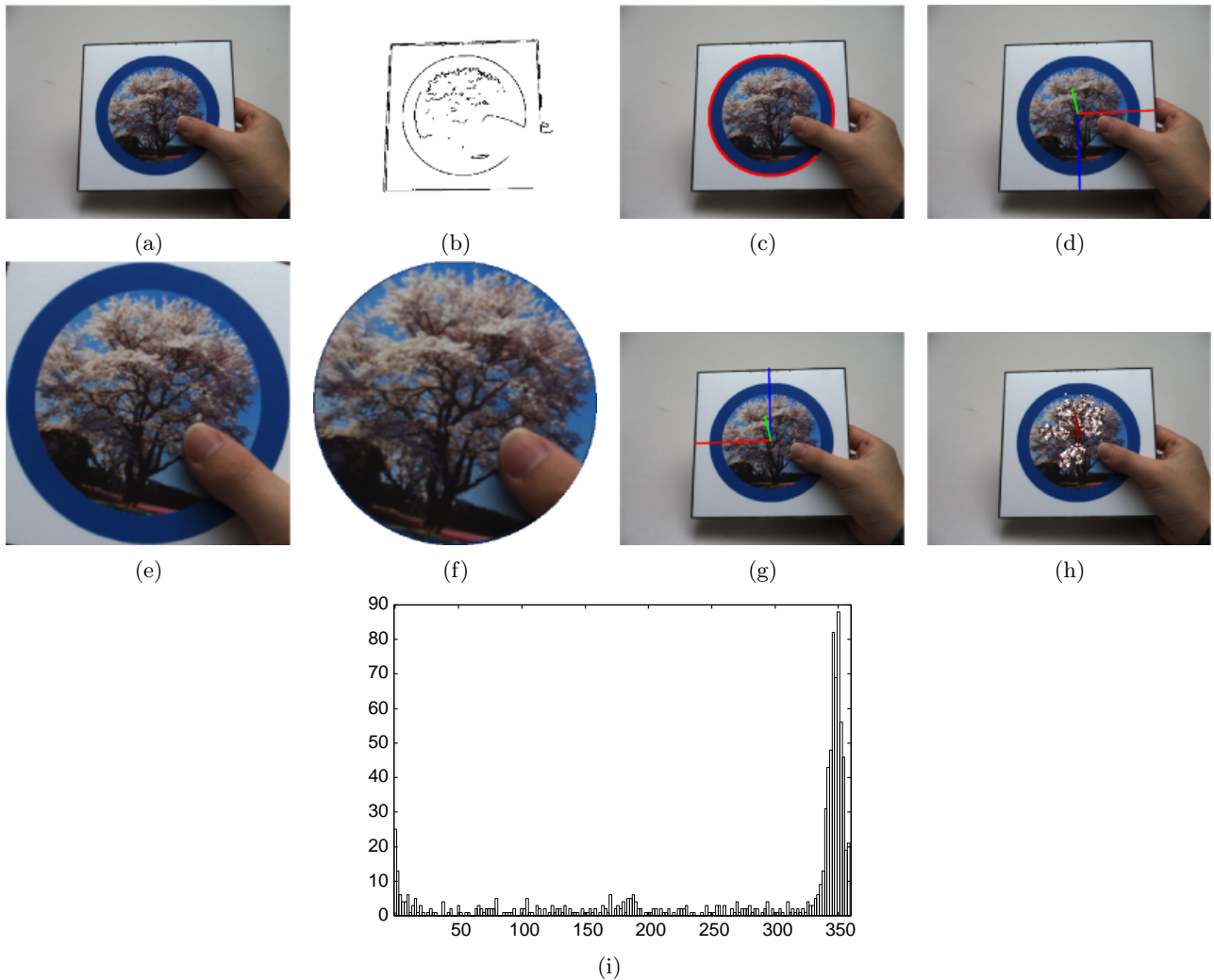


図 5 隠れのある入力に対する実験結果. (a) 入力画像, (b) エッジ画像, (c) 検出した楕円, (d) 仮の世界座標系, (e) マーカー領域の射影変換, (f) 検出したテクスチャ領域, (g) 推定した世界座標系, (h) マーカー識別結果に応じた CG 合成, (i) マーカー方向の投票結果

表 1 マーカーの検出率と識別率

マーカー種類	図 1(a)	図 1(b)	図 1(c)	図 1(d)	図 1(e)	図 1(f)	図 1(g)	図 1(h)
検出率	99.25	99.25	100	100	99.5	98.75	98.75	99.75
識別率	100	92.70	91.5	98.75	100	99.75	99.0	95.24

表 2 マーカー方向推定の精度

マーカー種類	図 1(a)	図 1(b)	図 1(c)	図 1(d)	図 1(e)	図 1(f)	図 1(g)	図 1(h)
5 度以内の誤差	100	99.50	96.25	100	99.75	100	99.50	97.49
15 度以内の誤差	0	0.50	2	0	0.25	0	0.50	2.26
15 度以上の誤差	0	0	1.75	0	0	0	0	0.25

カー識別において、楕円検出によって得たマーカー外周の円情報を用いてマーカー内のテクスチャを真上から見た画像に変換して画像のゆがみをなくすことでマーカーの認識精度の低下を抑えた。また、基準画像から得られる局所特徴量との対応づけを行い、基準画像とマーカーの相対的な回転量を求めることで、マーカーの向きを推定した。実画像実験により提案手法が実画像に対して有

効に動作することを確認するとともに、マーカーの認識精度およびマーカーの方向推定の精度を検証した。

文 献

- [1] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. V. Gool, SURF: Speeded Up Robust Features, Proc. of 9th European Conference on Computer Vision(ECCV2006), pp. 404–417, 2006.

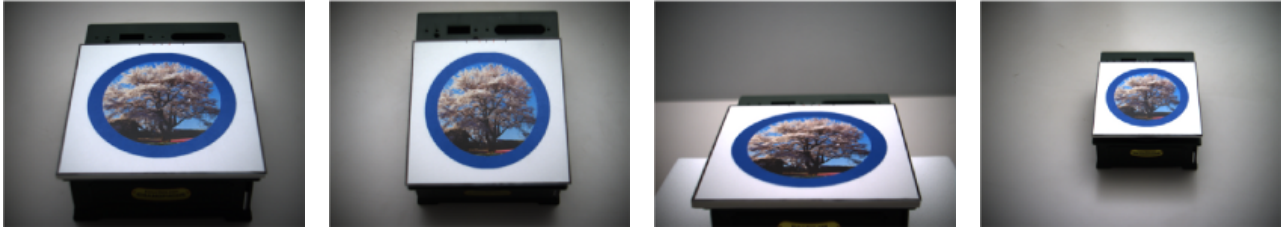


図 7 精度評価実験に使用した画像例

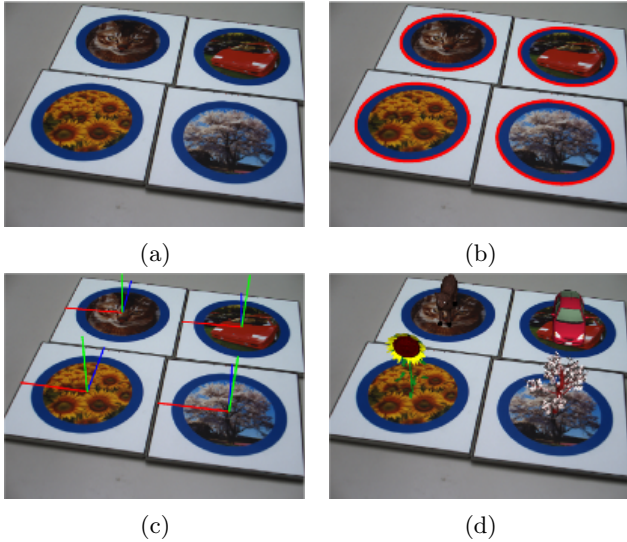


図 6 複数のマーカー存在する入力に対する実験結果. (a) 入力画像, (b) エッジ画像, 検出した楕円, (c) 推定した世界座標系, (d) マーカー識別結果に応じた CG 合成

- [2] G. Csurka, C. R. Dance, L. Fan, and C. Bray, Visual categorization with bags of keypoints, Proc. of 8th European Conference on Computer Vision(ECCV2004), pp. 1–22, 2004.
- [3] 今泉一崇, 小林大起, 菅谷保之, 複数の円形マーカーを用いた複合現実感システムの構築, 第 16 回画像センシングシンポジウム (SSII10) 講演論文集, pp. IS2-19, 2010.
- [4] K. Kanatani, *Geometric Computation for Machine Vision*, Oxford University Press, Oxford, U.K., 1993.
- [5] 加藤博一, M. Billinghurst, 浅野浩一, 橘啓八郎, マーカー追跡に基づく拡張現実感システムとそのキャリブレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 TVRSJ, Vol. 4, No. 4, pp. 606–616, 1999.
- [6] D. Lowe, Distinctive image features from scale-invariant keypoints, Proc. of International Journal of Computer Vision(IJCV), 60(2), pp. 91–110, 2004.
- [7] 菅谷保之, 有馬利洋, エッジ点の分割とモデル選択を用いた統合による楕円検出, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2009, pp. 198–205, 2009.
- [8] 立野圭祐, 北原格, 大田友一, 視点移動自由度の大きい拡張現実感のための入れ子型マーカー, 電子情報通信学会研究会報告, MVE2006-46, pp. 19–24, 2006.
- [9] Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, Technical Report MSR-TR-98-71, Microsoft Research, 1998.

付録 1 楕円中心の計算

2次元ベクトル r, c と 2×2 対称行列 S を次のように置く.

$$r = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, c = \begin{pmatrix} D \\ E \end{pmatrix}, S = \begin{pmatrix} A & B \\ B & C \end{pmatrix} \quad (27)$$

ただし, A, B, C, D, E は式 (3) で定義する楕円パラメータである. これらを用いると式 (2) は次のように書き直せる.

$$(r, Sr) + 2f_0(c, r) + Ff_0^2 = 0 \quad (28)$$

楕円中心を表すベクトルを $r_c = (x_c, y_c)^T$ とし, 式 (30) を $-r_c$ だけ平行移動すると次のようになる.

$$(r + Sr) + 2(Sr_c + f_0c, r) + (r_c, Sr_c) + 2f_0(c, r_c) + Ff_0^2 = 0 \quad (29)$$

この楕円の中心は原点であるはずだから, 次式を満たす.

$$Sr_c + f_0c = 0 \quad (30)$$

楕円では行列 S は正則であるため, 楕円中心 r_c は次のようになる.

$$r_c = -f_0S^{-1}c \quad (31)$$

付録 2 楕円の長軸短軸の計算

式 (30) は式 (33) を用いると次のように書ける.

$$(r - r_c, S'(r - r_c)) = 1 \quad (32)$$

ただし, $S' = S / ((r_c, Sr_c) - Ff_0^2)$ と置いた. ここで, 行列 S' の固有値 λ_1, λ_2 に対応する正規直交系を $\{u_1, u_2\}$ とし, 楕円をその主軸方向が座標軸に平行になるように中心 r_c 回りに回転すると次のように書ける.

$$\lambda_1(x - x_c)^2 + \lambda_2(y - y_c)^2 = 1 \quad (33)$$

従って, 楕円の長軸と短軸の長さ a, b は次のように書ける.

$$a = 1/\sqrt{\lambda_1}, \quad b = 1/\sqrt{\lambda_2} \quad (34)$$

ただし, $\lambda_1 \leq \lambda_2$ とした.