

## 高速・簡易カメラキャリブレーションによる 複合現実感画像の合成

### Mixed Reality Image Synthesis using Fast Camera Calibration

○富沢肇, 出口光一郎

○Hajime Tomizawa, Koichirou Deguchi

東北大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Tohoku University.

キーワード: コンピュータビジョン (computer vision), 複合現実感 (mixed reality), 透視3点問題 (perspective 3 point problem), カメラキャリブレーション (camera calibration),

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学 大学院 情報科学研究科  
システム情報科学専攻 出口・岡谷研究室

Tel.: (022)217-7017, Fax.: (022)217-7017, E-mail: tomizawa@fractal.is.tohoku.ac.jp

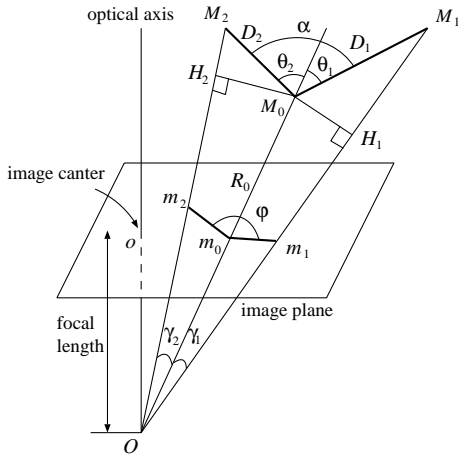
#### 1. はじめに

複合現実感 (MR: Mixed Reality) とは, カメラなどによって取り込まれる画像に, コンピュータ上の仮想的な物体を重ねてディスプレイなどに表示することによって, あたかもそこに (仮想的な) 物体が存在するかのような感覚を与える技術をいう. これは, リアルタイムで, カメラからの画像に対して空間的につつまが合うように仮想物体を表示することで, 実現することができる. このような複合現実感画像によって, 実際の画像のみから得られる情報を増強し, より多くの情報を得ることが可能となる.

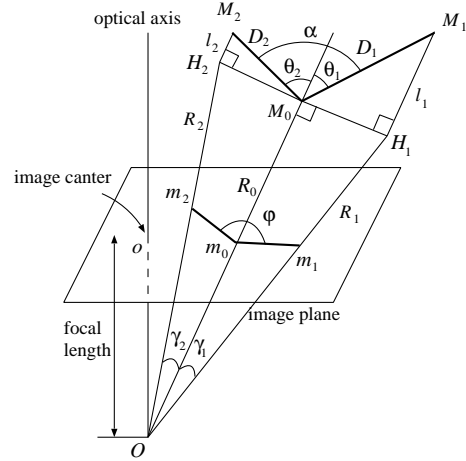
複合現実感画像を得るためには, カメラから得られる実画像に対して, どこへどのように仮想物体を埋め込むかという位置合わせの問題がある. これは, 物体に対するカメラの位置, 姿勢を時々刻々求める, 逆に言えば, カメラに対する物体の位置を求めるリアルタイムのカメラキャリブレーションの問題に帰着さ

れる. この問題を克服するためにさまざまな手法が検討されているが<sup>1)</sup>, 画像中の物体の3次元形状がある程度既知である場合, 透視3点問題を解くことによってその3点の画像座標からキャリブレーションを行うことができることが知られている<sup>2)</sup>. しかし, 透視3点問題は4次方程式を解かなければ厳密な解を得ることができず, このような高次方程式の解を得るためには, Newton-Raphson法などの収束計算を行う必要がある. これは, リアルタイムで画像処理を行う場合に, 計算時間が問題となる. そこで, 多少の誤差は生じるものの, 透視3点問題を近似的に解くことで, 解を計算する手法が提案されている<sup>3)</sup>. この手法では, 本来4次方程式を解く問題を2次方程式を解く問題にすることができ, これによって大幅に計算時間を削減することができる.

本研究では, この透視3点問題の近似解法を用いることによって, 高速にカメラキャリブレーションを行



(a)Exact Perspectiveモデル  
(厳密な透視投影モデル)



(b)Orthographicモデル  
(近似を用いた透視投影モデル)

Fig. 1 透視投影モデル

い、リアルタイムで複合現実感画像を生成するシステムを作成して、これを検証した。

## 2. 高速・簡易カメラキャリブレーション

### 2.1 透視3点問題

Fig. 1(a)に空間中の3点  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  についての厳密な透視投影モデルである, Exact Perspectiveモデルを示す。

透視3点問題は, 空間に3点  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  があり, それが画像平面で  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  と投影されている場合, これよりカメラの位置と姿勢を求める問題である。これは, 相対的にカメラ中心  $O$  に対する3点  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  の空間位置を決定することと等しい。

ここで, 画像より  $m_0$ ,  $m_1$ ,  $m_2$  の座標を得ることができ, また, カメラの内部パラメータがキャリブレーションされている場合, 焦点距離  $f$  が既知であるから,  $\angle m_0Om_1$  の角度  $\gamma_1$ ,  $\angle m_0Om_2$  の角度  $\gamma_2$ ,  $\angle m_1m_0m_2$  の角度  $\phi$  を求めることができる。さらに,  $M_0M_1$  の長さ  $D_1$ ,  $M_0M_2$  の長さ  $D_2$ ,  $\angle M_1M_0M_2$  の角度  $\alpha$  は既知であるとする。このような状況で未知数である  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $R_0$  を求める。ここで,  $\theta_1$  は視線  $OM_0$  と  $M_0M_1$  のなす角,  $\theta_2$  は視線  $OM_0$  と  $M_0M_2$  のなす角であり,  $R_0$  は,  $OM_0$  の長さである。これらの

未知数を決定することによって, カメラ中心  $O$  に対する3点の空間位置を求めることができる。

これを解くためには, 最低でも式(1)の4次方程式を解かなければならないことが知られている<sup>2)</sup>。

$$u_4Z_1^4 + u_3Z_1^3 + u_2Z_1^2 + u_1Z_1 + u_0 = 0 \quad (1)$$

ただし,  $Z_1 = \sin^2(\theta_1 - \gamma_1)$  である。また, 係数は,

$$u_0 = -r_2^2, \quad u_1 = q_1^2 - 2q_2r_2,$$

$$u_2 = -q_1^2 - q_2^2 - 2(p_1q_1 + p_2r_2),$$

$$u_3 = p_1^2 - 2p_1q_1 - 2p_2q_2, \quad u_4 = -p_1^2 - p_2^2,$$

$$p_1 = -2(a_1b_1 + a_2b_2), \quad q_1 = 2(a_1b_1K^2 - qb_2K),$$

$$p_2 = a_1^2 + a_2^2 - b_1^2 - b_2^2,$$

$$q_2 = K^2(-a_1^2 + b_1^2) + b_1^2K^2 + 2a_2qK,$$

$$r_2 = K^2(-b_1^2 + q^2),$$

$$a_1 = -s_1c_2 + pc_1s_2, \quad b_1 = c_1c_2 + ps_1s_2,$$

$$a_2 = -s_1s_2 - pc_1c_2, \quad b_2 = c_1s_2 - ps_1c_2$$

であり,

$$K = \frac{\sin \gamma_1 / D_1}{\sin \gamma_2 / D_2}$$

である。しかし, 4次方程式を解くためには, 解を決定するための収束計算などを用いなければならず, リアルタイム処理においては, その計算時間が問題となる。

## 2.2 透視3点問題の近似解法

厳密な透視投影モデルであるExact Perspectiveモデルに対する近似モデルを用いることによって、透視3点問題を解く際の計算を簡略化する方法が提案されている。これによって、本来4次方程式を解く問題を2次方程式を解く問題へと簡略化でき、計算による処理時間を大幅に削減することができる。近似モデルを用いてカメラキャリブレーションを行うと誤差が生じるが、多少の誤差が許される条件であれば十分許容できる範囲のものであり、画像合成に関して違和感を与えるほどのものではないということが、実験的に示されている<sup>3)</sup>。いくつかの近似モデルが提案されているが、本研究ではその中でも比較的誤差が少ないとされるOrthoperspectiveモデル(Fig. 1(b))で近似を行い、透視3点問題を解くことにする。

Orthoperspectiveモデルでは、点 $M_0$ を含む視線 $OM_0$ に垂直に交わる平面 $\Pi$ を考える。この平面 $\Pi$ へ点 $M_1, M_2$ を正射影させ、その投影点を $H_1, H_2$ とする。このとき画像平面上の点 $m_0, m_1, m_2$ は、点 $M_0, H_1, H_2$ を透視投影した点に対応する。このモデルにおける未知数の決定方法を簡単に説明する。

まず、幾何学的な関係から、

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = K \quad (2)$$

$$\cos \alpha = \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \phi + \cos \theta_1 \cos \theta_2 \quad (3)$$

という式が成り立っている。ただし、

$$K = \frac{\tan \gamma_1 / D_1}{\tan \gamma_2 / D_2} \quad (4)$$

である。この式(2)と式(3)より、 $Z_1 (= \sin^2 \theta_1)$ についての2次方程式

$$\sin^2 \phi Z_1^2 - (K^2 - 2K \cos \alpha \cos \phi + 1) Z_1 + K^2 \sin^2 \alpha = 0 \quad (5)$$

が得られる。この2次方程式を解くことによって $Z_1$ より $\sin \theta_1$ が決定でき、これより未知数 $\theta_1$ が求められ、さらに $\theta_2, R_0$ を求めることができる。

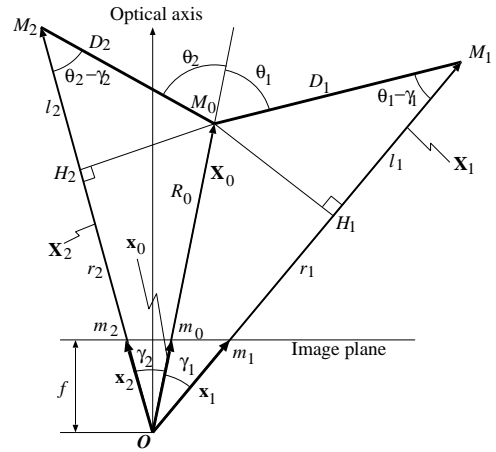


Fig. 2 決定した $\theta_1, \theta_2, R_0$ と、既知である $D_1, D_2, \alpha$ からの、3点 $M_0, M_1, M_2$ の空間位置の復元

## 2.3 カメラキャリブレーション

3つの未知パラメータ $\theta_1, \theta_2, R_0$ が決定されれば、カメラと空間の点との関係、すなわちカメラキャリブレーションを行うことができる。つまり、カメラ中心 $O$ に対する3点の空間位置を決定することができる。

Fig. 2において、 $OH_1, OH_2$ の長さ $r_1, r_2$ 、また、 $H_1M_1, H_2M_2$ の長さ $l_1, l_2$ は、近似的に求めた $\theta_1, \theta_2, R_0$ を用いて、幾何学的な性質より決定することができる。

ここで、カメラ中心から画像平面までの距離は焦点距離 $f$ であり、画像平面上の点 $m$ の座標を $(u, v)$ とすると、カメラ中心 $O$ を原点とした点 $m$ の位置ベクトル $\mathbf{x}$ は、

$$\mathbf{x} = [u \ v \ f]^T \quad (6)$$

と表される。

このとき空間の点 $M_0, M_1, M_2$ の位置ベクトル $\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ は、

$$\mathbf{X}_0 = R_0 \hat{\mathbf{x}}_0 \quad (7)$$

$$\mathbf{X}_1 = (r_1 + l_1) \hat{\mathbf{x}}_1 \quad (8)$$

$$\mathbf{X}_2 = (r_2 + l_2) \hat{\mathbf{x}}_2 \quad (9)$$

となる。ここで $\hat{\mathbf{x}}_i (i = 0, 1, 2)$ は、 $\mathbf{x}_i$ の単位ベクトルである。よって、式(7)~(9)より、カメラ中心に対する点 $M_i$ の空間位置を求めることができる。

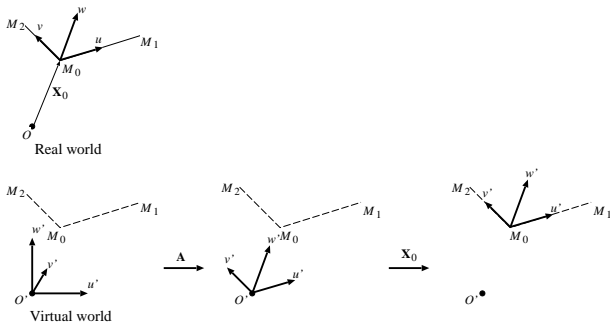


Fig. 3 実空間の3点  $M_0, M_1, M_2$  がなす平面に仮想物体をのせるための、回転  $\mathbf{A}$ 、並進  $\mathbf{X}_0$  による位置合わせ

### 3. 仮想物体の位置合わせ

実画像に対して仮想物体を重ねて合成表示するためには、仮想物体を適切な方向から見た画像を作り、これを実画像に上乘せして表示すればよい。ここでは、画像中の3点がなす平面に仮想物体をのせる合成画像を考える。つまり、Fig. 3に示すように、仮想物体の座標系  $u'v'w'$  が、3点  $M_0, M_1, M_2$  がなす平面上に設定した座標系  $uvw$  に重なるように位置合わせを行うことで仮想物体を平面にのせることができ、これより得られる画像を実画像に上乘せして表示することによって、あたかもそこに仮想物体があるような画像を得ることができる。

$u'v'w'$  座標系を  $uvw$  座標系に重ねるためには、まず  $u'v'w'$  座標系を行列  $\mathbf{A}$  で回転させて  $uvw$  座標系と同じ向きにし、次に  $uvw$  座標系の原点  $M_0$  の位置までベクトル  $\mathbf{X}_0$  で並進させればよい。3点の空間位置は計測されているので、 $M_0M_1$  方向の単位ベクトル  $\mathbf{u}$ 、 $M_0M_2$  方向の単位ベクトル  $\mathbf{v}$  は求まる。また、平面の法線方向をあらわすベクトル  $\mathbf{w}$  は、 $\mathbf{u}$  と  $\mathbf{v}$  の外積より求めることができる。一方、仮想物体の  $u'v'w'$  座標系の各軸方向をあらわす単位ベクトル  $\mathbf{u}'$ 、 $\mathbf{v}'$ 、 $\mathbf{w}'$  は、既知である。したがって、 $uvw$  座標系の単位ベクトル  $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{w}$  と、 $u'v'w'$  座標系の単位ベクトル  $\mathbf{u}'$ 、 $\mathbf{v}'$ 、 $\mathbf{w}'$  の3組のベクトルの対応から、回転行列  $\mathbf{A}$  を決定することができる。また、並進ベクトル  $\mathbf{X}_0$  は、 $M_0$  の位置ベクトルである。

## 4. 複合現実感画像の生成システム

### 4.1 複合現実感画像生成のながれ

本研究では、透視3点問題の近似解法による高速・簡易カメラキャリブレーションを用いて複合現実感画像を生成するシステムを作成した。これは、PCにUSBカメラを接続し、これより得られる画像に対して、画像中の3点  $A, B, C$  (以降制御点と呼ぶ) を選択し、これよりカメラキャリブレーションを行うことで、3点から構成される平面に仮想的な物体をのせた複合現実感画像を、リアルタイムでカメラの動きに同期してディスプレイに表示する。カメラは、ZhangのEasy Camera Calibration<sup>4)</sup> によって、あらかじめ焦点距離などの内部パラメータを求めておき、実行中にこれらのパラメータが変化しないものとする。また、透視3点問題によりカメラキャリブレーションを行うため、辺  $AB, AC$  の長さ と  $\angle BAC$  の角度は既知でなければならない。このような状況で複合現実感画像を生成する処理のながれを以下に示す。

- 1) 最初のフレームの画像中の特徴点から、仮想物体をのせる平面を構成する制御点3点を選ぶ。
- 2) 3点の画像座標について透視3点問題を近似的に解くことで、3点の空間位置を決定する。
- 3) 3点がなす平面に仮想物体がのるよう仮想物体の座標系を変換し、これより得られる仮想物体の画像を、実画像に上乘せしてディスプレイに表示する。
- 4) 画像が更新されたら、前のフレームの制御点であった特徴点の3点が、次のフレームでそれぞれの特徴点に移動したか、特徴点追跡を行う。

2)~4)を繰り返すことで、リアルタイムに複合現実感画像を得る。ただし、画像中の特徴点は、エッジなどの、式(10)で表される行列の最小固有値が極大となる点  $(u, v)$  とした<sup>5)</sup>。

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \sum D_x^2 & \sum D_x D_y \\ \sum D_x D_y & \sum D_y^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} D_x &= \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n I_x(u+i, v+j) \\ D_y &= \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n I_y(u+i, v+j) \end{aligned} \quad (11)$$

であり、 $I_x$ ,  $I_y$  は、それぞれ輝度値のx方向、y方向の1次偏微分を表す。また、 $m = 3$ ,  $n = 3$  とした。

## 4.2 制御点の追跡

カメラからの画像が更新され変化した場合、制御点である3点の特徴点が次のフレームでどこへ移動したか追跡する必要がある。ここで、カメラからの画像は連続的に変化するので、前のフレームでの特徴点に対して、更新されたフレームの特徴点の画像の変化は小さい。したがって制御点を追跡するためには、前のフレームにおける制御点の位置の周辺にあり、それと類似した(相関の高い)特徴点が、次のフレームでの対応する制御点となる<sup>6)</sup>。

そこで本研究では、次のようなテンプレートマッチングによる制御点の追跡を行った。更新されたフレームに対して、前のフレームでの制御点の位置を中心とした  $(2d_u + 1) \times (2d_v + 1)$  の矩形のサーチエリアを設定する。ただし  $d_u = 7$ ,  $d_v = 7$  とした。このサーチエリア内の特徴点と前のフレームの制御点である特徴点を比較し、最も相関の高い点を探す。点の相関の評価は式(12)に示すSAD(Sum of Absolute Difference)を用いた。

$$SAD = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n |I_1(u_1+i, v_1+j) - I_2(u_2+i, v_2+j)| \quad (12)$$

ただし、位置  $(x, y)$  における画像の輝度値を  $I(x, y)$  とし、前のフレームの輝度値を  $I_1$ , 更新されたフレームの輝度値を  $I_2$  とする。また、前のフレームでの点の座標を  $(u_1, v_1)$  とし、更新されたフレームでの点の座標を  $(u_2, v_2)$  とする。さらに、 $m = 3$ ,  $n = 3$  とした。このSADが0に近いほど、2つの点が類似していることになる。

ここで、前のフレームの制御点である特徴点1点に

対して、次のフレームにおける相関の高い、つまり最もSADの小さい特徴点を対応させただけでは、誤対応が検出され追跡に失敗することがある。よって、制御点とその周辺の特徴点の対応も考え、これらのSADの合計が最小となる組み合わせを求め、対応させた。

## 4.3 実環境での結果

以上の処理を実装し、実環境で複合現実感時間画像を生成した。その複合現実感画像をFig. 4(a), (b)に示す。ただし、図の点  $A$ ,  $B$ ,  $C$  は制御点を表す。

透視3点問題を近似的に解いてカメラキャリブレーションを行っているので多少の誤差が生じるが、Fig. 4(a)に示されるように、違和感のない複合現実感画像を得ることができた。また、計算による負荷が比較的小さいため、画像の変化に同期してリアルタイムで処理を行うことができた。ただし、Fig. 4(b)に示すように、3点の制御点の選び方によっては、特徴点の追跡に失敗することがある。ここでは、制御点  $A$  の追跡に失敗し、仮想物体の位置合わせができなくなった。

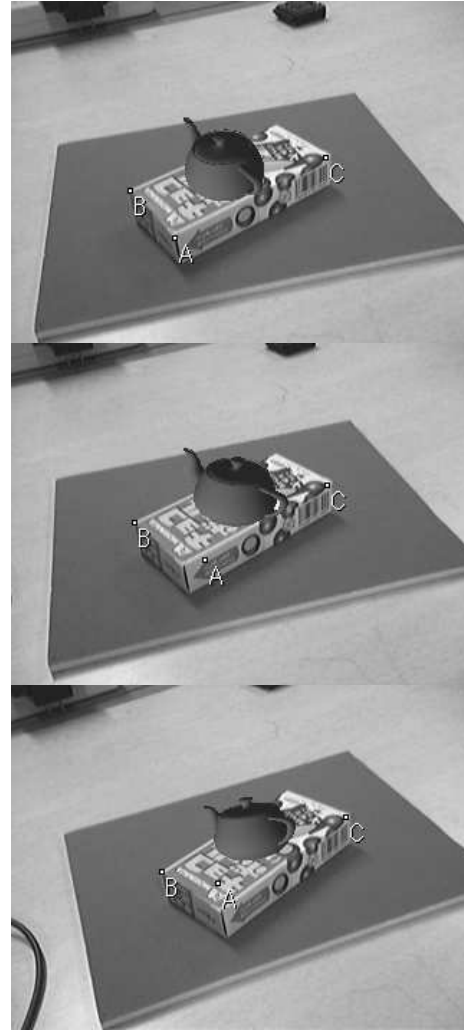
これは制御点である特徴点の追跡にテンプレートマッチングを用いているため、制御点と類似した点が多い物体や、フレーム間で画像が激しく変化する場合、あるいは正しい制御点の特徴点として検出されない場合などでは、制御点の追跡に失敗し、適切な仮想物体の位置合わせができなくなる。

## 5. まとめ

本研究では、透視3点問題を近似的に解くことによる高速・簡易カメラキャリブレーションを用いて、複合現実感画像を生成するシステムを作成し、検証を行った。近似解法によりカメラキャリブレーションの計算時間を大幅に削減することができ、カメラの動きに同期してリアルタイムで処理を行うことができた。また、近似による誤差の影響は、実用上あまり影響のない程度であり、違和感のない複合現実感画像を得ることができた。ただし、制御点である3点の特徴点の追跡に失敗することがあり、どのような画像に対しても安定に追跡できるようにシステムを改善することが、



(a)複合現実感画像が成功した例



(b)制御点の追跡ができず、  
仮想物体の位置あわせに失敗した例

Fig. 4 実環境で実行した複合現実感画像の結果

今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 佐藤, 内山, 田村: 複合現実感における位置あわせ手法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.2, 171/180 (2003)
- 2) D. DeMenthon and L. S. Davis: Exact and approximate solution of the perspective-three-point problem, IEEE Trans. PAMI, Vol.14, No.11, 1100/1105 (1992)
- 3) 出口, 多田羅: 画像合成のための高速・簡易カメラキャリブレーション, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.8, 1015/1022 (1995)
- 4) Z. Zhang: A flexible new technique for camera calibration, INRIA Technical Report MSR-TR-98-71 (1998)
- 5) C. Tomasi and T. Kanade: Detection and tracking of point features, Carnegie Mellon University Technical Report, CMU-CS-91-132 (1991)
- 6) Z.Zhang, R. Deriche, O. Faugeras and Q.-T. Luong: A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry, Artificial Intelligence, Vol.78, 87/119 (1995)