

事例ベースカメラキャリブレーション

吉岡悠一 和田俊和

和歌山大学 システム工学部 情報通信システム学科
〒640-8510 和歌山市栄谷 930 番地

E-mail: yoshioka@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp

あらまし カメラキャリブレーションは、様々な幾何・光学アルゴリズムの前提となるコンピュータビジョンの基礎であり、特に内部キャリブレーションは最も基本的な問題である。従来の内部キャリブレーションでは複雑なカメラモデルのパラメータを実データから推定する方式が採用されてきた。これに対し、本稿では、「入射光の幾何光学的な軌跡が1つの光学中心を通過する」という前提が成り立つ場合に適用可能なカメラキャリブレーション法を提案する。本手法では、キャリブレーションに用いる較正用物体面を仮想撮像面として用いることにより幾何学的歪みを除去するとともに、この仮想撮像面に対する光学中心位置を推定する。実験では、本手法によって通常のカメラ、および歪みの大きな広角レンズを用いたカメラ、に対するキャリブレーションを行い、その有効性を確認した。

Case-Based Camera Calibration

Yuichi Yoshioka and Toshikazu Wada

Factory of Systems Engineering,
Wakayama University,

930 Sakaedani, Wakayama City, 640-8510, Japan

E-mail: yoshioka@vrl.sys.wakayama-u.ac.jp

Abstract This paper presents a versatile internal camera calibration method, which removes radial distortions and estimates 3D optical center position. This method consists of two processes: rectification and ray-tracing. The rectification process remaps a captured image to a planar calibration patterns by using bilinear interpolation. Through this process, all possible geometric distortions are removed. The following ray-tracing process tracks incoming rays and finds the converging point in 3D space. This method has the following advantages: 1) it doesn't use complicated camera model, 2) it removes all possible geometric distortions, and 3) it can evaluate the correctness of the camera calibration by using the ray convergence. Through the experiments, we confirmed the effectiveness of the proposed method.

1. はじめに

コンピュータビジョンでは、画像からシーン中の物体の形状や運動などを推定するといったように、2次元情報から3次元情報を復元する問題が取り扱われてきた。これは、2次元

画像から3次元情報を復元するという撮像過程の逆変換を推定する問題である。これを正確に行うためには、画像の生成過程を正確に記述し、それに基づいて逆問題を解くことが必要になる。この中で大きな役割を果たすのが、カメラキャリブレーションである。カメラ

キャリブレーションは、
光学的キャリブレーション：

口径蝕・ $\cos^4 \theta$ の影響などによる空間的に不均一な輝度分布やレンズのボケなどの推定と補正を行う問題

幾何学的キャリブレーション：

カメラ内部で起きる透視投影や歪みなどの幾何学的変換を推定し補正する問題の2つに大別される。このうち、幾何学的キャリブレーションは次の2つに分類される。

内部キャリブレーション：

カメラ内部で起きる幾何光学的な変換、歪み、射影などを同定する問題。

外部キャリブレーション：

カメラ座標系と3次元空間中に設定した世界座標系の間的位置関係を求める問題。

本研究では、これらのうち内部キャリブレーションの問題を取り扱う。

従来の内部キャリブレーションでは、カメラ内部で起きる幾何光学的変換を表す「カメラモデル」を用意し、そのパラメータ群を推定するという方式が用いられてきた。現実のカメラを表現するモデルとして用いられるものには、ピンホール(射影)カメラモデルや、それにレンズ歪みモデルを加えたもの、さらに撮像面が傾いていることを考慮したもの、などがある。このうち、レンズ歪みモデルで用いられる係数は一般に無限個であるが、モデルパラメータとしては有限個にしなければ、安定な係数の推定が行えない。また、射影カメラモデル以外にもアフィンカメラモデルなどの近似的なモデルが用いられることもあり、これら全ての組み合わせを考えると膨大な数のカメラモデルが考えられる。

本研究では、このように複雑かつ多様なカメラモデルを用いず、ピンホールカメラモデルのみを用いて内部キャリブレーションを行う方法を提案する。実験では、歪みの比較的少ないカメラと、多眼全方位カメラに用いられている歪みの大きなカメラに対して、本手法を適用した結果を示し、キャリブレーション済みの2枚の画像に対して Homography を推定して張り合わせた結果を示すことによって、本手法の妥当性を検証する。

以下、第2章では、内部キャリブレーションの推定がこれまでどのように行われてきたのかを概観し、3章で提案手法の説明を行い、4章では実験結果とその評価、5章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 内部キャリブレーション

カメラキャリブレーションの対象となる内部パラメータとしては、以下のようなものがある。焦点距離(光学中心から撮像面までの距離)画像中心(光学中心から撮像面におろした垂線の足の位置)

画像の縦横比

レンズ歪み係数

これらのカメラパラメータを推定するための手法として最もよく知られているのが、Tsai の手法[1][2]である。これは、世界座標系とカメラ座標系の間射影行列を求める手法であり、外部パラメータと内部パラメータを同時に求める手法である。この手法は、既知の3次元点の集合と、その画像上の投影点の組を与えて計算を行う方法であるが、3次元点集合の空間的配置に強く依存した結果しか得られない。

較正に用いる3次元点を平面上に拘束し、Homography 行列を推定することによってキャリブレーションを行う方法[3]も提案されている。これは、2つの平面物体を観測することによって、内部パラメータと外部パラメータを推定する方法である。

これらの方法はいずれもレンズ歪みがあることを前提とした計算法ではなく、レンズ歪みがない場合のカメラキャリブレーション法にレンズ歪みの補正を追加したような手法である。実際にキャリブレーションを行う場合も、まずレンズ歪み以外のパラメータを、線形解として求め、次にその線形解を初期値として非線形最適化計算によってレンズ歪み係数を求めるという算法が採られる。

Tsai の方法で用いられるレンズ歪みモデルは、歪みを受けた座標を (X_d, Y_d) とした場合、歪みを補正した座標値 (X_u, Y_u) は $X_u = X_d + D_x$ 、 $Y_u = Y_d + D_y$ と表される。

但し、

$$D_x = X_d(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 + \dots)$$

$$D_y = Y_d(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 + \dots) \quad (1)$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2}$$

であり、 (X_d, Y_d) の座標原点は歪みの中心位置に選ぶ。

この式は、そもそも近似式であり、本来は (X_d, Y_d) と (X_u, Y_u) は入れ替えて使うべきものである[4]。また、レンズ歪係数 κ_i を何次まで用いるべきかが明確ではなく、通常の場合 κ_1 でほぼ歪みを近似できるが、非常に画角の広いレンズの場合、 κ_2 も用いる必要が出てくる。

このようなアプローチに対し、規則的なパターンを撮影し、その規則性を利用して内挿計算によってレンズ歪みを除去する方法も用いられるようになってきている。しかし、これらの研究ではレンズ歪みの除去後は通常のカメライヤリブレーションが行われている。また、Nayerら[5]はこの内挿による歪みの除去方法を行い、さらに光学中心を1点と仮定せずに、その描く軌跡を推定する手法を提案しているが、較正用物体の設置に関する物理的正確さが要求されるため、この方法を実際に再現することは極めて困難である。

3. 提案手法

本研究で提案する手法は、次の2つの処理から成る。

Rectification: 平面状の較正用物体を仮想スクリーンとして利用し、画像を仮想スクリーンに非線形投影することによって歪みを除去する。

Ray-Tracing: 2枚の較正物体を用いて入射光の全ての軌跡を3次元空間内で描き、これらが収束する位置として光学中心の位置を推定する。

この手法は、較正用の平面を歪み除去後の仮想スクリーンと見なしているため、実カメラに対するカメラキャリブレーションではなく、仮想スクリーンを撮像面とする仮想カメラに対す

るキャリブレーション法となっている。

Rectificationでは実撮像面から仮想スクリーンへの非線形投影計算によって、歪みのない画像が得られるため、画像の縦横比とレンズ歪み係数などは求める必要がない。

また、**Ray-Tracing**によって、仮想スクリーンに対する光学中心の位置が求められるため、この結果から、焦点距離と画像中心を計算することができる。

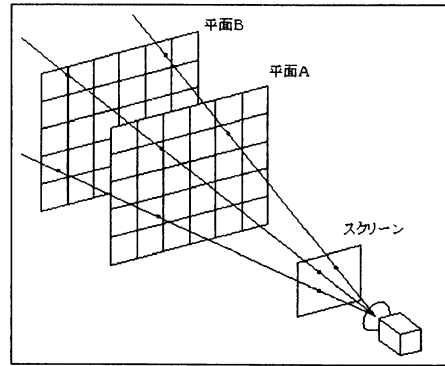


図1 提案手法の原理

3.1. Rectification

図1のように平面状の正方格子模様を垂直方向から撮影した場合、画像上の各格子点が本来投影されるべき位置は、この正方格子をそのまま縮小したものになるはずである。しかし、実際に撮影してみると、レンズ歪みの影響や、カメラの撮像面が平面に対して平行に置かれていないことなどに起因して完全な、正方格子像は得られない。

Rectification 処理では、レンズの歪みや撮像面の傾きの影響を消すために、撮影した画像上の各格子点位置を正方格子の対応する格子点に写像し、その他の点も格子点間の内挿計算によって移動させるという処理を行う。

本研究では、図2に示す正方格子内の点 $\mathbf{P}(u, v)$ は式(2)のように双一次補間によって表す。

$$\mathbf{P}(u, v) = (1-v)\{(1-u)\mathbf{P}_{(ij)} + u\mathbf{P}_{(i,j+1)}\} + v\{(1-u)\mathbf{P}_{(i+1,j)} + u\mathbf{P}_{(i+1,j+1)}\} \quad (2)$$

実撮像面上の点を $P(u, v)$ と見なすと、 (u, v) に対して適切なオフセットを付加したものは、仮想スクリーン上の点になり、式(2)によって内挿計算が行える。

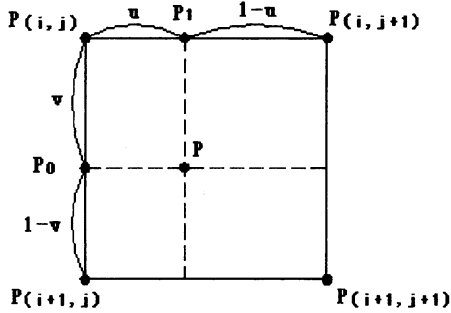


図2 内挿計算

3.2. Ray-Tracing

図1に示すように、カメラを固定したまま、正方格子を描いた平面物体を一定の距離だけ平行移動して奥行きを変化させ、再び画像の撮影を行う。このとき、実撮像面の同じ座標に投影される平面物体上の3次元位置が2点決まる。これら2点は、カメラの光学中心を通過する1本の光線上に位置しており、それらの3次元座標から、仮想カメラに入射する仮想的な光線の軌跡を描くことができる。このような直線群を複数求め、それらが互いに最も近接する点を求めればそれが光学中心の位置となる。

このような点を求めるために、次の手順で計算を行う。

1. ある3次元直線と任意の3次元点との距離を求める式を導出する。
2. 次に複数の3次元直線に関して、3次元点からそれぞれの直線に対する距離の2乗の総和を直線群の収束度の評価値として求める。
3. そして、この評価値を最小化する3次元点を計算する

以下、この計算の詳細について述べる。

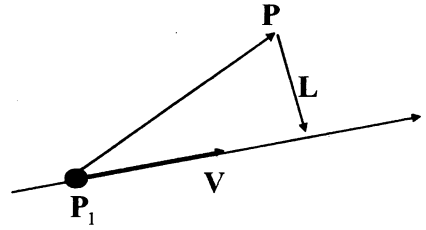


図3 最近接点の計算

図3に示すように、点 P_1 を通過し方向ベクトル V を持つ3次元直線を考える。この直線に任意の点 P から下ろした垂線を点 P を起点とするベクトル L で表す。このとき、 L は式(3)によって表される。

$$L = V^T(P - P_1)V - (P - P_1) \quad (3)$$

$$= V^T P V - V^T P_1 V - P + P_1$$

この式を整理すると、

$$L = (V^T V - I)P - (V^T V - I)P_1$$

$$= AP + B$$

となる。直線が複数存在する場合は、

$$\min_P \sum_j \|L_j\|^2 = \min_P \sum_j \|A_j P - B_j\|^2 \quad (4)$$

という問題を解けばよいことになり、結局、

$$P^* = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (5)$$

が最適解となる。但し、

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_j \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_j \end{pmatrix}$$

である。

3.3. 提案手法の前提条件

注意すべきことは、上述の Rectification と Ray-Tracing の処理で前提とした較正用物体とカメラの配置のうち、本当に必要な仮定は、「カメラが単一の光学中心を持つこと」と「2枚の較正用物体が平面であり互いに平行に配置されている」ということだけである。これは、Ray-Tracing 処理において光線の収束

度 $\min_P \sum_j \|L_j\|^2$ を評価することができるた

めである。例えば、2枚の較正用物体間の距離の計測値が不正確でも光線の収束度を最も良くする平面間の距離の比は最適化計算によって推定することができる。また、カメラの撮像面と平面とが平行でない場合にも傾きの角度を同様に推定することができる。このように、本手法は原理上多くの前提条件を必要としているように見えるが、実際にカメラキャリブレーションを行う場合にはスライドステージ上に置いた正方格子を撮影するだけでよい。

4. 実験

この章では、提案手法を用いてカメラキャリブレーションを行い、その評価を行う。

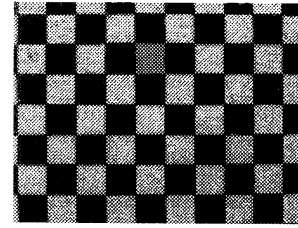
4.1. カメラキャリブレーション

この実験では、歪みの大きいカメラと小さいカメラでキャリブレーションを行った結果を示す。歪みの小さなカメラとしては、Sony 製 DFW-VL500 のズームレンズを望遠にして用いる。歪みの大きなカメラとしては超広角レンズを用いている Point Grey Research 社製の多眼全方位カメラ Ladybug を用いた。

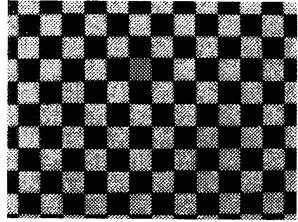
歪みの小さいカメラ

この実験では1辺が 10 mmの正方形から成るチェッカーパターンを3通りの距離で撮影し、カメラキャリブレーションを行った。実際に撮影した画像が図4になる。それぞれカメラからの距離の計測値は 250 mm, 350 mm 450 mmである。

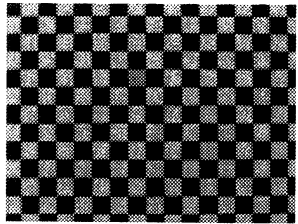
これらの画像に対して、光線の軌跡を求めた結果が図5である。この図から光線は、ほぼ一点で収束していることがわかる。



(a) 距離 250mm



(b) 距離 350mm



(c) 距離 450mm

図4 歪みの小さいカメラで撮影したキャリブレーションパターン

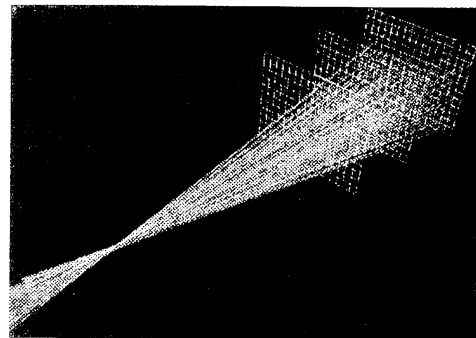


図5 光学中心の推定結果

式(5)によって求められた光学中心の座標は、以下の通りである。

対にした平面の距離 推定された光学中心
 250 mm: 350 mm $P^* = (1198, 1041, -1074)$
 250 mm: 450 mm $P^* = (1194, 1029, -1108)$
 350 mm: 450 mm $P^* = (1188, 1009, -1163)$

それぞれの点の位置は最大で 100 程度離れており、これは実寸に直すと 5 mm 程度である。

歪みの大きいカメラ

この実験では2通りの距離で、1辺が 20 mm のチェス盤のような正方形パターンを撮影し、キャリブレーションを行った。実際に撮影された画像が図6であり、それぞれカメラから平面までの距離(計測値)は 100 mm, 200 mm である。

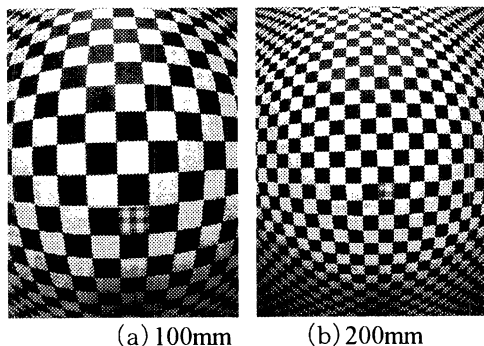


図6 歪みの大きいカメラで撮影されたキャリブレーションパターン

図7に示したのが、このカメラに入射する光線の軌跡である。この場合、較正用に撮影した画像は、図6に示すように非常に大きな歪みを持っているにもかかわらず、図7では、殆どの光線が 1 点に収束しており、Ladybug で用いられているレンズが魚眼レンズではなく超広角レンズであるということが確認できる。

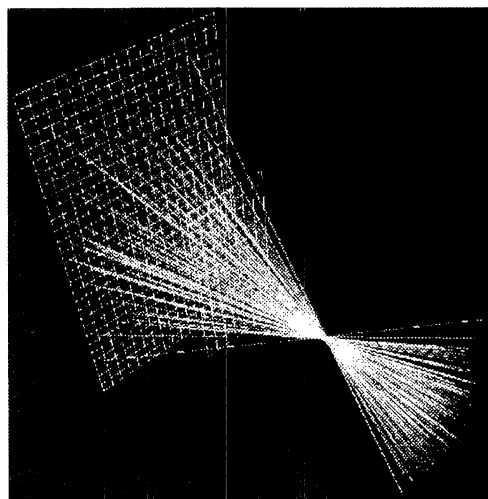


図7 光学中心の推定結果

式(5)によって求められた光学中心の座標は、以下の通りである。

推定された光学中心
 $P^* = (177, -256, -1043)$

4.2. カメラ歪みの除去効果

光学中心の推定がほぼ正しく行えたことは、レンズ歪みの除去も正しく行えていることを示唆している。ここでは、較正の過程で求めた Rectification を施した画像を示し、レンズ歪みがどの程度除去できているかについて議論する。尚、使用するカメラは前出の Ladybug とする。

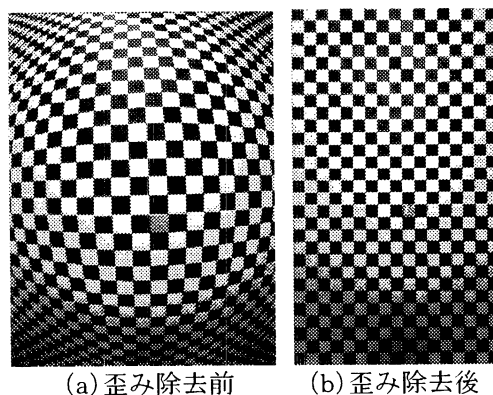


図8 歪み除去の効果1

図8に示したのが、校正用物体に対して Rectification を施した画像である。この画像を見ると、歪んだ格子が正しい正方格子に変換されていることが確認できる。



(a) 歪み除去前



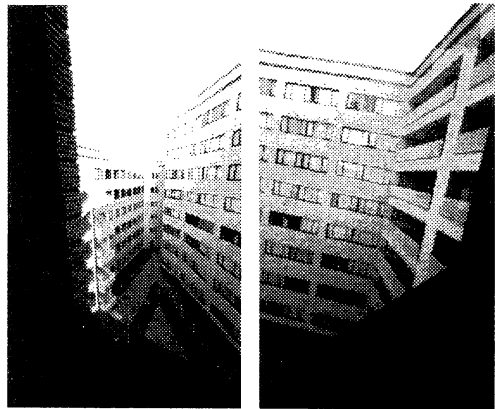
(b) 歪み除去後

図9 歪み除去の効果2

また、図9には校正用物体ではなく、通常の風景を撮影した場合について、歪み除去の効果を示した。この図を見ると湾曲していた直線が全て補正されていることが確認できる。

この歪み補正の効果を検証するために

Ladybug の隣接するカメラのキャリブレーションを行い、それらのカメラから得られた画像の特徴点からホモグラフィ行列を計算し、合成を行った結果を図10, 11に示す。まず、図10に示す補正後の窓枠の角などの特徴点 57 点を対応付け、Homography 行列を推定することによって、同図(b)の画像を同図(a)のスクリーン上に変換し、画像の合成を行った結果が図11である。Ladybug の隣接するカメラの光学中心は約3cmほどずれているため、理論上この方法で完全に正確な画像合成は行えないはずであるが、光学中心間の距離が比較的短いため、遠方の物体に関しては無視できる程度の誤差で画像合成が行えるはずである。



(a)左

(b)右

図10 歪み除去後の画像

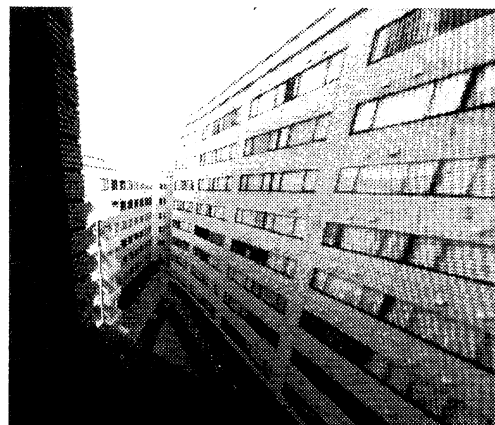


図11 画像の合成(右端はカットしている)

図11を見ると、幾何学的にはほぼ問題なく張り合わせが行えているが、右端の部分に縞模様が現れている。これは、Ladybug がカラーBayerパターンを用いた撮像素子の画像をそのまま計算機に送り、計算機上で色補間の計算を行っているために生じた僅かな縞模様が、右端で極端な画像の拡大が起きたため顕在化した問題であると考えられる。

5. まとめ

本論文では、従来キャリブレーションが困難であった、広角レンズなどの特殊なレンズを用いたカメラにも適用することのできるカメラの内部キャリブレーション法を提案した。これは、レンズ歪み係数や画像サイズなどの内部パラメータを求める代わりに、画像を完全な透視投影像に変換することによって画像の歪みを解消し、同時に光学中心の推定も行うことのできる手法である。実際に実験を行った結果、多少の問題は残っているが、提案手法の有効性を確認することができた。

謝辞

本研究を行うにあたって、和歌山大学大学院システム工学研究科博士3年の Daniel Moldvan 氏に、双一次補間の方法および光学中心の推定方法について有益なご助言を頂きましたことを感謝いたします。

参考文献

- [1] R.Y.Tsai, "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision", In proc. of CVPR, pp. 364-374 (1986)
- [2] R.Y.Tsai, "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", IEEE J. Robot. Automat., Vol.3, pp. 323-344 (1987)
- [3] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration", IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), volume 22, number 11, pages

1330-1334, November 2000.

- [4] 和田, 浮田, 松山, "視点固定型パン・チルト・ズームカメラとその応用", 信学論D-II, Vol. J81-D-II, No. 6, pp. 1182-1193, 1998
- [5] Shree K. Nayar M.D. Grossberg, "A general imaging model and a method for finding its parameters," in Proceedings of ICCV, 2001.