

I-061

消失点を用いた多視点カメラキャリブレーション Multiple Camera Calibration Using Vanishing Points

小島 有弥[†]
Yuuya Kojima

藤井 俊彰[†]
Toshiaki Fujii

谷本 正幸[†]
Masayuki Tanimoto

1. まえがき

多視点カメラシステムを運用する際は各カメラのパラメータを求めるカメラキャリブレーション(カメラ校正)が非常に重要となる。すなわち、各カメラの結像を決める内部パラメータや姿勢、位置を表す外部パラメータを正確に推定する必要がある。

従来手法としては3次元や2次元の参照物体を用いる手法や画像上の対応点のみを用いる手法がある。しかし、前者の手法では大規模な空間を対象とした場合、空間に見合った物体が必要となるため実用上急激に困難さが増す。また、後者の手法では多くのパラメータを推定する必要があるためしばしば不安定であり、ノイズに非常に敏感であることが知られている。

そこで本稿では、大規模な空間での適用を考えこれらの問題を解決する手法として1次元物体を用いた新たな手法を提案する。

2. 提案手法

2.1 記法

実世界の座標(ワールド座標)による空間の点を同次座標で $M = [X, Y, Z, 1]^T$ 、画像座標上の点を同次座標で $m = [u, v, 1]^T$ とし、 M が m に投影されたときそれらの関係は次のように表される。

$$m \simeq K [R \quad -Rt] M \quad (1)$$

ここで、 \simeq は非零の定数倍に対して同値関係であることを表す。 R は 3×3 の直交行列であり、ワールド座標に対するカメラの回転、すなわち姿勢を表し自由度は3である。 t は3次元ベクトルでカメラの位置を表す。また、 K はカメラの内部パラメータを表す 3×3 行列であり焦点距離 f (pixel)、アスペクト比 a 、軸の非直交性歪み係数 s 、画像中心 (u_0, v_0) を用いて次のように表される。

$$K = \begin{bmatrix} f & sf & u_0 \\ 0 & af & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 提案手法の特徴

提案手法では1台の内部校正済みカメラ(基準カメラとする)と多視点カメラのうち1台の校正したいカメラ(対象カメラとする)で図1に示すような距離が既知な3点を有する1次元物体を動かしながら撮影し、各々の画像から得られる消失点を用いることで対象カメラの校正を行うことができる。本稿では1台の対象カメラを校正することとするが、対象カメラは複数台にしても同時に処理できるので多視点への拡張は容易である。

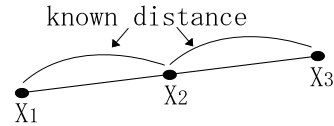


図1: 1次元物体

事前に1台の基準カメラを校正するには2次元の参照物体を用いた手法を使えば簡便であり、また、1次元物体であれば全てのカメラから同時に観測でき、広大な空間にも容易に対応できる。以上より提案手法は大規模空間に際して実用に適していると言える。

2.3 消失点の取得

図1に示した1次元物体上の3点 X_1, X_2, X_3 とそれらを通る直線上の無限遠点 X_∞ が画像上でそれぞれ x_1, x_2, x_3, x_∞ に投影されたとする。このような直線上の4点から計算される複比は投影前後では不変であるので次の式が成り立つ[1]。

$$\frac{|x_\infty - x_2| |x_1 - x_3|}{|x_\infty - x_3| |x_1 - x_2|} = \frac{|X_\infty - X_2| |X_1 - X_3|}{|X_\infty - X_3| |X_1 - X_2|} \quad (3)$$

式(3)において X_∞ は無限に遠い点であるから $\frac{|X_\infty - X_2|}{|X_\infty - X_3|} = 1$ であり、式(3)は簡単化できる。これより1次元物体の実距離の比と x_1, x_2, x_3 の座標から消失点 x_∞ を算出することができる。

2.4 ホモグラフィの計算

基準カメラと対象カメラで得られた対応する消失点をそれぞれ $m_{\infty 1}, m_{\infty 2}$ とすると、それらは次の関係を満たす。

$$m_{\infty 2} \simeq H_\infty m_{\infty 1} \quad (4)$$

ただし、ワールド座標を基準カメラのカメラ座標に固定すると

$$H_\infty = K_2 R_2 K_1^{-1} \quad (5)$$

であり、ここで、 K_1 は基準カメラの内部パラメータ行列、 K_2 は対象カメラの内部パラメータ行列を表し、 R_2 は基準カメラの座標に対する対象カメラの回転行列を表す。このときの H_∞ は無限遠平面に対するホモグラフィである[2]。 H_∞ は 3×3 行列であり自由度は8であるので、式(4)より対応する消失点の組が4組以上あれば最小二乗法を用いて H_∞ を求めることができる。

2.5 内部パラメータと姿勢の算出

式(4)より算出された H_∞ は K_1 と K_2 及び R_2 を含んでいることがわかる。 K_1 は既知としているので K_1 と H_∞ を用いて、式(5)より $K_2 R_2$ が得られ、 $K_2 R_2$ は K_2 が上三角行列であることと R_2 が直交行列であることから容易に分解することができ、これより K_2 と R_2 が得られる。実際算出された H_∞ はスケールに関して不定であるが $K_2 R_2$ の3行目のノルムが1であることを利用すればスケールを決定できる。

[†]名古屋大学大学院 工学研究科

2.6 位置の算出

基準カメラと対象カメラで撮影した対応する1次元物体上の点をそれぞれ m_1, m_2 とし、次の式によりそれぞれの点を変換した点 m'_1, m'_2 を定義する.

$$m'_1 = K_1^{-1} m_1 \quad m'_2 = K_1^{-1} H_\infty^{-1} m_2 \quad (6)$$

すると、 m'_1, m'_2 はエビポーラ幾何より次の関係が成り立つ.

$$m'_2{}^T [t_2]_x m'_1 = 0 \quad (7)$$

ただし

$$[t_2]_x = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix} \quad t_2 = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

であり、 t_2 は対象カメラの位置方向を表すベクトルである. 式(7)より3組以上の対応点を用いれば最小二乗法により t_2 を求めることができるが、算出された t_2 はスケールに関して不定である.

そこで、最後にスケールを決定する. m'_1, m'_2 と算出された t_2 から1次元物体上の各3次元点を復元したとき、それらの点はスケールに関して不定である. このスケールは対象カメラの位置のスケールと同じものである. 実距離の拘束を満たすようにスケールを決定することで対象カメラの位置 t_2 が決定できる.

3. 実験結果

提案手法の有効性をシミュレーションにより検証した. 基準カメラと対象カメラを図2のように配置し、半径10cmの球領域に長さ20cmの1次元物体を発生させ各カメラで撮影した. 1次元物体上の3点は等間隔で置かれている. 使用する画像サイズは 640×480 pixel で、内部パラメータは2台とも $f = 1000, a = 1, s = 0.0002, u_0 = 320, v_0 = 240$ と設定した. 1回の試行では1次元物体をランダムに10個発生させ、各カメラで取得された10組の消失点を用いた. ノイズ特性を調べるため平均0, 標準偏差 σ のガウスノイズを0.1刻みに $\sigma = 0, \dots, 1$ のレベルで特徴点の観測位置に加え、各レベルにつき500回の試行を行いその誤差の平均値を評価した. ここで基準カメラについては2次元平面を用いた Zhang の手法 [3] により校正済みと想定し、ノイズレベルに相当する結果

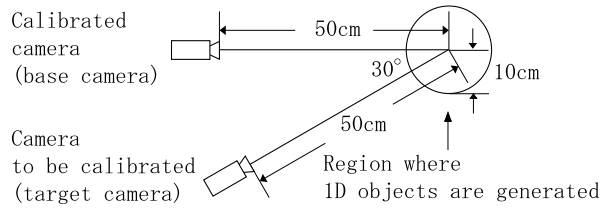


図2: カメラ配置

が得られていることとした. 内部パラメータの誤差については真値との相対誤差を用い、画像中心 u_0, v_0 においては文献 [4] の指摘に従い、焦点距離 f に対する相対誤差で評価した. また、姿勢と位置については真値との絶対誤差を用いて評価した.

結果を図3に示す. s は真値が非常に小さい値なので評価はしなかった. また、対象カメラの姿勢(回転角)については roll, pitch, yaw と、位置については x, y, z と表記した. ノイズの無い状況では正しく推定が行えているが、ノイズレベルが大きくなるに従い誤差がほぼ線形に増加することがわかった.

4. むすび

1次元物体を撮影することで得られる消失点を利用して多視点カメラをキャリブレーションする新たな手法を提案した. 提案手法は大規模な空間での多視点カメラシステムに適しており、本稿ではシミュレーションによってその有効性を検証した. 今後は最適化手法を用いて精度の向上を図る予定である.

参考文献

- [1] 佐藤 淳, 木下 敬介, ロベルト チボラ, “曲面上のエビポーラ幾何と未校正カメラによる視覚誘導,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J82-D-II, No. 9, pp. 1401-1410, Sep. 1999.
- [2] R.Hartly, A.Zisserman, Multiple View Geometry in computer vision, Cambridge University Press, 2000.
- [3] Z.Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” IEEE Trans. PAMI, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [4] Z.Zhang, “Camera calibration with one-dimensional objects,” IEEE Trans. PAMI, Vol. 26, No. 7, pp. 892-899, 2004.

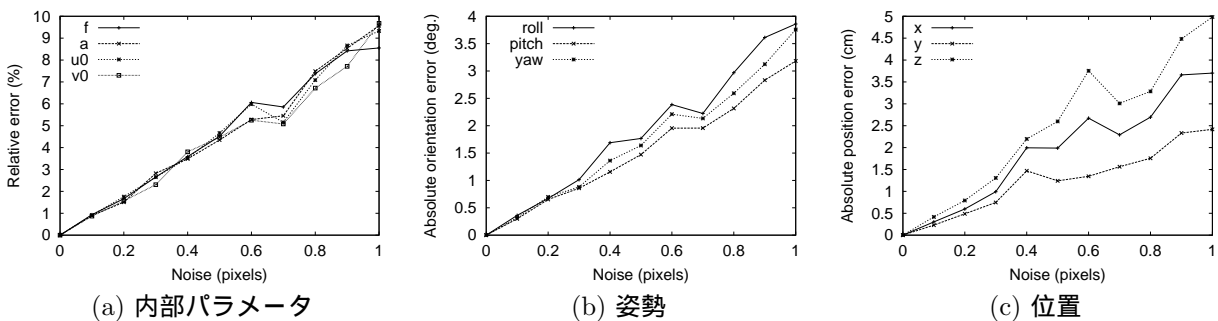


図3: ノイズに対するパラメータの推定誤差