

環境カメラを用いた複合現実感のための モバイルカメラの位置・姿勢推定

濱田 修平[†] 北原 格[‡] 亀田 能成[‡] 大田 友一[‡]

[†] [‡] 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
E-mail: [†] hamada@image.esys.tsukuba.ac.jp, [‡] {kitahara|kameda|ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

あらまし 環境カメラ画像中の特徴量を用いて、同じ空間を撮影しているモバイルカメラの位置・姿勢の推定を行う手法を提案する。SIFT を用いて 2 台の環境カメラ画像間の対応点を求め、ステレオ法によりそれらの 3 次元座標を算出することにより、3 次元座標と見え方情報 (SIFT-Key) から構成されるランドマークデータを獲得する。モバイルカメラ画像においても同様に SIFT の抽出を行い、ランドマークデータとのマッチングを行うことにより、モバイルカメラの位置・姿勢を推定する。提案手法は、ランドマークの 3 次元座標の事前測量やビジュアルマーカの設定等を必要としない、照明変動などの環境変化にロバストであるという特長を有する。

キーワード 複合現実感, キャリブレーション, SIFT, モバイルカメラ

Pose Estimation of a Mobile Camera by using Environmental Cameras for MR

Shuhei HAMADA[†] Itaru KITAHARA[‡] Yoshinari KAMEDA[‡] and Yuichi OHTA[‡]

[†] [‡] Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

E-mail: [†] hamada@image.esys.tsukuba.ac.jp, [‡] {kitahara|kameda|ohta}@iit.tsukuba.ac.jp

Abstract This paper proposes a method for estimating the pose of a mobile camera by using SIFT features extracted in multiple environmental images. Corresponding points between two environmental images are detected by using SIFT-Key points, and the 3D information of the corresponding points is estimated to apply stereo vision algorithm. A data-set of landmark points is generated by combining the estimated 3D information and the appearance information (SIFT-Key). We also extract SIFT-Key points in the mobile image. The camera parameters of the mobile cameras are estimated to detect the correspondence between the data-set and the mobile camera by using SIFT-Key. Our approach has the following advantages. (1) It does not require prior knowledge of captured scene geometry or setting visual markers. (2) It is not affected by changing the appearance of the environment such as lighting condition and moving objects.

Keyword *Mixed Reality, Calibration, SIFT, Mobile camera.*

1. はじめに

現実空間の見え方にコンピュータグラフィックスを用いて生成した仮想空間の見え方を重畳して提示する複合現実感(Mixed Reality: MR)は、医療・福祉、作業支援、ナビゲーションなど様々な分野での応用が期待され、活発な研究開発が行われている[1].

現実空間と仮想空間の幾何的整合性を実現することは、複合現実感の実現における重要な課題である。これまで、環境に特定のビジュアルマーカを設置してそれをカメラで撮影する手法[2]や、3次元センサを併用する手法[3]などが開発されているが、実際の利用を考えた場合、特殊なセンサを用いず、画像中に写りこんだ自然特徴量を手がかりに位置合せを行う手法がより好ましいと考えられる。我々は、環境カメラで撮影

した画像中に存在する特徴量を利用することにより、3次元位置センサやビジュアルマーカを用いることなく、モバイルカメラの位置・姿勢を推定する手法の研究に取り組んでいる。

2. カメラの位置・姿勢推定

2.1. 関連研究

MRにおける幾何的整合性の実現手段として、ビジュアルマーカが広く用いられている。加藤らは、特定形状のマーカを利用し、カメラとマーカの相対的位置関係を算出するARToolkitを開発した[2]。この手法は効率よく幾何的整合性を実現するが、撮影距離が近距離に限られており、また、ビジュアルマーカ

が撮影対象中に存在しなければならないという制限がある。

佐藤らは、磁気センサとビジュアルマーカを併用し、磁気センサの精度不足をビジュアルマーカで、ビジュアルマーカの隠れに対する弱さを磁気センサで補い合う手法を開発している[4]。この手法により推定精度は向上するが、特殊なセンサを必要とするため、センサの観測範囲内でしか機能しない。

人工のビジュアルマーカを用いずに、画像中の特徴点を用いる位置合わせ手法としては、連続したビデオシーケンス中で特徴点の追跡を行い、その軌跡情報に因子分解法を適用する手法があげられる[5]。しかしこの手法を用いてカメラの位置合わせを行うためには、シーケンス中での対応点情報が必要であるため、移動物体の写り込みによって推定精度が極端に低下する、更に、スチルカメラで撮影した単一フレームの画像情報には適用できない。

あらかじめ撮影対象物体の CAD モデルを用意しておき、モデルベースでカメラの位置合わせを行う手法は推定精度が高く有効であるが、そのような精密なモデルは簡単に入手・生成できるものではなく、利用は、対象物体が簡単にモデリングできる場合か、大型建築など膨大な労力を費やして精密な CG モデルを生成することが許されるような場合に限定されてしまう。

これら従来研究に対して、提案する位置合わせ手法の特徴は、(1)撮影対象中に人工マーカを必要としない、(2)特殊なセンサや3次元モデルが不要なためシステム設置環境に制限が少なくユーザは広範囲の移動が可能である、(3)環境カメラで同時に撮影した画像を用いるため、照明変化や移動物体の写り込みなど環境の変化に対してロバストである、(4)被写体の大きさや種類を限定しないことがあげられる。

2.2. 提案手法

提案手法の撮影環境を図1に示す。位置・姿勢の推定に必要な入力情報は、モバイルカメラで撮影した画像と同じタイミングで撮影した2台のキャリブレーション済み環境カメラ画像のみであるため、簡易な構成で取得可能である。

図2に本手法の処理の流れを示す。まず、カメラキャリブレーション済みの環境カメラの画像中から抽出した SIFT-Key を用いて2台の環境カメラ画像の対応点探索処理を行う。この際、カメラ間のエビポラ拘束を用いて誤対応点の軽減を行う。ステレオ法を用いて SIFT-Key の3次元座標を推定することにより、見え方情報 (SIFT-Key) と3次元座標を関連づけた3次元情報付特徴点群を生成する。次に、モバイルカメラ画像の SIFT-Key の抽出を行い、その SIFT-Key と3次元

情報付特徴点群との SIFT-Key との マッチング処理を行う。この際、特徴点のオリエンテーション情報を用いて誤マッチングの削除を行う。3次元空間中の空間点とその画像上での投影点の組み合わせから、モバイルカメラの射影変換行列を算出し、位置・姿勢を推定する。求めたカメラの位置・姿勢を用いて、空間中の任意の場所で撮影したモバイル画像において MR 提示が可能となる。

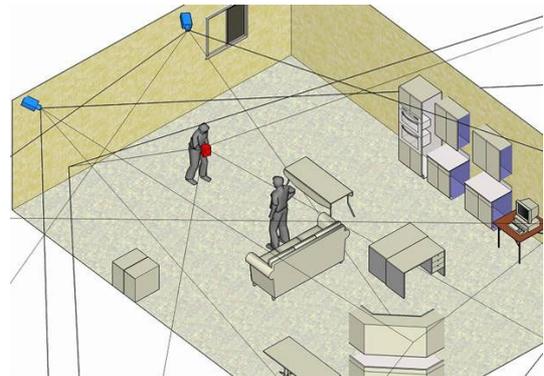


図 1：撮影環境

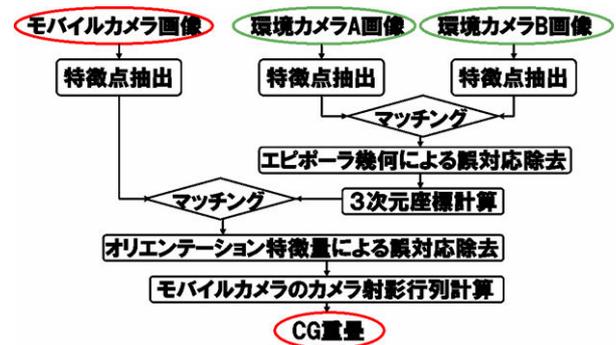


図 2：処理の流れ

特徴量の抽出には、David G. Lowe によって提案された SIFT アルゴリズム[6]を用いる。SIFT は画像の拡大縮小、回転、照明変動、視点の変化に強く、特徴点のマッチングは最近傍法によって効果的に行うことができる。これは、提案手法の目標とする広範囲な環境での使用に適している、またモバイルカメラの画像と環境カメラの画像に対し、その位置関係やカメラの光学的特性の違いによる見え方の変化にロバストなマッチング処理が期待できる。

3. 3次元情報付特徴点群の生成

本節では、3次元情報付特徴点群の生成の手順について述べる。

1. カメラキャリブレーション処理により環境カメラの射影変換行列を求める。
2. 環境カメラ画像において SIFT-Key の抽出を行う。

3. SIFT-Key を用いたマッチング処理により対応点を求める。
4. 環境カメラ間のエピポラ拘束を用いて誤対応点を除去する。
5. 1. で求めたカメラ射影変換行列と 3. で求めた対応点からステレオ方により SIFT-Key の 3 次元座標を求める。

以下、上記手順の説明を順に行う。

3.1. カメラキャリブレーション

環境カメラに対してあらかじめキャリブレーション処理を行い、以下の式で表される画像中の 2 次元座標 (u, v) と 3 次元世界座標 (X_w, Y_w, Z_w) の射影関係 (射影変換行列 P) を算出する。

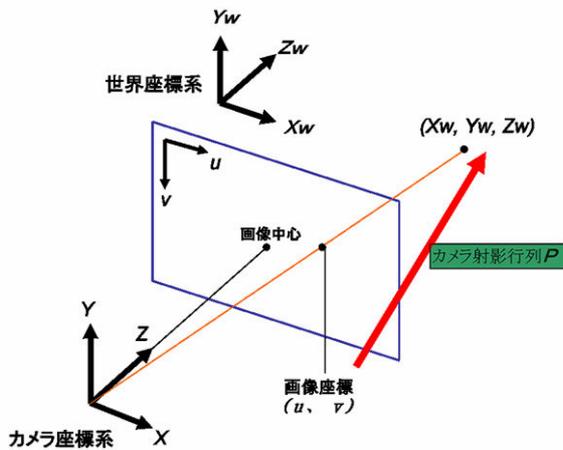


図 3 : カメラ射影変換行列

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \sim P \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで“ \sim ”はその両辺が定数倍の違いを許して等しいことを意味する。

3.2. SIFT特徴点の抽出

環境カメラで撮影した画像に対して、特徴点の抽出を行う。本研究での特徴点抽出には SIFT[6]を用いる。一般的な画像に対し、図 4 のように数千個の特徴点抽出が可能であり、この特徴量を用いることにより図 5 に示すような精度の高いマッチング処理が可能である。

特徴となる候補点は Difference of Gaussian (DOG) を用いて抽出される。対象となる画像に異なるスケールのガウシアンフィルタを適用し、それらのうち隣接する画像の差分から DOG 画像を生成する。このように

して、スケールスペース内の極値に基づく特徴点抽出を行うことにより、特徴点の位置と特徴点が発見されたスケールが得られる。記述子としては、輝度勾配の方向ヒストグラム[6]を用い、ベストな状態で 128 次元の特徴量が得られる。これによって、それぞれの特徴点について、 x 座標、 y 座標、回転角、スケール、128 次元の特徴量をもつ SIFT-Key が獲得される。抽出した特徴量は平行移動、スケールに対し不変であり、最も頻度の高い輝度勾配の方向を基準とした回転角は回転に不変である。また、ある程度のアフィン変換に対しても不変性を保つ[7]。さらに、ノルムの正規化により、輝度の線形変換に対しても不変である。

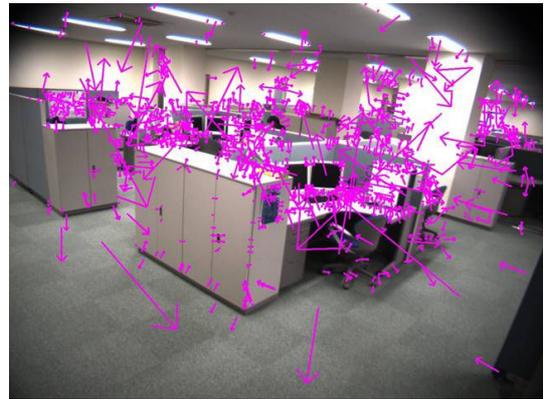


図 4 : SIFT 特徴点抽出

3.3. 特徴点のマッチング

SIFT-Key どうしのマッチングは、SIFT-Key 特徴量の最近傍探索処理によって行う。特徴量間の類似度を表す尺度 (距離) として、記述子間のユークリッド距離を用い、距離が最小となるものからマッチングの候補とする。高次元ベクトルでの Key の探索はとても複雑であるが、 k -d 木探索[8]を基にした、Best-Bin-First (BBF) アルゴリズムを用いることにより、効率的に高確率で最近傍の対応点を見つけることができる。この際、マッチングの信頼性を高めるために、2 番目に近い特徴量を用いたマッチング結果の評価を行う。任意に設定したしきい値よりも、最小距離の候補と 2 番目の候補との距離が大きいことを条件とし、そうでない場合を破棄することによってマッチング精度を高めている。これにより、環境カメラ画像間での対応点探索が実現される。

3.4. エピポラ幾何による誤対応の削減

SIFT は精度の高いマッチング処理が可能であるが図 5 を見てもわかるとおり、似た特徴点間が存在する場合、間違っただ対応づけを行うことがある。環境カメラ映像間のマッチングにおけるこのような誤対応は、誤った 3 次元座標情報の復元につながり、カメラパラ

メータ推定の精度を大きく低下させる原因となる．そこで本手法では，カメラ間のエピポーラ拘束を用いて誤対応の削減を行う．



図 5 : SIFT 特徴点でのマッチング

図 6 にエピポーラ幾何の概念を示す．エピポーラ拘束下では，ある点のもう一方の画像における対応点は，その点を通る視線をもう一方の画像に投影したときにできる直線（エピポーラ線）上に制限されることが知られている．環境カメラのキャリブレーション情報から与えられる基礎行列 F を用いてエピポーラ方程式 $\tilde{m}'^T F \tilde{m} = 0$ を算出する．SIFT によって獲得した対応点の画像座標を m, m' に代入し，エピポーラ方程式が成り立たない組を誤対応と判断する．

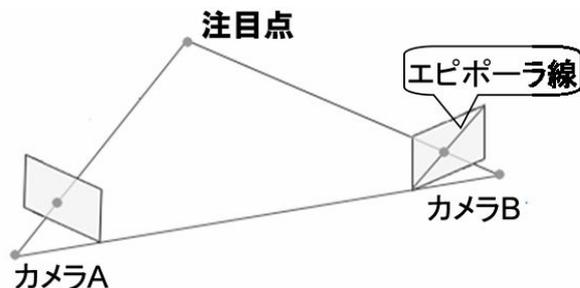


図 6 : エピポーラ幾何

カメラキャリブレーションで求められるレンズの歪み情報を考慮することにより，エピポーラ線の推定精

度の向上が期待される．しかし，予備的に行った精度検証実験では，幾何的な計算精度は向上するものの，レンズ歪みを補正した画像を用いた場合の SIFT マッチングは補正前の画像に比べ対応点数の減少や精度の低下が確認された．これは，歪み補正で行った画像処理により，SIFT の記述子に変化してしまったことが原因と考えられる．そこで本手法では，マッチング処理は補正を施さない画像で行い，エピポーラ線方程式および誤対応削除の判定の計算においてレンズ歪み補正を反映させる手順をとる．レンズ歪みの補正式は以下の通りである．

$$\begin{aligned} x &= (\tilde{x} - c_x) / f_x \\ y &= (\tilde{y} - c_y) / f_y \\ r^2 &= x^2 + y^2 \\ x' &= \frac{x - 2p_1xy - p_2(r^2 + 2x^2)}{1 + k_1r^2 + k_2r^4} \\ y' &= \frac{y - p_1(r^2 + 2y^2) - 2p_2xy}{1 + k_1r^2 + k_2r^4} \end{aligned} \quad (2)$$

このとき x, y はカメラ座標上の歪みを含む点， \tilde{x}, \tilde{y} は画像座標上の歪みを含む点， $(c_x, c_y), (f_x, f_y)$ が各画像中心と焦点距離， $(k_1, k_2), (p_1, p_2)$ はそれぞれ半径方向，円周方向の歪み係数， x', y' がカメラ座標上の歪みを補正した点である．歪み係数は格子状パターンを複数枚撮影することにより算出した．図 7 に環境カメラ LR 映像において各画素を補正後の座標値へ投影した結果を示す．レンズの歪みが正しく補正されていることがわかる．



図 7 : レンズ歪み補正

図 5 での SIFT マッチング処理結果に対して提案手法を適用し，誤った対応除去を行った結果を図 8 に示す．誤対応が除去され正しい対応のみが残っていることが確認できる．

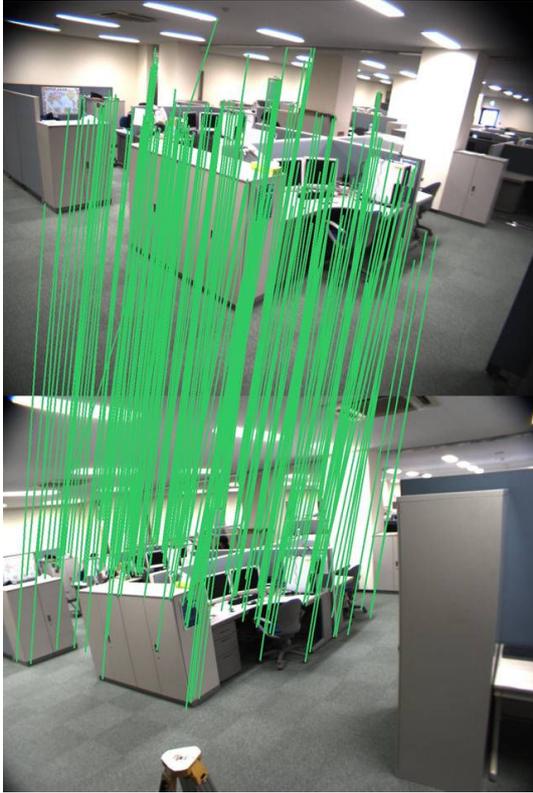


図 8：エピポーラ幾何による誤対応除去結果

3.5. 3次元座標の推定

互いに平行ではない2台のカメラで撮影した2枚の画像において、共通の対応点が観測されている場合、その対応点の3次元座標 $M = [X, Y, Z]^T$ は、両カメラの射影変換行列から推定することができる。本手法では、3.1節で紹介したカメラキャリブレーション手法によって環境カメラの射影変換行列を求め、さらに環境カメラ画像に対して3.3節で説明したようにSIFT マッチングを行い、画像間の対応点情報を得ている。そこで、これらを用いて以下の手法でSIFT 特徴点間の対応点の3次元座標を求める。図9に示すように、2枚の画像中の対応点 $m = [u, v]^T$ と $m' = [u', v']^T$ が既知であれば、 $s\overline{m} = P\overline{M}$, $s'm' = P'M$ の2式が得られる。ここで \overline{m} , \overline{m}' , \overline{M} は m, m', M の同次ベクトルである。また、 s, s' は奥行きを表すスカラーであり、 P, P' 々のカメラの射影変換行列である。

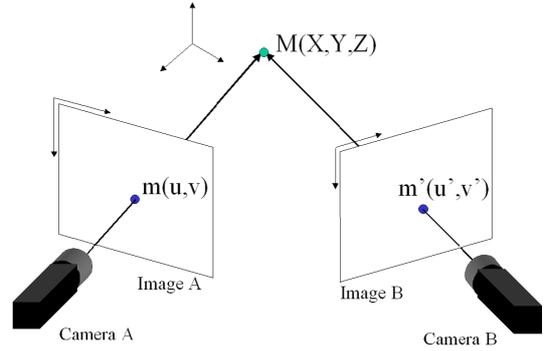


図 9：2視点画像からの3次元位置の推定

この2式から、次の式が導かれる。

$$BM = b \quad (3)$$

ここで、

$$B = \begin{bmatrix} up_{31} - p_{11} & up_{32} - p_{12} & up_{33} - p_{13} \\ up_{31} - p_{21} & up_{32} - p_{22} & up_{33} - p_{23} \\ u'p'_{31} - p'_{11} & u'p'_{32} - p'_{12} & u'p'_{33} - p'_{13} \\ u'p'_{31} - p'_{21} & u'p'_{32} - p'_{22} & u'p'_{33} - p'_{23} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$b = [p_{14} - up_{34}, p_{24} - vp_{34}, p'_{14} - u'p'_{34}, p'_{24} - v'p'_{34}]^T \quad (5)$$

であり、 p_{ij}, p'_{ij} はそれぞれ P, P' の i 行 j 列の要素である。この式は、方程式の数が未知数より多いため、方程式が全て線形独立ならば厳密な解が存在しない。そこで、解の誤差を最小にする疑似逆行列 $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ を用いて、 $M = B^+ b$ とすることで、対応点の3次元座標 $M(X, Y, Z)$ を求めることができる。これによって、SIFT-Key の3次元座標が求まる。全てのSIFT 特徴点について3次元座標情報を推定することにより、撮影空間中の3次元情報付きSIFT データセットが獲得される。

4. モバイルカメラの位置・姿勢推定

モバイルカメラの位置・姿勢の推定処理は、以下の手順で行う。

1. モバイルカメラ画像よりSIFT 特徴量を抽出する。
2. 1.で抽出したSIFT 特徴点と3.5節で説明した3次元情報付特徴点群とのSIFT-Keyを用いたマッチングをおこなう。
3. 特徴点のオリエンテーション情報を用いて誤ったマッチングを除去する。
4. マッチした点の画像上の座標と3次元情報付特徴点群での3次元座標の関係からモバイルカメラの射影変換行列を求め、位置・姿勢を推定する。SIFTによる特徴点の抽出およびマッチングは3.2,

3.3 節で説明した手法をモバイルカメラ画像に対し同様にを行う。

4.1. オリエンテーション情報を用いた誤対応の削減

SIFT のオリエンテーション情報を用いて、3次元情報付特徴点群とモバイルカメラ画像における誤った SIFT マッチングを削減する。SIFT の特徴点の抽出では画像の勾配情報からオリエンテーションの特徴量が求まる。同じタイミングで撮影された2つの画像の間で対応点の勾配情報の差は一定であると仮定する。また予備調査実験の結果、3次元情報付特徴点群とモバイルカメラ画像でのマッチングにおいて、誤った対応が発生する数は全体の2割程度であることがわかった。そこで SIFT でマッチングした特徴点同士のオリエンテーション値の差をすべての対応において計算し、そのメディアン値（中間値）の値を基準角度とし、その値から一定閾値以上はなれた角度を持つマッチングを誤った対応であると判断し削除した。

図 10 がオリエンテーションによる誤対応の削減を行う前の3次元情報付き特徴点群とモバイルカメラ画像のマッチング、図 11 が削減後のマッチングである。提案手法により、誤ったマッチングを正しく削除できていることがわかる。

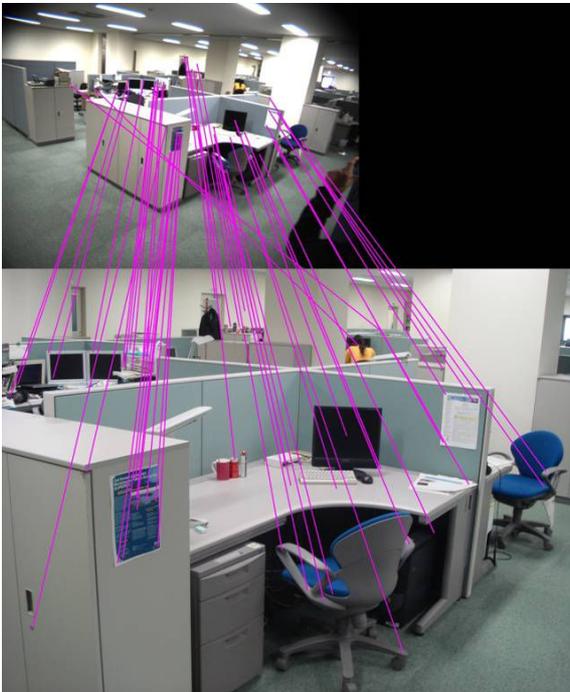


図10：環境カメラとモバイルカメラ画像のマッチング

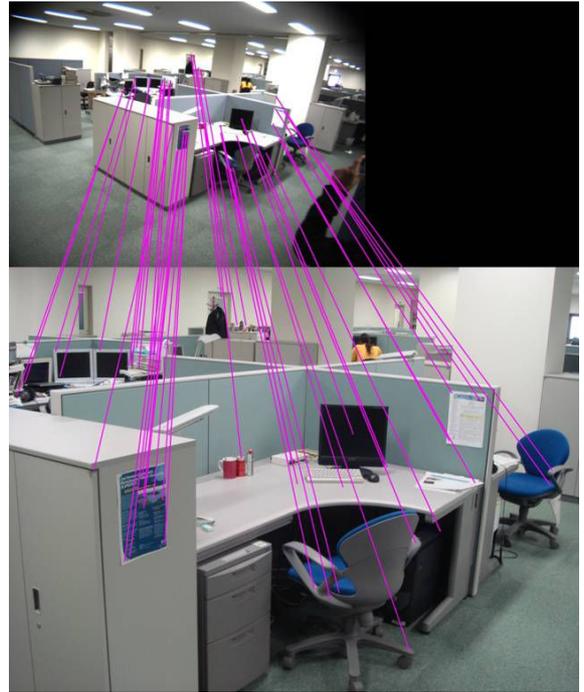


図 11：オリエンテーション情報による誤対応除去の結果

4.2. カメラ射影変換行列の計算

上述した処理より、モバイルカメラ画像中の2次元座標と撮影空間の3次元座標の対応点の組が求まる。3.1 節(1)式より座標 (u, v) を求めると以下のような式になる。

$$u = \frac{p_{11}X_w + p_{12}Y_w + p_{13}Z_w + p_{14}}{p_{31}X_w + p_{32}Y_w + p_{33}Z_w + p_{34}} \quad (6)$$

$$v = \frac{p_{21}X_w + p_{22}Y_w + p_{23}Z_w + p_{24}}{p_{31}X_w + p_{32}Y_w + p_{33}Z_w + p_{34}} \quad (7)$$

3.1 節の(1)式は、任意の定数倍を許した方程式であるため、そこから求められる行列 \mathbf{P} には定数倍の不定性が残る。そこで、 $p_{34} = 1$ とおき、残りの \mathbf{P} の各要素について整理すると以下のような式になる。画像上の位置 (u, v) とそれに対応する空間中の位置 (X_w, Y_w, Z_w) が得られれば、上式のように、 \mathbf{P} の各要素に関する2つの方程式が得られる。未知数の数は全部で11個 $(p_{11}, p_{12}, \dots, p_{33})$ なので、既知の位置座標の組が最低6個あれば、カメラ射影変換行列 \mathbf{P} を求めることができる。以上の処理により、モバイルカメラの射影変換行列が求まる。このようにして計算し

た射影変換行列により，撮影空間の任意の3次元座標がモバイルカメラ上で観測される2次元座標を求めることが可能となり，複合現実感が実現される．また $P=A(R|t)$ の関係を用いて射影変換行列をカメラの内部パラメータと回転行列 R 平行移動ベクトル t に分解することができる．この分解により，カメラの位置と姿勢が推定される．

5. 実験

5.1. 実験環境

撮影実験で用いたカメラは，モバイルカメラとしてコンパクトデジタルカメラ Sony DSC-T30 を，環境カメラとして IEEE-1394 デジタルカメラ Point Grey Research Scorpion を 2 台使用した．設置環境は屋内で，環境カメラは，1.4[m] の高さに平行に 1[m] 程度の間隔を空けて同空間を撮影する向きで設置した．画像サイズはモバイルカメラが 2592 画素×1944 画素，環境カメラが 1280 画素× 960 画素である．

5.2. モバイルカメラの射影変換行列の獲得

環境カメラのキャリブレーションには，GML C++ Camera Calibration Toolbox [9] を使用した．任意に指定した大きさのチェスボードパターンの白黒格子パターンを複数枚撮影したものを入力として与えることで，カメラの内部パラメータおよびレンズの歪み係数を推定した．撮影範囲内に存在する特徴的な 30 点の 3 次元測量を行い，それらの観測座標との組み合わせ情報より射影変換行列を求めた．

次に，環境カメラ画像間での SIFT 特徴点の抽出，及びマッチングを行った．環境カメラ L の画像で 1283 点，環境カメラ R の画像で 1225 点の特徴点を抽出し，マッチングにより 246 点の対応点を獲得した．さらに，エピポーラ幾何による誤対応の削減により 21 点が削除され環境カメラ間の対応は 225 組となった．獲得した対応点とキャリブレーションより求めたカメラ射影変換行列より，対応点の 3 次元座標を算出した．

モバイルカメラ画像での SIFT 特徴点の抽出を行い図 12 に示すように，3522 点の特徴点を抽出した．さらに，環境カメラの SIFT 特徴点間の対応点と，モバイルカメラの SIFT 特徴点のマッチングを行う．環境カメラ L の画像に対し 52 組の対応点を獲得した．図 11 に示すように，オリエンテーション情報による誤対応の削減を行った結果 6 組が除去され，48 組を正しい対応として得た．

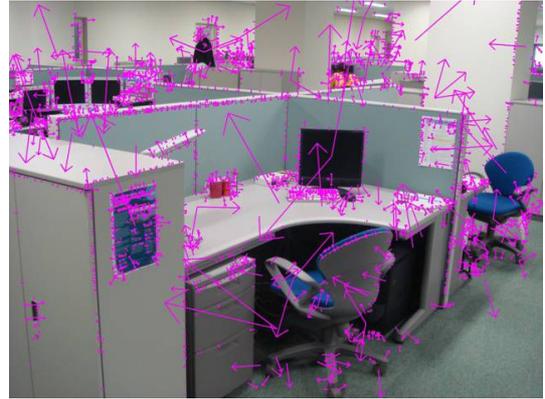


図 12：モバイルカメラでの特徴点抽出結果

空間中の 3 次元座標と画像上の 2 次元座標の正しい対応点が最低 6 組以上あれば，カメラ射影変換行列を求めることができるので，獲得した対応点の組から最小 2 乗法を用いてモバイルカメラのカメラ射影変換行列を求めた．

さらに，獲得したカメラ射影変換行列を用いて，実空間上での机上の 3 次元座標を与えて計算される 2 次元座標でモバイルカメラ画像上に CG を重畳させた結果画像を図 13 に，他の視点での撮影画像への重畳結果の例を図 14 に示す．同位置への CG 重畳が実現されていることがわかる．



図 13：CG 重畳結果 A



図 14 : CG 重畳結果 B



図 15 : 推定精度の評価

6. 位置合わせ精度の検証

提案手法によるモバイルカメラの位置・姿勢推定の精度を検証するため、撮影環境中の机の上に CG 重畳位置を合わせの目安となるマークを配置し投影誤差を測定した。配置したマーク 3 次元位置を測量し、提案手法で推定したカメラ位置でその 3 次元位置を与えた CG 重畳を行い、画像上での位置のずれを計測した。図 15 に CG 重畳例を示す。重畳座標は机の上の 2 つの正方形型マークの中心点である。

複数の撮影画像において上記の測定を行った結果重畳位置の誤差は VGA(640×480)の画像サイズにおいて平均 16 画素であった。この誤差の最も大きな原因は環境カメラのキャリブレーション精度にあると考えられる。環境カメラにおけるキャリブレーションに用いた点での再投影誤差はそれぞれ環境カメラ L で平均 6 画素、環境カメラ R で平均 11 画素である。これらのキャリブレーション精度が向上すれば上記の測定での位置合わせの精度も向上すると考えられる。

7. おわりに

本研究では、環境カメラから得られる情報を用いてモバイルカメラの位置・姿勢を推定する手法を提案した。SIFT 特徴量を用いて撮影環境の 3 次元情報を持った特徴点群を生成することにより、様々な環境下にロバストに対応可能で、モバイルカメラ 1 台と環境カメラ 2 台のみの構成でモバイルカメラのカメラ射影行列を求め、世界座標上で任意の位置に CG 重畳を行うことができた。

文 献

- [1] Y. Ohta, and H. Tamura, “Mixed Reality – Merging Real and Virtual Worlds-”, Ohmsha, Ltd. 1999.
- [2] H. Kato, M. Billinghurst, I. Poupyrev., K. Imamoto, and K. Tachibana, “Virtual object manipulation on table-top AR environment”, International Symposium on Augmented Reality, pp.111-119, 2000.
- [3] S. Feiner, B. MacIntyre, and D. Deligmann, “knowledge-based augmented reality”, Comm. CM, vol.36, no.7, pp.53-63, 1993.
- [4] 佐藤清秀, 田村秀幸, “複合現実感における位置合わせ手法”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU 2002) 論文集 1, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, vol.2002, no.11, pp.1.61-1.68, July 2002.
- [5] C. Tomasi and T. Kanade, “Detection and Tracking of Point Features,” CMU Tech. Rep. CMU-CS-91-132, April 1991;
- [6] David G. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features,” International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece (September 1999), pp. 1150-1157.
- [7] David G. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features,” International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece (September 1999), pp. 1150-1157.
- [8] J. S. Beis and D. G. Lowe. Shape indexing using approximate nearest-neighbour search in high-dimensional spaces. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 1000-1006, 1997.
- [9] <http://research.graphicon.ru/calibration/gml-c-camera-calibration-toolbox-5.html>