

K-013

バーチャルスタジオにおけるズームレンズのキャリブレーションに関する考察 A Study on Zoom Lens Calibration Method for Virtual Studios

大久保 英彦† 山内 結子† ミツ峰 秀樹†
Hidehiko Okubo Yuko Yamanouchi Hideki Mitsumine

1. はじめに

カメラワークを伴う実写とCGの合成を可能にするバーチャルスタジオの技術はいまや多くの番組制作で利用されている。CGを描画するために必要な、実際の撮影カメラの位置・姿勢などのパラメータを求める最も一般的な手法は、回転量を検出できる雲台とズーム量を検出できるレンズを利用してそこから得られるパン・チルト量およびズーム量を基にカメラの各種パラメータを算出するものである。これは、画像解析のみからカメラパラメータを算出する手法に比べ安定かつ高速であるという利点がある反面、少数のサンプル点と手作業を中心としたキャリブレーション手法により、精度面に問題がある場合が多かった。

これまでパン・チルト量を利用したバーチャルスタジオ用の高精度キャリブレーション手法を考案し、その有効性を示してきた[1]。ただ、そこで考慮してきたのはズーム値を固定した場合であり、番組演出上必須であるズームへの対応が課題であった。しかし単焦点のレンズと比較してズームレンズを取り扱う場合には多くの困難を伴う[2]。

本研究においては、前述の一般的なバーチャルスタジオ用カメラシステムにおいて、ズームレンズのズーム量を考慮したカメラキャリブレーション手法について考案した。具体的には、まず複数のズーム量に対して適当なパン・チルト角で既知パターンを複数枚撮影し、その画像の解析をおこなうことでキャリブレーションデータベースを作成した。そして、映像合成時には逆に雲台のパン・チルト角とズーム量をキーとしてデータベースから各種パラメータをリアルタイムに算出することとした。そして、実際にこのプロセスでCGとの合成を行い、良好な結果を得ることができたので報告する。

2. 雲台上のズームレンズ付きカメラのモデル化

実写の位置に正確にCGを一致させるためには、レンズの位置・姿勢を表す外部パラメータと、焦点距離や光軸中心位置・レンズ歪などの内部パラメータが必要である。ここではバーチャルスタジオでの運用に適合したキャリブレーションを行うため、三脚と雲台にマウントされた状態のカメラ全体を表すカメラモデルを想定し(図1)、直接パン・チルト角がカメラの位置・姿勢を決定する外部パラメータとなるようにした。さらに今回、ズームレンズのズーム量によって変化する内部・外部パラメータを特定させることで、雲台とズームレンズを含めたさらに広範なカメラシステムのモデル化をおこなった。

一般的にカメラの位置・姿勢をあらわす外部パラメータ θ_{ext} は、各座標軸方向の平行移動と回転を表す6つのパラメータで規定される。

$$\theta_{ext} = [t_x, t_y, t_z, \omega, \varphi, \kappa]^T \quad (1)$$

これは、ズームレンズの使用を考慮すると、その構造的な性質からズーム量 m によりカメラ位置が変化するために $\theta_{ext}(m)$ と表されることになる。

この $\theta_{ext}(m)$ は、剛体変換をあらわす回転 R と平行移動 t からなる行列 $M(m)$:

$$M(m) = \begin{bmatrix} R & t \\ \mathbf{0}_3 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

で表されることと同等である。今、空間に任意の世界座標を考える。雲台のパン・チルト回転軸は直交し一点で交差していると仮定し、この点を雲台中心と呼ぶとする。この雲台は世界座標の位置・姿勢 M_p で設置されているとする。さらに、その雲台中心からオフセットされたカメラレンズ位置・姿勢を M_c とし、パン・チルト量を $M_{PanTilt}$ で表すとすると、最終的なカメラ位置・姿勢 $M(m)$ は、

$$M(m) = M_c M_{PanTilt} M_p \quad (3)$$

で表される。ズームレンズに関しては、Willson[2]の手法に基づいて、ズームによって影響を受ける外部パラメータとしては光軸方向の位置シフトのみを考慮した。つまり M においては、 M_c のみ、しかも光軸方向のシフトのみが m の関数となる(図1の $t_z^c(m)$)。

$$M_c(m) \equiv \theta_{ext}^c(m) = [t_x^c, t_y^c, t_z^c(m), \omega^c, \varphi^c, \kappa^c]^T \\ = [\eta_{ext}^c, t_z^c(m)]^T \quad (4)$$

なお θ_{ext}^c は、 M_c に対応する外部パラメータベクトルをあらわし、 η_{ext}^c は θ_{ext}^c のうち、ズーム値に依存しないパラメータによるパラメータベクトルとする。

続いて内部パラメータ θ_{int} としては、Heikkilä のモデル[3] (アスペクト比 s 焦点距離 f 画像中心座標 u_0, v_0 レンズ歪係数 k_1, k_2, p_1, p_2 の8パラメータ)を採用し、これはすべてズーム量 m の関数とした。

$$\theta_{int}(m) = [s(m), f(m), u_0(m), v_0(m), \\ k_1(m), k_2(m), p_1(m), p_2(m))]^T \quad (5)$$

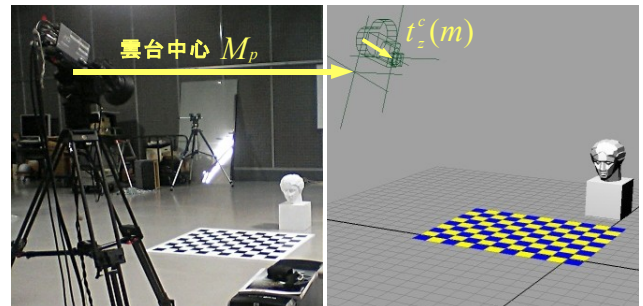


図1. 雲台マウントカメラモデル (実カメラと対応するCGカメラ)

† 日本放送協会 放送技術研究所 (人間・情報)

3. キャリブレーションアルゴリズム実装

ここで提案するキャリブレーション手法は、既知の校正パターンを撮影した多視点（複数の）画像を解析することで各パラメータを推定するものに分類される。各パラメータは最終的にバンドル調整（格子交点の予測位置と観測位置の幾何学的距離の2乗和の最小化）をおこなうことにより、高い精度での校正が可能である。

一般的なキャリブレーションの場合は、内部パラメータは固定、かつカメラの位置・姿勢に拘束条件を与えないために、 K 枚の画像を利用する場合には、内部パラメータとそれぞれの画像に対応したカメラ位置・姿勢を未知パラメータとして扱うことになる。すなわちその際のズーム量にあたる固定値を m_0 、評価すべきパラメータベクトルを θ とすると、

$$\theta^T = [\theta_{\text{int}}(m_0)^T, \theta_{\text{ext}}(m_0, 1)^T, \theta_{\text{ext}}(m_0, 2)^T, \dots, \theta_{\text{ext}}(m_0, K)^T] \quad (6)$$

となる。ここで $\theta_{\text{ext}}(m, k)$ は、ズーム量 m である k 枚目の画像に対応した撮影カメラ位置・姿勢をあらわす。

今回提案しているカメラモデルにおいては、式(3)の M_p は、雲台中心位置を固定しているために撮影画像に関して変化しない上に、 M_{PanTilt} はデータ上既知となるため、評価するパラメータベクトルは前述の式(4)とあわせ、サンプルする複数のズーム量を m_1, m_2, \dots, m_n とすると、

$$\theta^T = [\theta_{\text{int}}(m_1)^T, \theta_{\text{int}}(m_2)^T, \dots, \theta_{\text{int}}(m_n)^T, t_z^c(m_1), t_z^c(m_2), \dots, t_z^c(m_n), \eta_{\text{ext}}^c, \theta_{\text{ext}}^p] \quad (7)$$

となる。ここで、 θ_{ext}^p は M_p に対応する外部パラメータベクトルをあらわす。これは、評価されるパラメータが、各ズーム値における内部パラメータすべてと光軸方向のカメラオフセット量、さらにすべての撮影画像で共通の雲台中心位置 θ_{ext}^p と光軸方向オフセット以外のカメラマウント状態 η_{ext}^c で構成されていることを示す。

最適化のプロセスは、これまでの手法[1]と同様に画像座標系における校正パターンの特徴点の観測位置と、カメラモデルを経て計算により推定した特徴点の位置との差を評価する目的関数を作成して、それを最適化することで式(7)のパラメータをすべて求める。

このようにして得られたパラメータに対して、焦点距離 $f = f(m)$ などズーム値の関数になっているものは、使用したズームサンプル値 m_1, m_2, \dots, m_n での値を節点とする曲線で補間をおこない、ズーム量に対するキャリブレーションデータベースを構築する。

4. 実験

4.1 実験手法

上述の提案キャリブレーションアルゴリズムの評価を行うべく、以下の方法で実験をすすめた。

①提案アルゴリズムの収束性の評価：

まず提案アルゴリズム自体の収束性を評価した。理論的なカメラモデルを作成し、CG上の仮定の既知パターンである市松模様（8x10）を撮影するシーンから得られるデータを使用してキャリブレーションを行い、そ

の収束性を確かめた。想定ズーム値（8.4mm, 10.0mm, 12.0mm）に対してそれぞれ6通りの姿勢に関してデータを取得した。

②実際の撮影画像による評価：

レンズは Fujinon HA12x8.5ERD-R28 を使用。8.5mm, 10mm, 12mm 相当のズーム値にて①と同様のキャリブレーションを行い、再投影誤差による評価を行った。

③CGとの合成：

レンズ歪をシミュレートするCG描画装置にキャリブレーション結果を適用しCGを生成、実写と合成を行った。

4.2 実験結果と考察

上述①の結果として、すべての特徴点サンプルの平均再投影誤差は高い精度（0.062ピクセル）で収束し、各パラメータに関しても設定パラメータに非常に近い値を得ることができたことで、アルゴリズムとしての有効性は確認できた。②の再投影誤差結果としては、図2に示すような誤差分布になり、平均再投影誤差は0.255ピクセルで、キャリブレーション精度という意味ではバーチャルスタジオにとって十分な結果を得ることができた。図3に、③の結果として実写画像とCGの合成を行った例を示す。

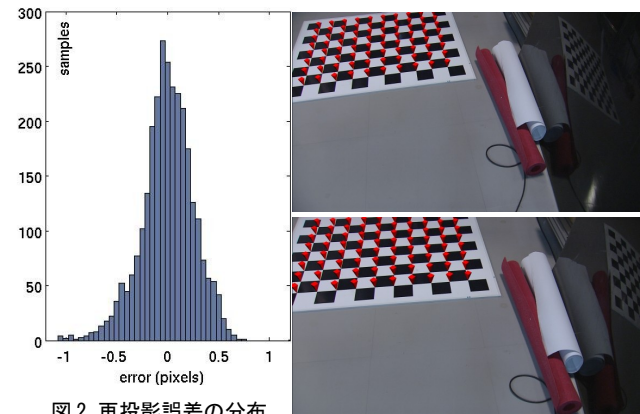


図2. 再投影誤差の分布 (実験②)

図3. CG合成結果例 (市松模様上にくさび状のCGを合成。焦点距離 上：8.53mm, 下：10.1mm)

5. まとめ

提案カメラモデルによるキャリブレーション手法の最大の利点は、回転雲台を利用したカメラシステムに対して、そのパン・チルトデータに整合したキャリブレーションが行えることにある。今回はズームレンズのズーム量を含めたキャリブレーションの実装をおこなうことでさらにその有効性を示すことができた。

今後はより広いズームレンジへの対応やフォーカス量への対応を含め考察をおこない、実際の制作スタジオ・CG制作現場での利用を図っていく。

参考文献

- [1] 大久保他：「バーチャルスタジオにおけるカメラキャリブレーション高精度化の考察」, FIT2007, p.541-542, 2007.
- [2] Willson, R. G., "Modeling and Calibration of Automated Zoom Lenses", PhD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, Jan. 1994.
- [3] Heikkilä, J., "Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 10, p.1066-1077, Oct 2000.