

光路分析に基づく直接カメラ校正法 Direct Camera Calibration Based on Optical Path Analysis

小川 なつき[†] 川端 晃一[‡] 伊藤 稔[†]
Natsuki Ogawa Koichi Kawabata Minoru Ito

1. はじめに

近年、カメラを用いた物体認識・計測の技術が広く利用されるようになり、そのためカメラの置かれた絶対位置・方位を検出する校正法が益々重要な課題となってきた。[1] 従来の校正法では、予め位置や特徴が既知なマーク点をカメラ入力し、撮影画像上の各マーク位置と、カメラパラメータを使ってマークを再投影したときのマーク像位置とが一致するように、カメラパラメータを算出する間接的手法が用いられてきた。[2,3] しかし、内部パラメータ値は合焦操作で著しく変化するが、校正時においてその値が既知でない場合には、外部パラメータを必ずしも安定して高精度に得ることができなかった。

そこで著者らは、最近、この問題を解決する全く新たなカメラ校正法として直接カメラ校正法(DCC)を提案した。[4] この手法は、外部パラメータを内部パラメータとは独立して、かつ物理的に求めることができるという極めて重要な特徴を有している。本稿では、さらに校正値の補正法を組み合わせる手法について提案するとともに、この手法により外部パラメータを校正することの有用性を実験例により明らかにする。

2. 原理

図1にシステム構成を示す。2枚のパターン板 P_1, P_2 は既知の位置に設置されている。簡単のためこの2枚のパターン板は平行に置かれているが、必ずしも平行である必要はない。このパターン板上には構造化パターンが表示されており、校正対象のカメラはこのパターンを撮影する。撮影画像の各画素 (i, j) に対応する撮像面上の位置に入射した光線は、パターンマッチング手法により、パターン板上の p_1 と p_2 を通過する光線の軌跡として同定される。換言すれば、パターン板上の位置 p_1, p_2 を通過する光線はレンズを通過してカメラセンサに入射し、その点は撮影画像座標 (i, j) に対応している。

各画素に対応する上記光線軌跡を求めると、その光線群は、カメラレンズ系が中心投影系である限り、ある位置で交差する。その交差位置がレンズ主点位置であり、また、画像中心に入射する光線の軌跡からカメラ方位を決定することが出来る。このように、光線軌跡を物理的に求めることにより、内部パラメータとは全く独立して外部パラメータを求めることができる。

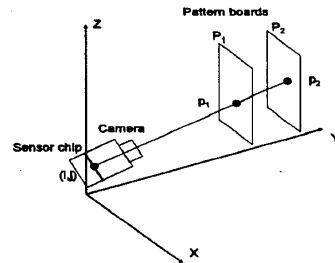


図1 システム構成

3. 校正手順

図2に校正手順を示す。パターン板 P_1 上に構造化パターンを表示し、カメラで撮影する。その撮影画像とパターン板上のパターンとの対応処理により、画像の各画素に対応するパターン板上の位置を同定する。構造化パターンの構造に関する条件は特にないが、高い分解能に適する構造であることが望ましい。本章では1画素分解能に対応する構造を使用した場合について述べている。同様にして画像の各画素に対応するパターン板 P_2 上の位置を同定する。このように、カメラ画像とパターン板 P_1, P_2 との対応位置が、撮影画像1画素の高い分解能で同定される。次に、その対応位置から、画像の各画素の輝点を生じさせている光線軌跡を光線方程式として算出する。この方程式を3次元空間上で平均することにより光軸の式を算出することができる。そしてこの式をカメラ回転角に換算する。

光軸に垂直な面を複数設けてその各面と光線との交点を光線切断点分布として算出する。そしてその切断点の広がりや切断面位置の関係を求め、広がりが最も小さくなるはずの切断面位置を算出する。この位置をレンズ主点とする。また、切断点は切断面がレンズ主点から十分離れた位置では格子状に分布することに着目し、その格子の回転角を、カメラの光軸周りの回転角として算出する。

上述の光線軌跡の算出値にはパターン板のドットピッチに起因するばらつきがあるため光軸方位に誤差が含まれている可能性がある。もしもその誤差があると、切断面が真の光軸と必ずしも垂直になっていなく、誤差要因となる。このため、光軸算出の誤差検出と補正が重要となる。この誤差検出のため、まず、切断面を光軸に沿って移動し、各位置において切断点の重心位置を算出する。その位置分布はある直線上周りに分布しているので、その直線を最小自乗法により算出する。そしてその直線方向と光軸方向のなす角度を算出する。この角度が光軸方向の誤差の検出値である。このようにして、光軸誤差を検出し補正した後、レンズ主点とカメラ回転角を再度算出し直す。

[†]工学院大学 Kogakuin University

[‡]現在日本 IBM 勤務 IBM JAPAN

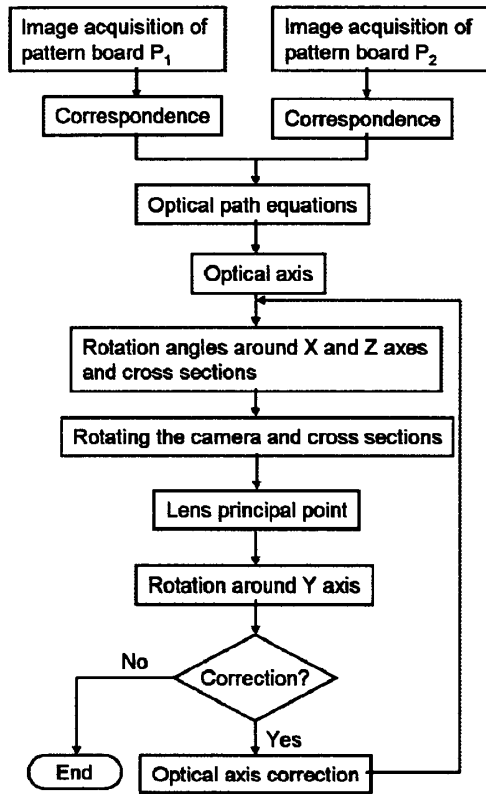


図2 校正手順の流れ

4. 実験手法と結果

図3のようにパターン板とカメラを設置する。パターン板としてドットピッチが0.29mm、15インチの液晶ディスプレイを用い、2枚のパターン板の代わりに1枚を平行移動して使用している。実験に用いたカメラは1280×1024[pixel]のモノクロデジタルカメラであり、焦点距離25mmのレンズを装着している。レンズ歪みを避けるため、画像中心付近の101×101画素をカメラ校正に用いている。鏡は原理上必要ではないが、カメラとパターン板を一体にして設置したいという目的のために、ここでは敢えて鏡を用いている。

切断面が光軸に沿って移動したときの切断点の分布の広がり具合を評価値で表し、その評価値Sの変化の例を図4に示す。評価値Sが最小となる断面上にレンズ主点が存在している。

表1に校正結果と補正結果の実験例を示す。(a)は補正前の回転角の校正値がやや大きな誤差を示したときの例、(b)はその誤差が比較的小さかったときの例である。補正を行った結果、(a)では回転角度の補正が表示桁未満であり、レンズ主点位置 c_1, c_2 は約0.2mm補正されている。(b)では回転角 α, γ がそれぞれ約0.1, 0.02度補正されており、また、レンズ主点位置は約0.1~0.3mm補正されていることが分かる。

校正精度の判断材料を得るために、校正されたカメラパラメータを用いた再投影パターンとカメラ入力した実パターンの比較を行った。(a)についての平均位置誤差は横方向、縦方向それぞれ0.168, -0.109画素となり、(b)についてはそれぞれ-0.08, 0.114画素となった。

真の校正値を知る手段が存在しないために断言できないが、これらの結果は高い校正精度が得られていることを示していると考えられる。

5. 結論

直接カメラ校正法(DCC法)に補正処理を組み込み、外部パラメータを高い精度で検出する手法を提示した。また、実験によりその有用性を明らかにした。

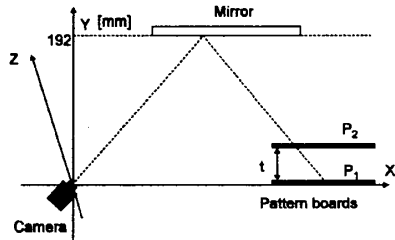


図3 実験配置図

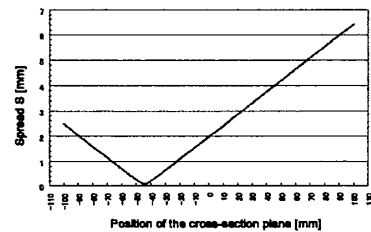


図4 断面における評価値 S

表1 実験結果

| (a) | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|-----------|
| Parameters | | Expected | Measured | Corrected |
| The principal point position [mm] | c_1 | -5~-25 | -16.307 | -16.505 |
| | c_2 | -15~-35 | -19.627 | -19.436 |
| | c_3 | 186~194 | 187.917 | 188.036 |
| Camera rotation angle [deg] | α | -5~-5 | 3.558 | 3.558 |
| | β | -3~-3 | 2.1223 | 2.1223 |
| | γ | -42~-48 | -42.702 | -42.702 |
| (b) | | | | |
| Parameters | | Expected | Measured | Corrected |
| The principal point position [mm] | c_1 | -5~-25 | -8.673 | -8.407 |
| | c_2 | -15~-35 | -11.391 | -11.195 |
| | c_3 | 186~194 | 187.386 | 187.480 |
| Camera rotation angle [deg] | α | -5~-5 | 3.401 | 3.498 |
| | β | -3~-3 | 1.8998 | 1.8998 |
| | γ | -42~-48 | -42.705 | -42.688 |

参考文献

- [1] M. Ito. Three dimensional measurements using stereopsis. *Trans. IEE Jpn*, 107-C(7): 613-618, 1987
- [2] M. Ito. Robot vision modeling - camera modeling and camera calibration. *Adv. Robotics*, 5(3): 321-335, 1991
- [3] M. Ito and A. Ishii. A non-iterative procedure for rapid and precise camera calibration, *Pattern Recognition*, 27(2): 301-310, 1994
- [4] K. Kawabata, K. Ueno and M. Ito. Direct Camera Calibration based on Optical Ray Analysis, In Proc. *International Workshop on Advanced Image Technology 2008 (IWAIT2008)*, pp.72, Taiwan, Jan. 2008