

カラーフィルタリングを利用した透過型校正器具によるカメラ校正

The Camera Calibration with a Transparent Calibration Tool Using Color Filtering

片山 保宏[†]
Yasuhiro Katayama

1 はじめに

カメラパラメータの推定を行なう校正（キャリブレーション）は、コンピュータビジョンにとって重要な研究課題である [2, 3, 4]。位置情報が既知の点や線等の校正パターンが描かれた校正器具を用いる方法が一般的であるが、器具の設置や撤去の必要があり運用の簡便さを欠く。本論文では、新たにカラーフィルタリングを利用した透過型校正器具による校正法の提案を行なう。この透過型校正器具は、カラーフィルタを用いて形成された校正パターンを空間的に配置したものであり、それを透過してシーンの撮影が可能な器具である。この透過型校正器具を、カラーカメラの前に配置し、カラーバンドの使い分けによる校正用画像とシーン画像の撮影を行なう。提案手法では、校正器具の再設置や撤去が不要の簡便な校正が可能となる。校正パターンとシーンの同時撮影が可能になるので、動く物体を追跡しながら計測する様な応用に向いており、航空宇宙分野等での利用が期待できる。

校正は、校正器具を用いる場合と用いない場合の2つに大別することができる。前者は、校正のための専用器具である校正器具を撮影し校正する方法である [5, 6]。シーンを別途撮影する必要や、器具の大きさ、設置方法などに問題があり簡便さを欠く。しかし、校正器具を用いる校正は、確立された手法であり、多くの研究で、ピンホールカメラモデルに基づいた校正法が用いられている [10, 11]。一方、後者は、画像に写り込んでいるシーンの幾何学的な特徴を利用して校正を行なうもので、様々な方法が提案されている [4, 7]。校正器具に起因する運用の不便さはないが、特徴抽出や対応付けの難しさ、複数枚の画像や視点位置の変化が必要になる等の撮影条件や対象についての制約がある。

校正器具に起因する運用の不便さは、以下のような点である。フォーカス外れによるぼけを抑えるために、校正器具は撮影対象の近くに配置される。このために、撮影対象に比例して大きな校正器具が必要となる。また、撮影対象が校正器具に隠れてしまうことがあり、校正用画像を撮影した後で校正器具を取り除く必要がある。カメラ位置の変更後には、再校正のために校正器具の再設置、再撤去が必要となる。このため、連続した画像撮影が必要な動く物体の追跡等への応用が困難である。

筆者は、フォーカスによるぼけの性質を利用した透過型校正器具による校正の提案を行なった [1]。これは、ワ

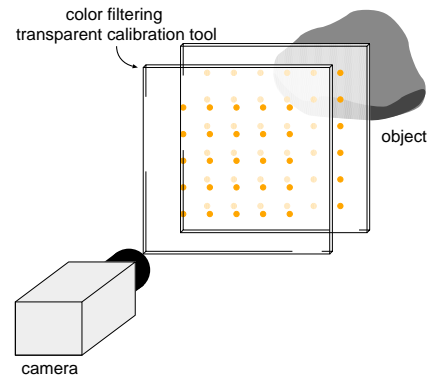


図 1: カラーフィルタ式-透過型校正器具による校正の概観

イヤ等を利用した微細な校正パターンからなる透過型校正器具をカメラの直前に配置して、フォーカスの調節による校正パターンの結像と非結像を使い分け、校正用の画像とシーンの撮影を行なう校正法である。この提案では、校正器具の設置・撤去が不要であり、簡便に校正が行なえる。ただし、フォーカスの調節に伴う像の大きさの変化を考慮する必要がある。

同様に本論文でも校正器具の設置・撤去の不要な校正法を提案する。カラーフィルタを用いて構成された透過型校正器具をカラーカメラで撮影し、カラーバンドを使い分け校正用の画像とシーンの撮影を行なう校正法である。器具は、カメラから少し離れた位置に配置して用いる。校正パターンは多少ぼけるが、校正点を抽出することは可能である。フォーカス調節が不要であり、1回の撮影で校正パターンとシーンを同時に取得できる。

本論文では、カラーフィルタリングを用いた透過型校正器具による校正について説明しその特徴を述べる。また、ぼけた校正パターンから、位置を正確に抽出するためのロバストな校正点抽出法を提案する。そして、実際の器具を用いて校正を行ない、従来法の結果と比較し提案手法の有効性を示す。

2 カラーフィルタリングを利用した透過型校正器具

本論文では、新たにカラーフィルタを用いた透過型校正器具を提案する。この器具は、カラーフィルタによる校正パターンを空間的に配置しており、それを透過して

[†] (独)宇宙航空研究開発機構, Japan Aerospace Exploration Agency

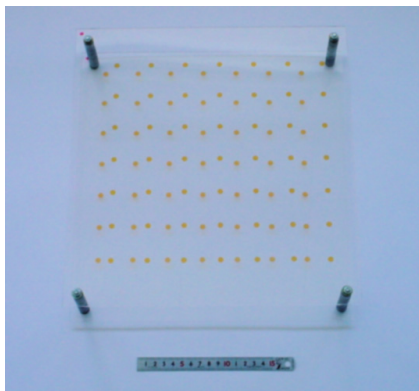


図 2: カラーフィルタ式-透過型校正器具

シーンの撮影が可能な器具である。この透過型校正器具を、カメラの前に配置し校正用画像とシーン画像の撮影を行なう。カメラと器具は互いに分離しており、カメラが向き等を変えた場合、その変化量は器具によるワールド座標に対する値として求まる。図 1 に、透過型校正器具による校正の概観を示す。

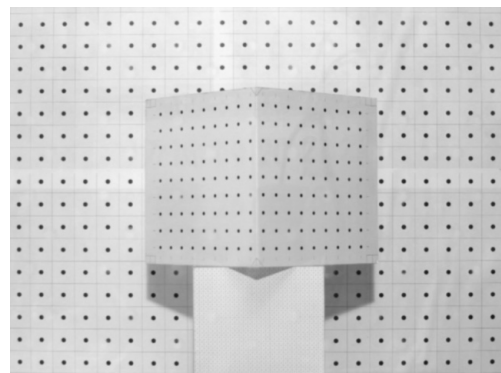
カラーカメラを用い各カラーバンド (RGB) で得られる画像を校正用画像とシーン画像として使い分ける。例えば、黄色のフィルタを用いた場合、R (G) バンドの光はフィルタに遮られることなく透過するので、通常通りの画像が撮影できる。これに対して、B バンドの光はフィルタで遮られ、その部分が校正パターンとなる。よって、B 成分の画像を校正用の画像として用いることができる。カラー画像の 1 回の撮影で、校正用画像とシーンの撮影が可能になる。

校正器具は、撮影対象に比べて近い位置に配置されているので、校正パターンはフォーカスがあっておらずぼけた像になる。本提案では、ぼけた像から重心を計算して校正点として用いる (3 節 参照)。

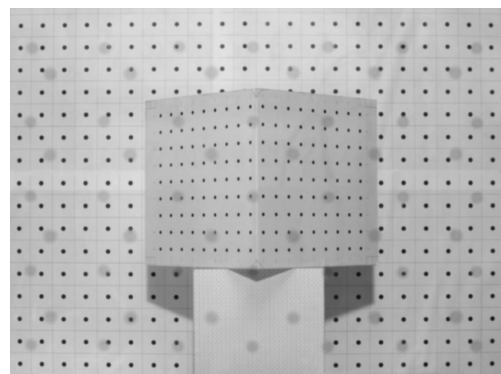
カラーバンドを使い分けるので、得られるシーン画像は、フルカラーでなく、また、撮影対象の色も制限されてしまう。しかしながら、ステレオ視の対応点探索では、単バンドの画像 (グレースケール画像) が多く用いられる等 (色情報によらない) マッチングや認識等の応用では単バンドの画像でも十分である。また、クロマキー合成のように使用できる色が限定されるにもかかわらず広く利用される例もある。

図 2 に、実験で使用したカラーフィルタ式-透過型校正器具を示す。器具は 2 枚の透明の亚克力板 (320×340×2[mm]) を 60[mm] 間隔で固定している。校正パターンは黄色のポリエステルのカラーフィルムで形成している。校正パターンの形状は、直径 6[mm] の円で、40[mm] 間隔で 7×7 の格子状に配置してある。前層と後層の校正パターンは重ならないようにずらしてある。

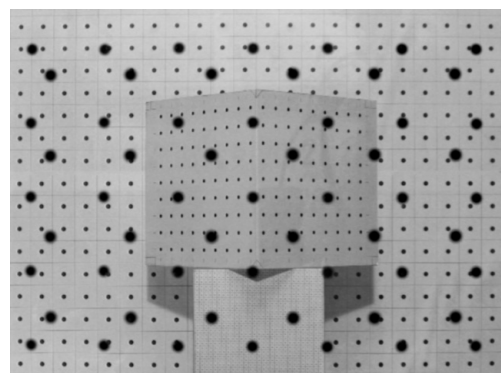
図 3 は、図 2 の器具を用いて撮影した画像である。図 3(a)~(c) は、RGB 成分の画像である。透過型校正器具は、カメラから約 0.7[m] の位置に設置しており、撮影対象は、カメラから約 1.70[m] の位置にある従来の校正



(a) R 成分画像 (シーン画像として利用)



(b) G 成分画像



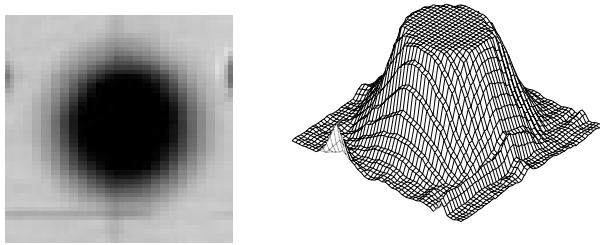
(c) B 成分画像 (校正用画像として利用)

図 3: 撮影画像 (RGB 成分画像)

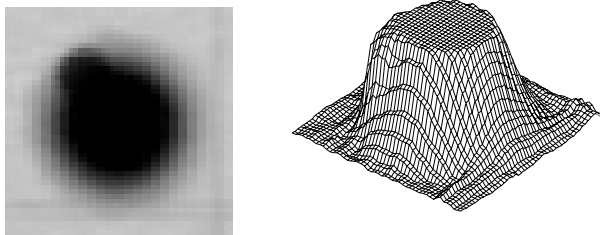
器具である。図 3(a) に示す R 成分画像は、カラーフィルタによる遮蔽の影響がほとんどない。シーン画像として用いることが可能である。また、図 3(b) に示す G 成分画像は、カラーフィルタによる遮蔽がわずかにある。シーン画像としてはやや不向きである。これらに対して、図 3(c) に示す B 成分画像は、カラーフィルタの遮蔽による校正パターンがはっきりと現われている。校正用の画像として用いることが可能である。

3 ロバストな校正点の抽出法

校正パターンはあるバンドの光が遮蔽されることで、濃淡値の低い部分として画像に写る。また、校正器具に



(a) 重心がずれない場合



(b) 重心がずれる場合（撮影対象を分離できない場合）

図 4: 撮影対象が校正パターンの重心抽出に与える影響

フォーカスがっていないため、校正パターンの像はぼけている。本論文では、濃淡値の低い部分の重心を求め、その重心を校正パターンの中心（校正点）として校正を行なう。なお、円は楕円として画像面に投影され、その楕円の中心と円の中心は一致しないことが知られているが [8]、ここでは、円がのる平面が画像面にほぼ平行に配置されるので、その影響は小さいと考える。

撮影対象自体が黒い場合、校正パターンと対象を分離することができない。このため、校正パターンの重心がずれてしまう問題がある。図 4 に図 3(c) の場合の実例を示す。左の画像はある校正パターンを拡大した画像であり、右のグラフは濃淡値が低いものが上になるよう 3 次元プロットしたものである。図 4(a) は、重心がずれない場合である。3 次元プロットの上部は平らな円である。図 4(b) は、重心がずれる場合である。撮影対象の小さい黒点と校正パターンが重なっており、3 次元プロットの上部がいびつな形になっている。校正パターンの重心がずれることが考えられる。

本論文では、校正点（校正パターンの中心）が平面（前層と後層）上にあり、その位置が設計値から正確に分かっているという性質を利用して、像の写り込みによるずれの影響を受けにくい校正点のロバストな抽出方法を提案する。具体的には、以下の様な手順で、射影変換行列を段階的に求め、校正点を求める。

初めに手動で指定したウィンドウ内の（1 次）重心を各々の校正点として求める（重心の求め方は後述）。この（1 次）重心と校正点の位置の設計値を用いて（1 次）射影変換行列を計算する。そして（1 次）射影変換行列の逆行列を用いて、校正点の設計値を変換し（1 次）重心との距離を各々求める。この距離が大きい（1 次）重心は、正確に求まっていない例外とする¹。

¹ この実験では、全点の距離の平均を求め、平均より大きな距離の

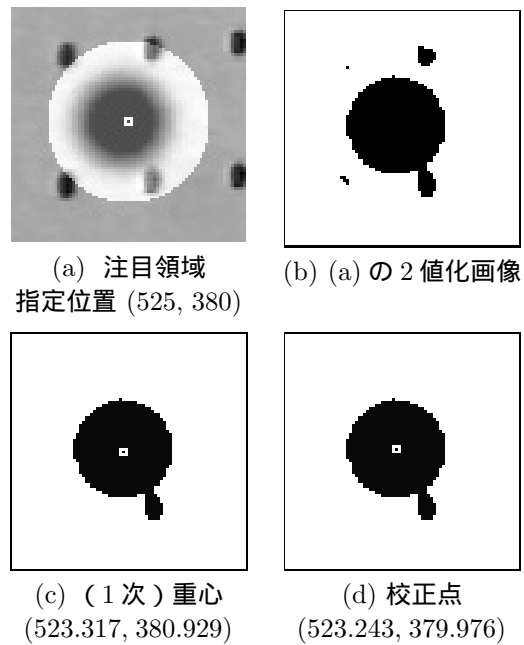


図 5: 重心の求め方と校正点

次に例外を除いた（2 次）重心から再度（2 次）射影変換行列を計算する。そして、この（2 次）射影変換行列の逆行列を用いて、校正点の設計値を変換し校正点とする。本論文では、前後 2 層の透過型校正器具を用いるので、各層についてこの処理を行なう。

校正パターンの重心の求め方

本論文では、手動で指定した校正点の位置を初期値として濃淡値から重心を求める。ここでは、前層のある点に注目し、その処理結果を用いて重心の求め方について述べる。

まず、校正パターンの位置を手動で指定し、その点を中心とする円形のウィンドウを設定する。図 5(a) にウィンドウ領域の濃淡を明るく表示したものを示す。

次に、ウィンドウ内で 2 値化を行なう。しきい値はウィンドウ内の濃淡値の平均を用いる。図 5(b) に処理結果を示す。ウィンドウ内には、校正パターン以外に濃淡の低い部分がある場合があるので、2 値画像にラベリングを行ない、手動で指定した点が、含まれないラベル領域を排除する。この例の場合では、校正パターンの他に、4 個の小さな黒点がウィンドウ内に含まれている。ラベリング処理で 3 個の黒点は排除できるが、1 個の黒点は校正パターンに連結しており分離することができない。（これは、図 4(b) で示した状況と同じである。）

そして、指定点が含まれるラベリング領域をマスクとして使い、原画像の濃淡値を用い重心（1 次モーメント）計算する。図 5(c) に、指定点を含むラベリング領域とその重心（□印の位置）を示す。校正パターンでない黒点が含まれているため、重心位置が下方にずれていることがわかる。この重心は（1 次）重心として（1 次）射影変換行列を求めるために利用する。

点を例外と判定した。

表 1: 提案手法と従来法の内部パラメータと評価値

parameter/error	Proposal	Usual
fk [-]	3629.670	3234.471
f [mm]*	16.878	15.040
u_0 [pixels]	644.963	651.132
v_0 [pixels]	516.027	353.076
mean error [pixels]	0.856	0.835
std.dev. error [pixels]	0.472	0.486
max. error [pixels]	2.263	1.839

$$* k[1/\text{mm}] = 1/4.65 \times 10^{-6}$$

表 2: 提案手法と従来法の外部パラメータの相対変化量

parameter	rotation		translation	
	Proposal	Usual	Proposal	Usual
α [degrees]	-0.603	-0.003	0.008	0.037
β [degrees]	1.204	0.963	-0.134	-0.090
γ [degrees]	0.013	-0.044	0.015	0.009
t_x [mm]	1.925	0.895	15.740	13.560
t_y [mm]	-0.186	-0.157	-0.241	-0.014
t_z [mm]	3.973	-4.122	2.393	-0.227
t [mm]	4.418	4.221	15.923	13.562

図 5(d) には、ロバストな校正点抽出法の結果得られた校正点を □ 印で示している。この点は、本来の校正パターンの重心位置に近いと思われる。なお、この例の(1次)重心は、黒点によるずれのために例外と判定され(2次)射影変換行列の計算には用いられていない。

4 実験結果

本節では、実際のカメラを用いて提案手法による校正を行なった結果を示す。また、従来手法によって得られた結果との比較を行なう。使用したカメラは SONY DFW-SX900 で、レンズは FUJINON HF16HA-1B である。3 節で述べたロバストな推定により得られた校正点を用いて、一般的なピンホールカメラモデルに基づいた方法 [10] で校正を行ない、下記の内部・外部パラメータ (A, R, t) を求めた。

$$A = \begin{bmatrix} fk & 0 & u_0 \\ 0 & fk & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = R(Z, \gamma)R(Y, \beta)R(X, \alpha), t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

なお、レンズ歪みについては、予め計測し除去を施した画像 [9] を用いている。

図 3(c) に示した B 成分画像に提案手法を用いて校正を行ない得られた内部パラメータと評価値を表 1 に示す。校正点として与えた画像上の位置と、得られた透視投影行列を用いて校正点の設計値を画像に投影した点の位置との距離の平均、標準偏差、最大値を評価値とした。評価値は小さい程よい校正が行なえているとみなせる。また、図 3(a) に示した R 成分画像を用い、シーン中の従来の校正器具を用いて校正した結果も同様に示す。なお、R-B 成分画像の像の大きさ比較したところ、R 成分画像が B 成分画像より 0.29% 大きかった。色収差の影響があると考えられる。本実験では、R 成分画像の大きさを補正し用いた。

次に、カメラの姿勢を基準の位置から、右方向に約 1° 回転させた場合と右方向に約 15[mm] 平行移動させた場合の 2 通りの姿勢変化を行ない校正を行なった。得られた外部パラメータの相対変化量を表 2 に示す。

これらの実験から、提案手法は従来法とほぼ同じ程度のパラメータ推定が行なえていることが分かる。

5 おわりに

本論文では、新たにカラーフィルタリングを利用した透過型校正器具を提案した。カラーバンドの使い分けにより、シーン画像と校正用画像の同時撮影が可能な校正が行なえる。この方法により、従来の校正器具が抱えていた問題である配置・撤去の手間が解消でき、簡便にカメラ校正を行なうことができるようになる。従来は困難であった、動く物体を追跡しながら同時に校正を行なうといった応用に期待できる。また、撮影対象の写り込みにより校正点の抽出が困難になる問題に対し、射影変換行列を利用したロバストな抽出法を提案した。そして、実際の画像を用いて提案手法と従来法による校正を行ない、提案手法が従来法と同等の結果が得られることを示した。

今後は、パラメータの精度の検証や手動で指定している校正点の初期値設定の自動化を行なう。また、カメラの向きの変化に対応できるように、透過型校正器具の大きさや、形状について工夫を行ないたい。そして、航空宇宙分野等の実際の環境で利用できる画像計測システムへの適用を目指す。

参考文献

- [1] 片山保宏:「簡便なカメラ校正のための透過型校正器具の提案」, 第 11 回 画像センシングシンポジウム, 2005.
- [2] 出口光一郎:「カメラキャリブレーション手法の最近の動向」, 情処研究会報告, 93-CV-82-1, pp.1-8, 1993.
- [3] 浅田尚紀:「カメラキャリブレーション」, pp.37-53, 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳編, “コンピュータビジョン:技術評論と将来展望”, 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- [4] 植芝俊夫, 岡谷貴之, 佐藤智和:「カメラキャリブレーション」, 情処研究会報告, 2005-CVIM-148(1), pp.1-18, 2005.
- [5] Roger Y. Tsai: “A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses” IEEE. J-RA, Vol.3, pp.323-344, 1987.
- [6] Olivier D. Faugeras: “Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint”, MIT Press Cambridge, MA, 1993.
- [7] Elsayed E. and Hemaye: “A survey of camera self-calibration”, IEEE Computer Society, Proc. AVSS, pp.351-357, 2003.
- [8] Janne Heikkila and Olli Silven: “A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction”, Proc. CVPR, pp.1106-1107, 1997.
- [9] Juyang Weng, Paul Cohen and Marc Herniou: “Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation”, IEEE. Tran.PAMI, Vol.14, pp.965-980, 1992.
- [10] 徐剛, 辻三郎:「3次元ビジョン」, 共立出版, 1998.
- [11] 佐藤淳:「コンピュータビジョン-視覚の幾何学-」, コロナ社, 1999.