



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-06-045

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

透過型校正器具を用いたワイドベースラインステレオの研究

片山 保宏

2007年 3 月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発報告
JAXA Research and Development Report

透過型校正器具を用いた
ワイドベースラインステレオの研究
Wide Baseline Stereo with a Transparent Calibration Tool

片山 保宏
Yasuhiro KATAYAMA

総合技術研究本部 宇宙先進技術研究グループ
Advanced Space Technology Research Group, Institute of Aerospace Technology

2007年3月
March 2007

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

第Ⅰ部 レーザを用いた透過型校正器具によるワイドベースラインステレオのキャリブレーション	1
1 はじめに	1
2 提案器具を用いたステレオキャリブレーション	2
3 1台のカメラのキャリブレーション	3
4 2台のカメラの相対的位置・姿勢パラメータのキャリブレーション	3
5 提案器具を用いた実験	4
6 おわりに	6
第Ⅱ部 カラーフィルタを用いた透過型校正器具によるワイドベースラインステレオのキャリブレーション	8
1 はじめに	8
2 カラーフィルタリングを利用した透過型校正器具	9
3 ロバストな校正パターンの特徴抽出	9
4 透過型校正器具のステレオ視への応用	11
5 提案器具を用いた実験	11
6 おわりに	14

序 文

複数台のカメラを用いて3次元形状の復元を行なうステレオ視は、基本的な画像計測手法であり、多くの研究が行なわれている。近年では、航空宇宙分野での応用も検討されており、今後の発展が期待されている。

より遠くの物体を計測する場合には、高い計測分解能が望まれる。計測性能を高める方法の一つに、カメラ同士の間隔（基線長）を広く配置したワイドベースラインステレオがある。しかし、このワイドベースラインステレオでは、カメラを頑強に保持することが難しい等の理由から、カメラの位置姿勢関係を正確に推定する必要があり、簡便なキャリブレーション方法が求められる。この要求に対し、新たに提案した透過型校正器具を用いたワイドベースラインステレオのキャリブレーションの研究を実施した。本論文では、2つのキャリブレーション方法を提案し、各方法についての説明と実際の画像を用いた実験結果を2部構成で示す。

第Ⅰ部では、レーザを用いた透過型校正器具による方法を提案する。2枚の透明板からなる器具を左右のカメラの前に配置し、それを同時に貫くようレーザを照射し、画像に写るレーザ像からカメラ間の位置姿勢関係を推定する。

第Ⅱ部では、カラーフィルタを利用した透過型校正器具による方法を提案する。2枚の大きな透明板上にカラーフィルタでパターンを形成した器具を用い、カラーバンドの使い分けによりカメラ間の位置姿勢関係を推定する。

これらの方法は、「カメラ校正のための透過型校正器具とその校正法」として、特許出願（特許出願 2004-360736, 特許公開 2006-30157）している。また、本研究の一部は、「宇宙航空研究開発機構平成 17 年度技術調整委員会戦略研究制度」の支援を受けている。

第 I 部

レーザを用いた透過型校正器具によるワイドベースラインステレオのキャリブレーション

Abstract

Estimating camera parameters is an important topic in the area of stereo vision. We proposed a new transparent calibration tool with laser beams for on-site stereo calibration. The proposed method can be expected to be applied to visual sensors on a moving platform, i.e. an automobile, airplane or space vehicle. The tool is composed of two layers formed in a clear screen, through which it is possible to see. When a calibration is carried out, laser beams are irradiated to the proposed tools to take images with the laser spots on these screens. The geometrical information provided by the images of the laser spots can be used to calibrate stereo parameters. In this paper, we explain the proposed calibration tool and show experimental results utilizing a real scene.

概要

ステレオ視では、安定したマッチングや計測精度の向上のために、正確なカメラキャリブレーションが必要となる。本論文では、レーザを用いたキャリブレーション器具を用い、移動体のセンサとしてステレオ視を行なう場合等に、容易に実施できるキャリブレーション方法を提案する。提案方法では、2枚の平行な透明板からなる器具を左右のカメラの前に各々配置する。まず、個別にレーザを照射しその透明板上のレーザ像の位置から1台のカメラのパラメータを推定する。次に、左右2台の平行透明板を貫くレーザを照射し得られるレーザ像から、ステレオ視に必要なパラメータを推定する。ここでは、提案方法について説明し、実画像を用いた実験結果を示す。

Keywords: Wide Baseline Stereo, Stereo Calibration, Transparent Calibration Tool Using Laser

1 はじめに

複数台のカメラを用いて3次元形状の復元を行なうステレオ視は、基本的な画像計測手法である [1, 2, 3, 4, 5] レンジファインダ等の能動的な計測手法に比べて、適用できる環境が多く、広い範囲の計測や、近くから遠くまでを計測できる利点がある。近年では、自動車や航空機、宇宙機等の移動体のセンサとして、環境認識や進路決定、障害物検知等への応用が研究されている。

ステレオ視を移動体のセンサとして用いる場合には、次の点に配慮した方がよい。より遠方の計測を行なうには、カメラ間隔を広くして奥行き分解能を向上させることができる。その際、機体フレームにカメラを固定すると、振動等の影響でカメラ位置のずれが発生する恐れがある。また、移動する物体の注視や追従を行なう場合には、カメラの方向やズーム、フォーカスを変化させるこ

とが有効である。こういったカメラのパラメータ変化に対しては、(再)キャリブレーション [6, 7, 8] が必要となる。正確なカメラパラメータの推定は、安定したマッチングや計測精度の向上に必要であるが、実際の運用では、器具の設置が難しく、一般的なキャリブレーション [9, 10] は困難である。また、シーン中の平面や直線等の特別な物体の幾何学的特性を用いる方法も、常に必要な物体を撮影できるとは限らないことが問題となる。

画像中の対応関係だけを用いて E 行列や F 行列を推定するセルフキャリブレーション [1, 2, 3, 5] では、器具を用いなくて済むので、移動体のセンサに適している。しかし、復元できる情報にスケール因子の任意性があったり、平行性等を保てない射影復元になってしまう。提案方法では、2台のカメラの透視投影行列が同一のワールド座標で求まるので、物体の3次元形状を不定性なく復元することができる。

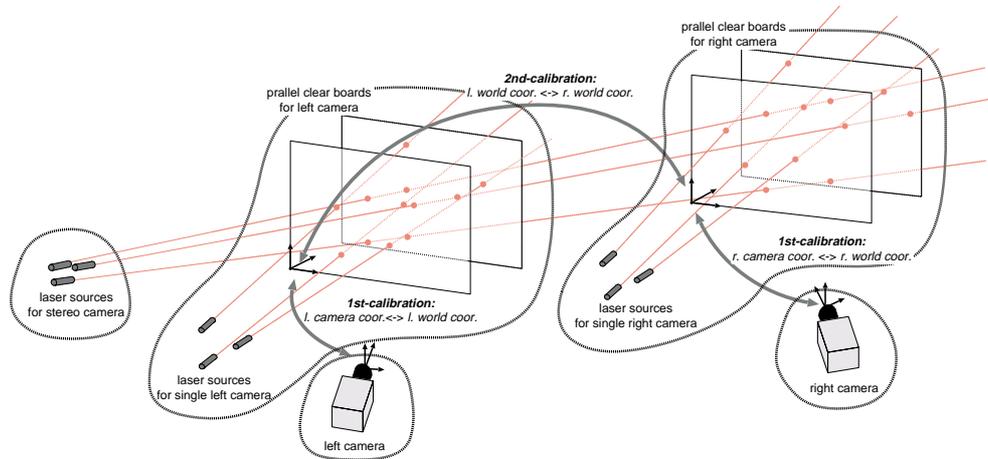


図1：レーザを用いたステレオキャリブレーションの概略

本論文では、2枚の平行透明板に複数のレーザを照射するキャリブレーション器具を用いる方法を提案する。2種類のレーザの照射方法を使い分けて、単一カメラのカメラパラメータ（透視投影行列）の推定と、ステレオ視のためのカメラ間の相対的位置・姿勢パラメータの推定を行なう。広いカメラ間隔や（再）キャリブレーションが容易になる利点があり、移動体の視覚センサのステレオキャリブレーションに向いている。

器具とカメラが振動によりずれた場合でも、レーザを再照射した画像を撮影することで、再キャリブレーションが容易に行なえる。

本論文では、2節で提案方法についての概要を述べる。3、4節では、単一カメラのキャリブレーションと、ステレオカメラのキャリブレーションについて説明する。5節では、実際の器具を試作し実験室内で行なったステレオ計測の結果を示す。

2 提案器具を用いたステレオキャリブレーション

2台のカメラによるステレオ視に応用した提案方法の概要（図1参照）について説明する。提案する器具は、3組のレーザ光源と2枚の平行な透明板2組から構成されており、図1の様に配置する。透明板は透明度の高い素材で形成し、レーザビームが照射され、透明板と交差した場合にその位置で、レーザ像がはっきりと現われる性質を持つ。そして、キャリブレーションに必要な位置条件を満たすレーザを平行透明板に照射し、そのレーザ像を用いてキャリブレーションを行なう。

提案方法は、2段階の処理によりステレオキャリブレーションを実現する。まず初めに、左右のカメラ各々について単一カメラのキャリブレーションを行なう。1台のカメラにつき、平行透明板1組と、3つ以上のレーザから

なる1組のレーザ光源を用いる。平行透明板とレーザ光源は、しっかりと固定されており、振動等により位置関係は変わらないものとする。第1段階での処理で得られるレーザ像から、透視投影行列（Projection Matrix）が推定できる。なお、ここで求まる左右のカメラの透視投影行列は、左右のカメラで異なるワールド座標である。

次の段階の処理は、左右の独立している平行透明板におけるワールド座標の位置関係を推定し統合するために行なう。左右2組の平行透明板を同時に貫く3つ以上のレーザからなるレーザ光源1組を用いる。この段階で、異なっていた左右のカメラのワールド座標を統合することができる。具体的には、同一のワールド座標で左右のカメラの透視投影行列を求めることができる。

レーザを照射していない場合には、平行透明板を透過して通常通りのシーンの撮影が可能である（図5参照）。（再）キャリブレーションが必要になった場合に、レーザを照射して第1段階と第2段階のキャリブレーション画像を撮影する（図6,7参照）。

左右のカメラ、左右の平行透明板とレーザ光源、そして、器具を貫くレーザ光源の5つのユニット（図1中の点線枠）は、各レーザが透明板から外れない程度の位置ずれが許容できる。このため、機体などにカメラを直接取り付け、振動や位置ずれがあってもステレオキャリブレーションが行える利点がある。

左右のカメラの共通の視野内に1組の平行透明板を配置することで、第2段階のキャリブレーションを省略することが可能となるが、この場合では、大きな平行透明板を遠くに配置する必要があり扱いにくい。提案方法では、カメラの直前に平行透明板を配置することで、平行透明板、レーザ光源、カメラの各ユニットをコンパクトに配置できる。提案方法のこれらの特徴は、移動体のセ

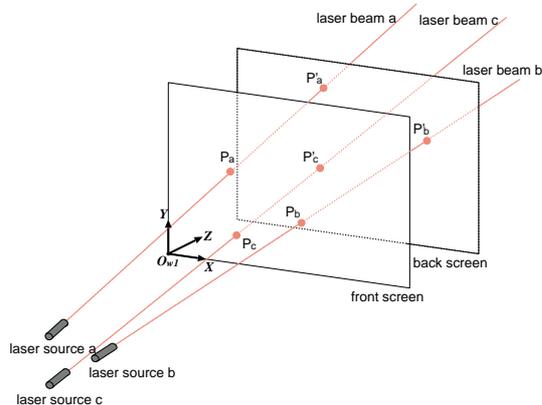


図 2: 1 台のカメラのキャリブレーションのためのレーザー照射

ンサとしての応用に向いている。

以降、3 節で第 1 段階、4 節で第 2 段階のキャリブレーションについて詳細に説明する。

3 1 台のカメラのキャリブレーション

ここでは、第 1 段階目の処理で行なう 1 台のカメラのキャリブレーションについて説明する。このとき用いるレーザー光源は、3 つ以上のレーザーを全てが同一面上にのらないように配置する。そして、レーザー像が透明板のどの位置に照射されるかを実測しておく。このときの例を図 2 に示す。前後の透明板上で観測できるレーザー像 (P_a, \dots, P_c) から、位置情報が既知である同一平面にのらない 6 点 (もしくは、それ以上の点) から、透視投影行列を求めることができる [1, 2, 3, 4, 5, 8]。また、求めた透視投影行列からは、内部パラメータと外部パラメータ¹ [1, 2, 3, 4, 5] を各々求めることもできる。ここで外部カメラパラメータは器具に固有の世界座標 ($O_{w1}-XYZ$) に対して求まる。

ステレオ視用の左右の 2 台カメラについて透視投影行列を各々求めるが、この段階では世界座標は異なっている。

4 2 台のカメラの相対的位置・姿勢パラメータのキャリブレーション

本節では、第 2 段階目の処理で行なう 2 台のカメラの相対的位置・姿勢パラメータのキャリブレーションについて説明する。左右のカメラの前の器具を貫くレーザーを照射して、各々に独立であった器具の世界座標を統

¹内部パラメータは、カメラ固有の 5 つのパラメータ (画像中心の位置 (u_0, v_0), カメラの縦横軸のなす角度 (θ) とカメラの縦横セルサイズの逆数と焦点距離の積 ($f k_u, f k_v$)) であり、外部パラメータは、カメラの位置と姿勢を示す 6 つのパラメータ (回転行列と平行移動ベクトル) である。

合することで実現できる。

2 台の器具を貫くレーザーは、3 つ以上必要で、方向が互いに異なり全てが同一平面上にないものとする。ただし、2 つのレーザーは、同一平面上になるように配置する²。図 3 に、3 つのレーザー A, B, C を 2 つの器具を貫くように配置した例を示す。このレーザーにより、右の器具 2 のワールド座標 ($O_{w2}-XYZ$) を左の器具 1 のワールド座標 ($O_{w1}-XYZ$) に統合することができる。

4.1 左右の器具の世界座標の統合

レーザーによる 2 つの器具の世界座標の統合を具体的に説明する。ここで、レーザーの世界座標 ($O_{w0}-XYZ$) を新たに設定する。レーザー A と B が同一平面上にあるとし、その交点を原点 O_{w0} とする。

まず、2 つの器具の世界座標の回転関係 (R) を求める。図 3 の器具 1 に注目する。レーザー A のビームは、点 P_A , P'_A で前後の透明板と交差する。レーザーの世界座標での位置は、画像から読み取れるレーザーの位置 (画像座標) から、前節で求まる透視投影行列を用いてワールド座標に変換できる (付録 A 参照)。このとき、 $O_{w1}-XYZ$ 座標でのレーザー A の単位方向ベクトルを \mathbf{d}_A とする。また、 $O_{w0}-XYZ$ 座標でのレーザー A の単位方向ベクトルを \mathbf{n}_A とする。この 2 つのベクトルには、 $\mathbf{n}_A = R \mathbf{d}_A$ の関係がある。 R は、 $O_{w1}-XYZ$ 座標を $O_{w0}-XYZ$ 座標に変換する回転行列である。レーザー B, C も同様であり、これらをまとめると式 (1) の関係が求まる。

$$[\mathbf{n}_A \ \mathbf{n}_B \ \mathbf{n}_C] = R [\mathbf{d}_A \ \mathbf{d}_B \ \mathbf{d}_C] \quad (1)$$

$\mathbf{d}_A, \mathbf{d}_B, \mathbf{d}_C$ は画像から得ることができ、 $\mathbf{n}_A, \mathbf{n}_B, \mathbf{n}_C$ は設計値から得ることができるので、線形解法により R を求めることができる [3]。なお、レーザーを増やすことで、より安定した回転行列の推定が行なえる。

右に位置する器具 2 についても同様であり、 $O_{w2}-XYZ$ 座標を $O_{w0}-XYZ$ 座標に変換する回転行列 R' を求めることができる。求めた回転行列 R, R' から、 $O_{w2}-XYZ$ 座標を $O_{w1}-XYZ$ 座標に変換する回転行列 $\mathcal{R} (= R^T R')$ が求まる。

続いて、2 つの器具の世界座標の平行移動関係 (T) について考える³。図 4 は、レーザー A, B がのる面 (例えば、 $O_{w0}-XZ$ 平面) に注目したものである。左側の器具 1 に注目すると、透明板が平行であることから式 (2) の関係がある。

²以降で述べる 2 つの器具の位置関係 (T) を求め易くするためである。

³これは、左右 2 つの器具と、それを貫くレーザーは、互いに独立して固定されており、振動などによる若干の位置ずれにより、 T が変化することを想定しているためである。

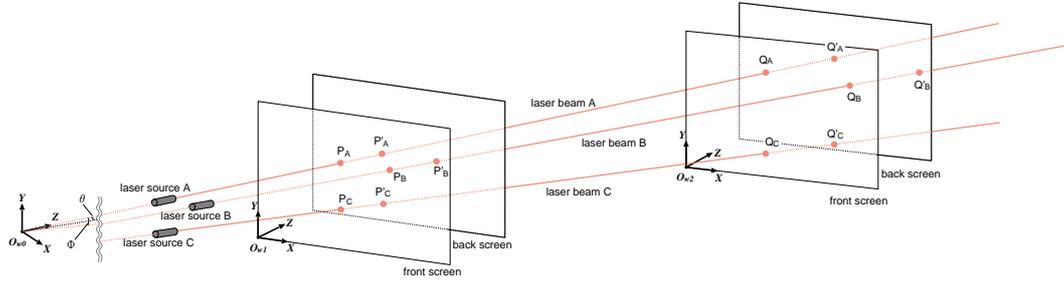


図 3：2つの器具の世界座標 ($O_{w1}-XYZ$, $O_{w2}-XYZ$) の統合のためのレーザー照射

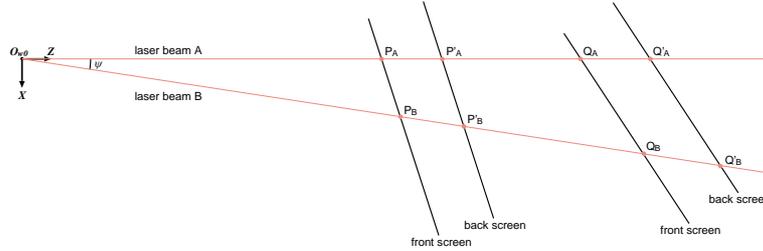


図 4： $O_{w0}-XYZ$ 面の位置関係

$$\frac{|O_{w0}P_A|}{|P_A P_B|} = \frac{|O_{w0}P'_A|}{|P'_A P'_B|} \quad (2)$$

ここで、 $|AB|$ は、点 A と点 B の距離を表す。

$|O_{w0}P'_A| = |O_{w0}P_A| + |P_A P'_A|$ なので、 $|O_{w0}P_A|$ は式 (3) となる。

$$|O_{w0}P_A| = \frac{|P_A P_B| |P_A P'_A|}{|P'_A P'_B| - |P_A P_B|} \quad (3)$$

また、同様に右側の器具 2 に注目すると $|O_{w0}Q_A|$ は式 (4) となる。

$$|O_{w0}Q_A| = \frac{|Q_A Q_B| |Q_A Q'_A|}{|Q'_A Q'_B| - |Q_A Q_B|} \quad (4)$$

式 (3) (4) より、 $|P_A Q_A|$ は式 (5) となる。

$$|P_A Q_A| = |O_{w0}Q_A| - |O_{w0}P_A| \quad (5)$$

以上より、レーザー像同士の距離を用いることで、あるレーザー（この場合はレーザー A）に沿った透明板間の距離を求めることができる⁴。同一面にのるレーザーが他があれば、より安定に $|P_A Q_A|$ を求めることができる。

さらに、 \mathcal{R} を用いることで、器具 1 の原点 O_{w1} から器具 2 の原点 O_{w2} は、平行移動ベクトル T (式 (6)) の位置にあることがわかる。

$$T = \begin{bmatrix} X_{P_A} \\ Y_{P_A} \\ Z_{P_A} \end{bmatrix} + |P_A Q_A| \mathbf{d}_A - \mathcal{R} \begin{bmatrix} X_{Q_A} \\ Y_{Q_A} \\ Z_{Q_A} \end{bmatrix} \quad (6)$$

⁴なお、式 (2) ~ (4) を用いて $|P_A Q_A|$ を求めるためには、 $|P_A P_B|$ などの透明板上のレーザー像の距離が必要となる。これは、透明板とカメラの位置関係が既知であることから (3 節)、透明板の空間位置が平面射影変換として求まり、(カメラ座標系として) レーザ像の空間位置が特定できる性質を利用して求めることが可能となる。

4.2 2つの器具の世界座標の統合

器具 1 と 2 の世界座標は、 \mathcal{R} , T を用いて統合することができる。 $O_{w2}-XYZ$ 座標の $\mathbf{X}_2 = (X_2, Y_2, Z_2)$ で与えられる点の $O_{w1}-XYZ$ 座標の点 $\mathbf{X}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ への変換は式 (7) となる。

$$\mathbf{X}_1 = \mathcal{R}\mathbf{X}_2 + T \quad (7)$$

器具 2 の固定レーザーの像の位置 ($Q_A, Q_B, Q_C, \dots, Q'_A, Q'_B, Q'_C, \dots$) にこの座標変換を施すことで、器具 1 の世界座標としてのキャリブレーションを行なうことができる。

5 提案器具を用いた実験

本節では、試作した器具を用いてステレオキャリブレーションを行なった結果を示す。2台のカメラによるステレオ視を行なうために、2組の平行透明板と3組のレーザー光源を作成した。まず、3節で述べた第1段階のキャリブレーションを行ない、次に、4節で述べた器具の世界座標を統合するための \mathcal{R} , T を求めた。最後に、ステレオ視によりシーン中の物体の復元を行なった。

5.1 左右のカメラの透視投影行列の推定

作成した平行透明板は、1つの透明板の大きさが 36×25 [cm] であり、透明板同士の間隔は 5.78 [cm] である。透明板は、薄い色のポリエステルフィルムを 3 [mm] 厚の亚克力板に貼りつけ形成した。(第1段階の) レーザは4つの一般的なレーザーポインタ (可視光赤色半導体レーザー) を用いており、金属フレームで透明板とレーザー光源をしっかりと固定している。また、(第2段階

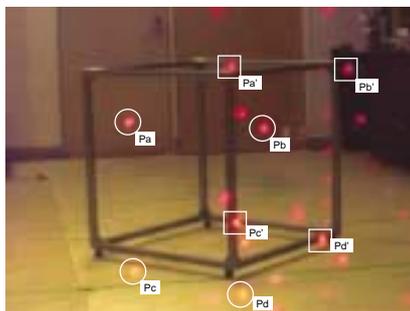


(a) 左画像

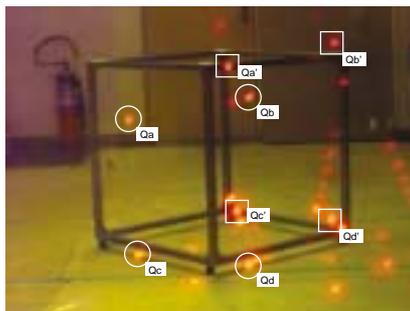


(b) 右画像

図 5：シーン画像

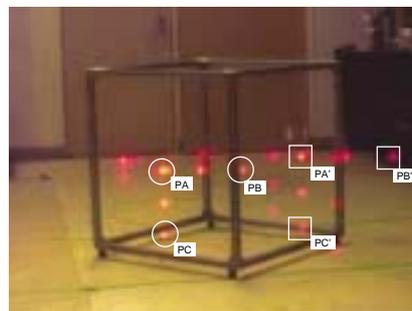


(a) 左画像

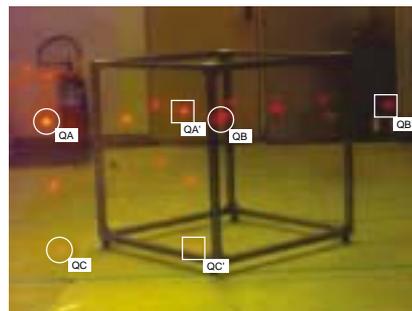


(b) 右画像

図 6：単一カメラのキャリブレーション用の画像



(a) 左画像



(b) 右画像

図 7：ステレオ関係のキャリブレーション用の画像

の) レーザを貫通させるために斜めにカメラ前に各々設置している。2組のカメラ (SONY DFW-SX900) とレンズ (FUJINON HF16HA-1B) により、実験室内に配置した 80 [cm] の立方体アルミフレームの計測を行なった。レーザを照射しない場合に取得した画像を図 5 に示す。透明板はほぼ透明であるので、通常と変わらない画像が取得できる。

透視投影行列の推定を行なう第 1 段階目の処理ために、レーザを照射して画像を撮影した。取得した画像を図 6 に示す。4 つのレーザと 2 枚の透明板との交点は合計 8 点であるが、反射等の影響で数多くのレーザ像が写り込んでいる。本実験はカメラパラメータ推定が目的であり、また、自動での位置特定は多くの手間が必要となるので、今回は手動によりレーザ像の位置指定を行なった。また、レーザ像の空間位置は、透明板上のレーザ像をノギスを用いて実測した。

実測した空間位置と、手動で指定した画像上の位置の対応関係から、左のカメラ 1 と右のカメラ 2 について以下のような透視投影行列 P_1 , P_2 が求まった。

$$P_1 = \begin{bmatrix} 2578.383 & 198.463 & 2161.250 & -133.618 \\ -67.685 & 3444.674 & 145.708 & -104.185 \\ -0.440 & 0.264 & 0.858 & 0.541 \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 2698.367 & 244.891 & 2394.202 & -135.541 \\ -117.711 & 3618.379 & -81.582 & -55.158 \\ -0.531 & 0.175 & 0.829 & 0.695 \end{bmatrix}$$

5.2 左右の器具間の \mathcal{R} , \mathcal{T} の推定

続いて、互いに独立な器具 1 と 2 のワールド座標を統合するため回転行列 \mathcal{R} と平行移動ベクトル \mathcal{T} を求める。

(第 2 段階の) 2 つの器具を貫くレーザは等間隔のドットパターンが投影できるレーザパターンプロジェクタ (MORITEX SNF-507X) を遮蔽板により“ Γ ” 字状に 3 つのレーザ像とした。縦横のピッチ間隔の測定値は共に 1.887 [degrees] であり、 \mathbf{n}_A , \mathbf{n}_B , \mathbf{n}_C の値を設定した。レーザを照射して得られる画像を図 7 に示す。この場合も、反射等の影響で多くのレーザ像がある。ここでも手動によりレーザ像の位置を指定した。そのレーザ像の位置から、前節で求めた透視投影行列 P_1 , P_2 を用いてレーザ像の空間位置を付録の手順で求めた。

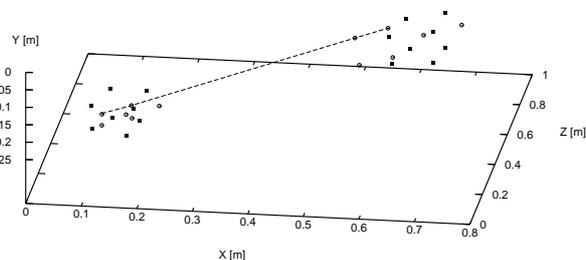


図 8： O_{w1} -XYZ 座標に統合されたレーザ像の分布

手動で指定した画像上の位置を付録 A の方法で変換し、器具 1, 2 のワールド座標におけるレーザの単位方向ベクトル (\mathbf{d}_A , \mathbf{d}_B , \mathbf{d}_C) を求め、そして、レーザパタ

ーン的设计諸元からわかるレーザのなす角度情報を単位方向ベクトル ($\mathbf{n}_A, \mathbf{n}_B, \mathbf{n}_C$) として利用して線形解法により、回転行列 R, R' を求めた。

$$R = \begin{bmatrix} 0.770 & -0.096 & -0.631 \\ 0.107 & 0.994 & -0.020 \\ 0.630 & -0.052 & 0.775 \end{bmatrix}$$

$$R' = \begin{bmatrix} 0.691 & -0.075 & -0.719 \\ 0.060 & 0.997 & -0.046 \\ 0.720 & -0.011 & 0.694 \end{bmatrix}$$

そして、2つの器具の世界座標の回転関係 (\mathcal{R}) を求めた。

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} 0.992 & 0.042 & -0.121 \\ -0.044 & 0.999 & -0.013 \\ 0.121 & 0.018 & 0.993 \end{bmatrix}$$

続いて、透明板上でレーザ像の距離を用いて2つの器具の世界座標の平行移動関係 (T) を求めた。

$$T = [0.465 \quad -0.008 \quad 0.486]^T$$

最後に、求めた \mathcal{R}, T を用いて (式 (7)), O_{w2} -XYZ 座標で表されていた器具2の固定レーザ像の空間位置を、器具1の世界座標である O_{w1} -XYZ 座標に変換した。図8に O_{w1} -XYZ 座標に統合されたレーザ像の分布状況を示す。第1段階のレーザ像を■印で、第2段階のレーザ像を○印で示している。そして、 O_{w2} -XYZ 座標で表されたカメラ2の透視投影行列 P_2 を求めた。

$$P_2 = \begin{bmatrix} 2402.118 & 79.967 & 2714.456 & -2567.811 \\ 43.766 & 3621.430 & -29.211 & -29.824 \\ -0.627 & 0.165 & 0.761 & 0.623 \end{bmatrix}$$

以上により、画像1と2で対応関係が求めれば、透視投影行列 P_1 と P_2 を用いることで不定性のない形状復元が行なえる。

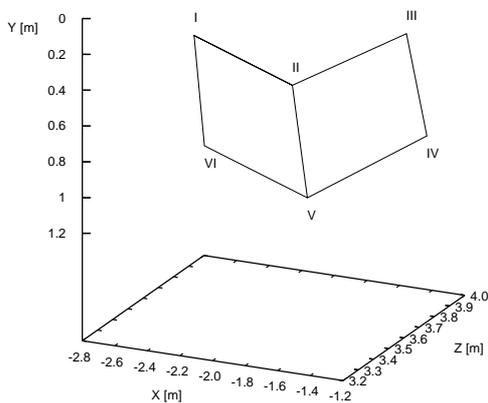


図9：復元したアルミフレームの3次元プロット

表1：各辺の長さ

side	distance [m]
I-II	0.929
II-III	0.545
I-VI	0.940
II-V	0.825
III-IV	0.771
VI-V	1.080
V-IV	0.570
average	0.809

表2：各コーナーの角度

corner	angle [degrees]
VI-I-II	112.195
I-II-V	75.445
II-V-VI	108.313
V-VI-I	63.957
V-II-III	83.074
II-III-IV	99.091
III-IV-V	86.776
IV-V-II	91.057
I-II-III	98.563
VI-V-IV	98.036
average	91.651

5.3 求めた透視投影行列 P_1 と P_2 による形状復元

求めた透視投影行列 P_1 と P_2 を用いて、シーン中に写り込んでいるアルミフレームの頂点の位置の計測を行なった。対応付けは手動で行なった。復元した頂点の空間位置を3次元プロットしたものを図9に示す。歪んだ形状に復元されていることがわかる。また、各辺の長さを表1に、各コーナーの角度を表2に示す。本来は、各辺の長さは0.8[m]、各コーナーの角度は90[degrees]になるはずであるが誤差が大きい。今後、測定精度について詳細に検討を行なう。

6 おわりに

本論文では、レーザを用いたキャリブレーション器具によるステレオ視を提案した。提案した器具は、2枚の平行な透明板からなり、それにレーザを照射して用いる。また、透明板を貫くように配置したレーザを加えることで、各々に独立であった器具の世界座標を統合することができる。

実際の器具を試作してステオキャリブレーションを行ない物体の形状復元を行なった。十分な精度を得ることはできなかったが、ある程度の形状復元が可能であることが確認できた。今後は、計測精度を向上させるための検討を行なう。また、得られた画像では、レーザの反射等による像の影響が強いことがわかった。透明板に適した素材の選定を行ないたい。そして、現時点では手動で行なっているレーザ像の位置抽出の自動化についても検討を行なう。

提案した手法は、器具の再設置等の手間が不要であるので、再キャリブレーションが容易に行なえる利点がある。広いカメラ間隔やカメラの位置ずれ補正、カメラの回転やズーム、フォーカスを変化させることが可能となる。移動体のセンサとして応用する場合は、振動の影響などで、カメラや器具の位置関係が多少変化しても、再

キャリブレーションを行なうことで補正できる。今後は、自動車や航空機、宇宙機等の視覚センサとしての利用を目指す。

A. 2つの器具を貫くレーザ像のワールド座標位置の求め方

空間中で XY 平面な任意の平面 Π の上の点 $\tilde{\mathbf{X}} = (X, Y, Z, 1)^T$ (ただし, Z は任意の定数) は, 透視投影行列 P により画像上の点 $\tilde{\mathbf{x}} = (u, v, 1)^T$ に投影され次式の関係となる。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \simeq \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & Zp_{13} + p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & Zp_{23} + p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & Zp_{33} + p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$= H_{\Pi} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

画像上の位置 $\tilde{\mathbf{x}}$ が与えられた場合, $[X \ Y \ 1]^T = H_{\Pi}^{-1} \tilde{\mathbf{x}}$ より平面 Π 上の空間中の点の位置が求まる。

参考文献

- [1] 佐藤淳, コンピュータビジョン-視覚の幾何学-, コロナ社, 東京, 1999.
- [2] 出口光一郎, ロボットビジョンの基礎, コロナ社, 東京, 2000.
- [3] 徐剛, 写真から作る3次元CG-イメージ・ベースト・モデリング & レンダリング-, 近代科学社, 東京, 2001.
- [4] O. Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint, MIT Press Cambridge, MA, 1993.
- [5] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2000.
- [6] 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.
- [7] 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, 東京, 1998.
- [8] 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.

- [9] 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-RA, Vol.3, pp. 323-344, 1987.
- [10] Z. Zhang, A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans. on PAMI, 22(11)pp.1330-1334, (2000).

第II部

カラーフィルタを用いた透過型校正器具によるワイドベースラインステレオのキャリブレーション

Abstract

In this paper, we propose a transparent calibration tool consisting of two parallel transparent boards with patterns of dots of a color filter material. The tool can calibrate in a straightforward manner without being re-set or removed. The tool is installed in front of a color camera that acquires images through the tool. Images for calibration and the scene image are acquired simultaneously in different color bands. The proposed method is applied to stereo camera calibration for a distant small object.

概要

本論文では、撤去の必要がない簡便な透過型の校正器具を提案する。この器具は、カラーフィルタで形成される校正パターンを持つ2枚の平行な透明板から構成される。2台のカラーカメラの前に配置して、提案器具を見通して物体を撮影する。カラーバンドを使い分けることで、キャリブレーションのための画像とステレオマッチングやシーンに用いる画像を同時に取得する。ここでは、提案器具を用いて遠くに配置した小さな物体をステレオ視により計測した結果を示す。

Keywords: Wide Baseline Stereo, Stereo Calibration, Transparent Calibration Tool Using Color Filters

1 はじめに

カメラパラメータの推定を行なうカメラキャリブレーションは、コンピュータビジョンにとって最も基礎的な技術である。位置情報が既知の点や線等の校正パターンの描かれた校正器具を用いるキャリブレーションが一般的であるが、器具の設置や撤去の必要があり運用の簡便さを欠く。

キャリブレーションでは、一般にパターンの描かれた専用の器具を用いる [1, 2, 3, 4]。パラメータ算出に必要な個数や配置条件を満たすよう校正パターンは制約を受ける。この従来法には、専用器具を物体近くに配置しキャリブレーション用の画像を撮影し、その後、器具を取り除いてからシーン画像を撮り直すという手間が必要になるものの、校正パターンを特徴抽出しやすいうように形状や光学的特性を工夫できたり、確実にカメラパラメータを得ることができるので、多くの研究で利用されている。

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、キャリブレーション用画像を撮影した後で校正器具を取り除く必要がある。カメラの向き等の変更後には、再キャリブレーションのために器具の再設置、再撤去が必要となる。Kitahara ら [5] は、遠方の大規模な空間を扱うためにレーザーを用いた複数の小さな校正器具を用いている。再キャリブレーションを避けるため、変化量が分かり正確に移動するステージを用い、キャリブレーション後のカメラの位置姿勢の変化を把握する方法等が用いられている。Frahm ら [6] は、ステージの変化量から分かるカメラの回転量を用いキャリブレーションを行なった。

新たに提案する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キャリブレーションでは、器具の再設置や撤去が不要であり、簡便に運用できる利点がある。提案する器具は、カラーフィルタを用いて形成された校正パターンを2枚の透明板に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である。一回の撮影で、校正パターンとシーンを同時に獲得でき、キャ

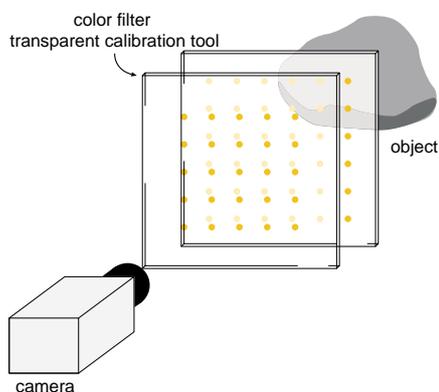


図 1：提案器具によるキャリブレーションの位置関係

リブレーションによるカメラパラメータも安定に得られる。大規模な器具や、精密なカメラシステムを必要とせず、簡便にキャリブレーション（再キャリブレーション）が可能となることから、従来法に比べて有利である。また、提案方法は、遠方の小さな物体計測に適したステレオカメラ校正やカメラパラメータの変化の再キャリブレーションなどが容易に行なえ、航空宇宙分野等の多くの分野での利用が期待できる。

2 カラーフィルタリングを利用した透過型校正器具

新たに提案する透過型校正器具は、カラーフィルタによる校正パターンを2枚の透明板（アクリルやガラス）に空間的に配置しており、それを透過してシーンの撮影が可能となる器具である。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。

図1に、提案手法のカメラ等の位置関係の概観を示す。カメラの位置や向きが変わった場合は、外部パラメータが変化することになるが、提案器具を用いて再キャリブレーションを行うことができる。同様に、ズームやフォーカスを変えた場合にも、提案器具を用いて内部パラメータを再キャリブレーションできる。なお、提案器具の校正パターンの画像上の位置は、画像処理を用いて特徴抽出により特定できる。また、校正パターンの空間中の位置は設計値から既知であり、パラメータ推定が行える。

提案方法のコンセプトは、キャリブレーション用の画像と、ステレオマッチング等に使うシーン画像を、カラーバンドを使い分けて同時にカラー画像として取得することにある。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バンドの画像を校正用の画像として用いることができる。さらに、画像の撮影において、器具の撤去が不用となる利点もある。

図2に、カラーカメラの前に提案器具を配置して、パターンの付いた箱（従来のキャリブレーション器具）を撮影した赤と青の単バンドのチャンネルの画像を示す。赤バンドの画像（図2(a)）では、カラーフィルタの校正パターンの遮蔽がほとんどみられない。この画像は、提案器具がない場合と等しい品質で、ステレオマッチングやさらに発展した画像理解に十分な品質のシーン画像として用いることができる。一方で、青バンドの画像（図2(b)）には、校正パターンが明確に表われていることがわかる。この校正パターンの位置情報から、キャリブレーションが行える。

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、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、（フルカラー情報によらない）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な画像解析が行なえる。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。

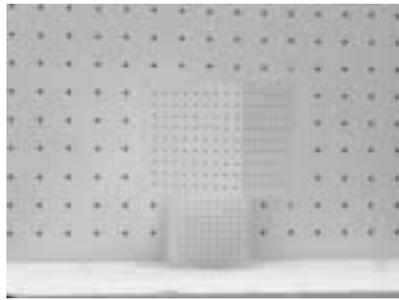
提案器具は、カメラの近くに設置して用いるので、遠方に配置しないですみ扱いやすい。しかしながら、近くに配置されている提案器具上の校正パターンにはフォーカスがあわずピンぼけの像となる。この問題の対策は、ぼけたパターンからのロバストな特徴抽出方法として3節で述べる。

3 ロバストな校正パターンの特徴抽出

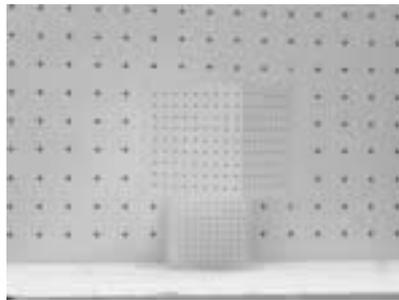
校正パターンは青バンドの光が遮蔽されることで、濃淡値の低い部分として画像に写る。校正パターンは、フォーカスぼけの影響を受け、さらに、シーン中の物体の色（青や黒の場合）が混合してしまい分離が困難な部分もある。このため、校正パターンの抽出は容易ではない。

ここでは、フォーカスぼけがあっても校正パターンの中心はずれないと考えて、画像から校正パターン毎に重心を求め中心とする。なお、空間内の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、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。

シーン中の物体の色の混合による分離は困難である。この現象が発生した場合には、パターンの重心がずれる



(a) 赤バンド画像 (シーン用)



(b) 青バンド画像 (キャリブレーション用)

図 2 : 提案器具を通して撮影した赤, 青バンドの画像

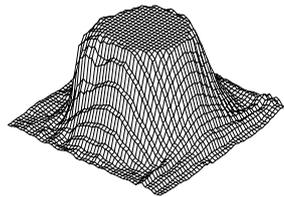
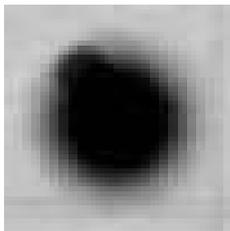
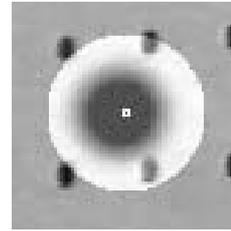


図 3 : シーンの黒い物体と校正パターンの分離が困難な例

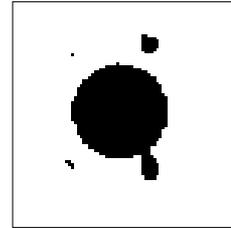
ということにつながる。図 3 に実際の例を示す。左は濃淡を 3 次元プロットした図である。背景の小さな黒点と、校正パターンが重なっており、重心位置がずれることがわかる。

この問題に対しては、校正パターンの中心が平面上にあり、その位置は、設計値から正確に分かっているという性質を利用して、撮影対象の写り込みによるずれの影響を受けにくい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、校正パターンの重心を求める。

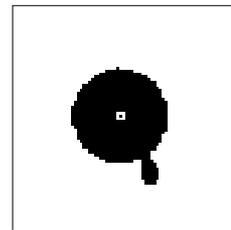
初めに、設定したウィンドウ内の重心を各々の校正パターンの中心として求める (具体的な重心の求め方は後述する)。求まった重心と校正パターンの中心の位置の設計値から射影変換行列を計算する。そして、次に射影変換行列の逆行列を用いて、今度は校正パターンの中心の設計値を変換し先に求まった重心との距離を各々求める。この距離が大きいものは、正確に求まっていない例



(a) 初期設定位置 (525, 380)



(b) 2 値化画像



(c) 最終的な重心位置 (523.243, 379.976)

図 4 : 校正パターンの重心の抽出

外とする。この実験では、全ての重心の半分を例外として判定し除外する。

次に例外を除いた重心から、再び射影変換行列を計算する。この処理により、シーンの物体の色の影響で分離不可能な校正パターンを例外として排除できロバストな重心抽出が可能となる。そして、この射影変換行列の逆行列を用いて、校正パターンの中心の設計値を変換し校正パターンの中心とする。透過型校正器具は、前後 2 面の平面を用いるので、各面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

ここでは、実際の例を示しながら校正パターンの重心の求め方を説明する (図 4 参照)。初めに、重心の位置のおよその位置を初期値として設定する。(本論文では、手動で指定した点の位置を設定した。) 図 4(a) に示す様に、注目ウィンドウは円形としている。

次に、ウィンドウ内で 2 値化を行なう。この際の 2 値化しきい値はウィンドウ内の濃淡値の平均を用いる。図 4 (b) に示す処理結果には、校正パターン以外に濃淡の低い部分がある場合がある。ウィンドウ内は、この様な点は、ラベリングを行ない、初期指定点が含まれないラベル領域を排除する。この例では、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。

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用い、原画像の濃淡値を用い重心（1次モーメント）計算する。図4(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。なお、上記で述べた例外を取り除くロバストな方法により、この例は例外と判定されることになる。

4 透過型校正器具のステレオ視への応用

提案する透過型校正器具は、1台のカメラのキャリブレーションに用いることができるが、拡張してのステレオキャリブレーションに応用することも可能である。ステレオ視では、カメラ間隔を広くし、画角を狭くして物体を拡大撮影することで、奥行き分解能が向上し、遠方の小さな物体の計測がより精度よく行なえる。しかし、その反面、2台のカメラの共通の視野が物体の近辺に限られてしまうことになる。よって、従来の校正器具によるステレオカメラ校正を考えた場合、校正器具を物体近辺に設置する必要があるのが不便である。

本手法の場合、図5に示すような、カメラ間隔とほぼ等しい大きさの提案器具をカメラの近くで用いることで、この状況に対応可能である。ズームやフォーカスを変えた場合の内部パラメータの変化にも、再キャリブレーションに対応できる点が、一般的な弱キャリブレーションとは異なる点である。提案器具は、単眼の場合と同様に配置して用いることが可能で、器具を遠方の左右のカメラの共通視野に配置しなくてもよいので取り扱い易い。共通領域にない校正パターンを用いてステレオカメラ校正を行なうには、次に述べる様に、校正パターンが共通の平面にのる性質を利用すればよい。

F 行列は、算出する過程で、行列を特異値分解することで、 F 行列の条件 ($rank F = 2, |F| = 0$) を満たすように求めることが可能である [1, 3, 2]。これにより、全てのエピポーラ線がエピ極1点で交わるようになり、正しいエピポーラ拘束の推定が行なえ、対応点探索がより安定に行なえる利点がある。

一般のキャリブレーションとは異なり、ここで提案するステレオキャリブレーションは共通視野外にある点を用いる。提案方法で、左右のカメラに写り込む校正パターンは、共通視野外にあるので同一のものはない。このために通常の方法では、キャリブレーションができない。

しかし、提案方法は、校正パターンは同一平面（透明板）上に乗っているということを利用する。これは、校正パターンが平面に配置されていることを利用して、画像としては投影されていない“仮想的な対応点”を求めるものである。

校正パターンは平面上に配置されており、その位置は設計値よりわかる。よって、画像上で4点以上の校正パターンが観測できれば、校正パターンののる平面と画像面の平面射影変換行列を求めることができる。いま、図6に示すように、(器具の2枚の内の一方の)平面 Π はカメラ1の画像面 π_1 と射影変換 H_1 の関係にある。同様に、平面 Π はカメラ2の画像面 π_2 と射影変換 H_2 の関係にある。平面 Π 上の点 X は、画像面 π_1 上に $x_1(H_1\tilde{X})$ として投影される。一方、点 X は H_2 によって、 $x_2(H_2\tilde{X})$ と求まる。 x_1 と x_2 は、1組のステレオ対応の関係にある。 x_2 は、カメラ2では有効撮像領域の外に投影されるが、画像面 π_2 上に存在する。この様に、視野を共有していなくても、平面 Π と各カメラの関係がわかれば、画像の有効撮像領域を外れることになるが、対応関係を知ることができる。

以上より、左右の画像で射影変換を利用することで、対応点が求まることになる。 F 行列を計算するために必要な8点以上の点は、同一平面上にあってはならないが、透過型校正器具は2つの平面からなるので、各々の平面について対応点を求めることでこの条件が満たせる。

5 提案器具を用いた実験

本節では、実際に作成した透過型校正器具を用いた校正を行なう。また、比較のために、従来の校正器具を用いた校正も同時に行なう。レンズ歪みは、予め歪みパラメータの推定を行ない、除去した画像を用いている。なお、R-Bバンド画像の像の大きさ比較したところ、Rバンド画像がBバンド画像より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バンド画像の大きさを補正し用いた。

5.1 F 行列の推定結果

4節で述べた、ステレオ用の透過型校正器具による実験を行なった。作成した提案器具は2枚の亚克力板からなる。亚克力板の大きさは(1100 × 330 × 2 [mm])で、80 [mm] 間隔で固定している。校正パターンは、直径6 [mm] の円で、50 [mm] 間隔で前面に22 × 6、後面に21 × 6の格子状に配置している。器具は、カメラから約0.75 [m] の位置に固定している。この実験では、1台のカラーカメラ SONY DFW-SX900 と、バリフォーカ

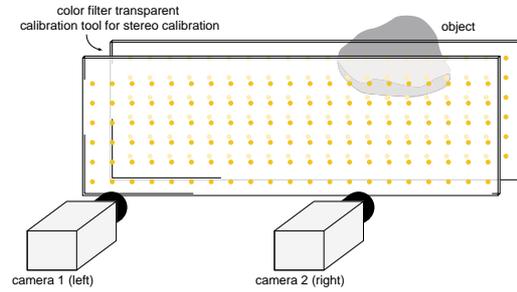


図 5：提案器具をステレオ視に応用する場合の器具とカメラの位置関係

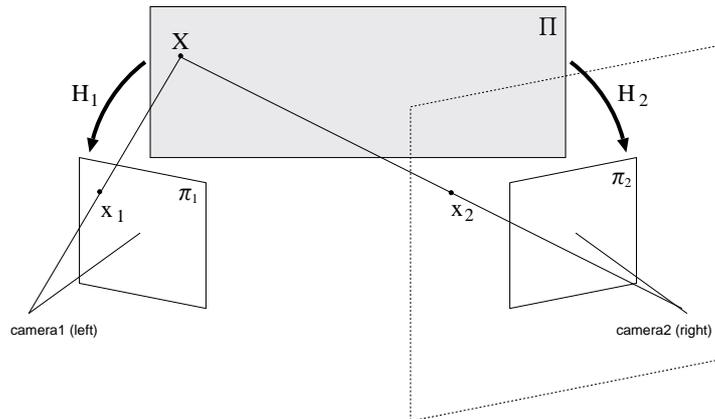


図 6：空間中の 2 台のカメラの撮像平面の位置関係

ルレンズ computar M3Z1228C-MP を用いている。カメラを約 80 cm 移動させて撮影対象が中心になるよう輻輳させカラー画像を各々撮影した。撮影対象は、カメラから 1.8 [m] の位置にある、従来の校正器具で 1 辺の 15 [cm] の立方体である。得られたカメラ 1 の画像は、図 2 に示している。

図 7 は、左右の画像に写り込んでいる校正パターンの分布を示したものである。各画像に投影された校正パターンを丸で囲んで示している。この図からわかるように、ステレオ画像に写り込んでいる校正パターンは共有視野内にはない。

4 節で説明した F 行列の算出に必要な仮想的な対応点の位置の推定結果を図 8 に示す。図 8 (a) は、左画像面の対応点の分布状況である。図 8 (a) の左側の画像上にプロットしてある赤い×印は、ロバスト推定で得られる校正パターン位置である。一方、右側にプロットしてある青い●印は、ロバスト推定で求まる射影変換行列を用いて、校正パターンの設計値を投影して得られる点である。また、図 8 (b) は、左右の逆の操作を行なった結果である。

図 8 (a) と (b) の校正パターンは、ステレオ対応関係にあり、 F 行列が計算できる [2]。求まった F 行列は

以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} 6.165 \times 10^{-9} & 1.165 \times 10^{-7} & -1.535 \times 10^{-4} \\ 8.233 \times 10^{-7} & -2.567 \times 10^{-8} & -1.305 \times 10^{-2} \\ -4.117 \times 10^{-4} & 1.157 \times 10^{-2} & 1.000 \end{bmatrix}$$

この F 行列を用いて、与えた対応点と推定したエピポーラ線との距離を計算して評価した。理想的なエピポーラ拘束が求まった場合は、対応点がエピポーラ線上にのり距離は 0 になる。また、この距離が数画素になると、エピポーラ線上で行なう対応点探索に支障をきたすことになる。求まった、各対応点のエピポーラ線との距離の平均は、0.526 [pixels] であった。対応点探索が、十分行なえる精度のエピポーラ拘束が求まっている。

また、画像に写り込んでいる従来の校正器具を用いて計算した F 行列は以下ようになった。この際、R バンド画像を用い、前節同様に、R-B バンド画間の大きさの補正を行なっている。

$$\begin{bmatrix} 4.412 \times 10^{-9} & 9.869 \times 10^{-7} & -6.126 \times 10^{-4} \\ 7.395 \times 10^{-7} & -7.603 \times 10^{-8} & -2.174 \times 10^{-2} \\ -3.778 \times 10^{-4} & 2.070 \times 10^{-2} & 1.000 \end{bmatrix}$$

なお、各対応点のエピポーラ線との距離の平均は、

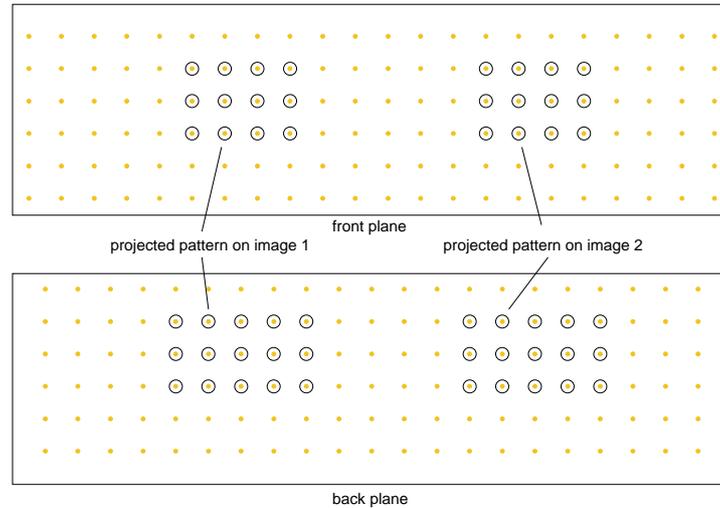
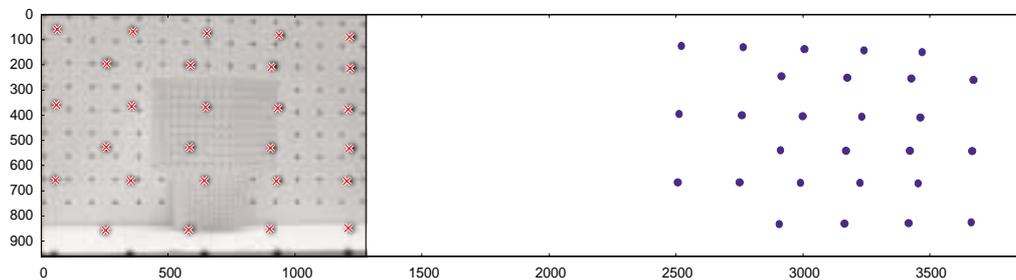
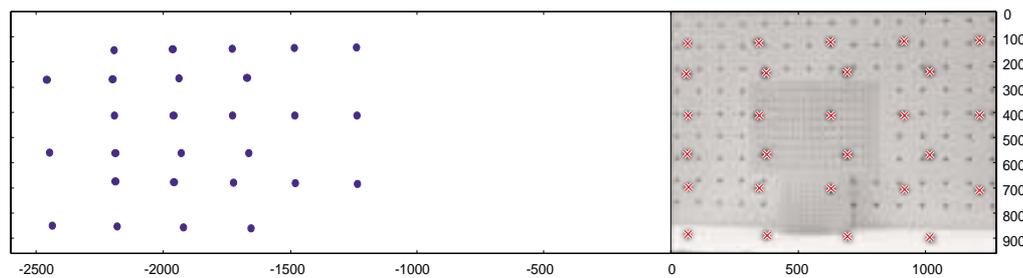


図 7：画像に写り込んでいる校正パターンの位置関係



(a) The sensor plane of camera 1 (left)



(b) The sensor plane of camera 2 (right)

図 8：射影変換行列により逆投影された対応点の関係

0.086 [pixels] であった。この比較では、従来法の推定結果の方がエピポーラ線との距離が短くよい推定であることが分った。しかしながら、提案方法の結果も距離が 1 [pixels] 以下であり、十分にステレオ視が行なえ精度が推定出来ている。

5.2 カメラパラメータの推定と物体の 3 次元復元

ここでは、カメラ 1 と 2 のパラメータのキャリブレーションと、物体の 3 次元復元について提案方法と従来法の結果を比較する [1, 2]。カメラ 1 と 2 の内部パラメータ（焦点距離 (f) 画像中心 (u_0, v_0)) を、提案器具の校

正パターンから求めた結果を表 1 (左) に示す。また、2 台のカメラ間の相対的回転行列 (R) と並進ベクトル (t) は以下の通りである。

$$R = \begin{bmatrix} 0.944 & -0.005 & -0.330 \\ 0.006 & 1.000 & 0.002 \\ 0.330 & -0.004 & 0.944 \end{bmatrix} \quad t = \begin{bmatrix} 0.726 \\ 0.014 \\ 0.141 \end{bmatrix}$$

また、比較のためにシーン中に写り込んでいる従来の校正器具を用いて推定した内部パラメータを表 1 (右) に示す。また、同様に 2 台のカメラ間の相対的回転行列

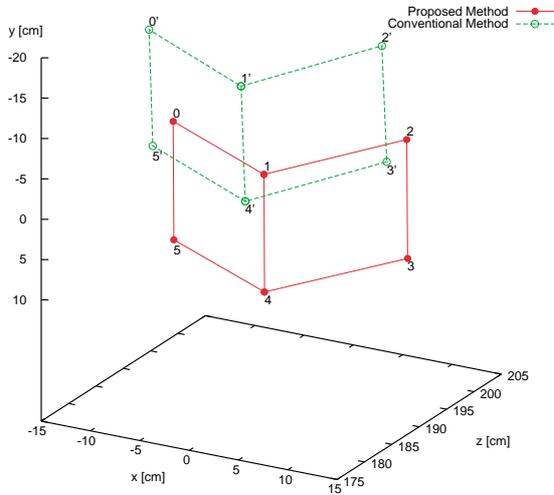


図9：カメラ1座標系での再現された物体の形状

表1：推定された内部パラメータ

	Proposed Method		Conventional Method	
	camera 1	camera 2	camera 1	camera 2
f/k [-]*	4560.923	4479.151	4639.753	4506.972
f [mm]	21.208	20.828	21.575	20.957
u_0 [pixels]	599.605	762.335	716.619	692.897
v_0 [pixels]	483.125	592.398	711.096	811.887

* k is the number of pixels per unit size. k [1/mm] = $1/4.65 \times 10^{-3}$

(R) と並進ベクトル (t) は以下の通りである。

$$R' = \begin{bmatrix} 0.933 & 0.019 & -0.358 \\ -0.012 & 1.000 & 0.023 \\ 0.359 & -0.018 & 0.933 \end{bmatrix} \quad t' = \begin{bmatrix} 0.708 \\ -0.010 \\ 0.190 \end{bmatrix}$$

これらの結果の比較から、提案方法と従来方法のパラメータの推定結果はほぼ等しいことがわかる。

続いて、ステレオ計測によりシーンに写り込んでいる従来の校正器具の大きさを3次元再現する。手前に見える箱の6頂点の対応付けを手動で行ない、その空間位置の再現を先程求めた内部・外部パラメータから行なう。図9にカメラ1のカメラ座標系で推定できる6頂点の空間位置をプロットする。表2に各辺の長ささと各頂点の角度を示す。再現された箱の大きさや角度の差は小さく、提案方法と従来法でほぼ同じ結果が得られることがわかる。ただし、従来法に比べ、箱の位置が2.869 [degrees] ずれた位置に再現されており、若干の差がみられる。この点については、引き続き検討を行う。

表2：再現された物体の辺の長ささとコーナーの角度

(a) 物体の辺の長さ [cm]

	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-0
Proposed	14.61	14.91	14.94	14.81	14.49	14.93
Conventional	14.96	14.93	14.93	14.91	14.86	14.95

The ideal length of a side is 15 cm.

(b) 物体のコーナーの角度 [degrees]

	5-0-1	0-1-4	1-4-5	4-5-0	4-1-2
Proposed	89.58	89.94	90.16	90.32	89.99
Conventional	89.81	89.80	90.39	90.00	89.92

	1-2-3	2-3-4	3-4-1	0-1-2	5-4-3
Proposed	89.60	90.26	90.14	91.54	92.59
Conventional	89.99	89.91	90.17	89.74	90.87

The ideal angle of a corner is 90 degrees.

6 おわりに

本論文では、カラーフィルタリングを利用した透過型校正器具を新たに提案した。この器具は、カラーフィルタからなる校正パターンをを2枚の透明板に張り付けたもので、カラーカメラで撮影した画像のカラーバンドの使い分けを行なう。フィルタに遮蔽されるバンド画像は、校正パターンの部分が黒くなりキャリブレーション用画像として利用でき、カメラパラメータの推定が行なえる。また、フィルタに遮蔽されないバンド画像は、校正パターンの影響がなくシーン画像として利用できる。この器具により、従来の校正器具が抱えていた問題である再配置・撤去の手間が解消でき、再校正などが容易に行なうことができるようになる。

撮影対象の写り込みにより校正パターンの抽出が困難になる問題に対し、校正パターンが平面上に配置されている性質を利用して、射影変換を利用したロバストな抽出法を提案した。また、ステレオ視への応用として、カメラ間隔と同程度の大きさの器具を用いる方法を提案した。そして、校正パターンが平面に乗っている性質を利用して、左右のカメラの共通視野内に器具を配置しなくてもエピソード拘束が求まることを示した。カメラ間隔を広く、物体をズームして撮影できる利点があるので、遠方の小さな物体のステレオ計測が行ない易くなる。そして、実際の画像を用いて提案手法と従来法によるキャリブレーションを行ない、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、提案手法は、再校正が容易に行なえる利点があるので、その特徴を活かし、人や車等の動く物体を追跡するような応用について検討を行なう。そして、航空宇宙分野等の多様な環境下で利用できる画像計測システムの構築を目指す。

参考文献

[1] O. Faugeras: Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint, MIT Press Cambridge, MA,

- (1993).
- [2] R. Hartley and A. Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, (2000).
 - [3] 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-RA, Vol.3, pp.323-344, (1987).
 - [4] Z. Zhang: A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans. on PAMI, 22(11): 1330-1334, (2000).
 - [5] I. Kitahara, H. Saito, S. Akimichi, T. Ono, Y. Ohta and T. Kanade: Large-scale Virtualized Reality, IEEE Computer Society, Proc. CVPR, (2001).
 - [6] J. M. Frahm and R. Koch: Camera calibration with known rotation, IEEE Computer Society, Proc. 9th ICCV Vol.2, pp.1418-1425, (2003).

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-06-045

発行 平成 19 年 3 月 30 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL:<http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 プリントオフィスゼロ

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記をお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。

