

# 論文

## 魚眼カメラ内部パラメータの幾何学的キャリブレーション法

駒形 英樹<sup>†\*</sup>      石井 郁夫<sup>†</sup>      高橋 章<sup>††</sup>      若月 大輔<sup>†††</sup>  
今井 博英<sup>†</sup>

### A Geometric Calibration Method of Internal Camera Parameter for Fish-Eye Lenses

Hideki KOMAGATA<sup>†\*</sup>, Ikuo ISHII<sup>†</sup>, Akira TAKAHASHI<sup>††</sup>, Daisuke WAKATSUKI<sup>†††</sup>, and Hiroei IMAI<sup>†</sup>

あらまし 魚眼カメラ（魚眼レンズを取り付けたカメラ）は視野角が $180^\circ$ 程度あり、被写界深度が深い。そのため、一定姿勢で広範囲の情景を撮影することができ、屋内・屋外環境の三次元モデル化や監視カメラなどに効果的である。カメラを用いて実世界の計測精度を向上させるには、カメラ内部パラメータの幾何学的及び光学的キャリブレーションが必要となる。本論文ではこれらの中で、幾何学的キャリブレーションについて述べる。従来の魚眼カメラ内部パラメータの幾何学的キャリブレーション法として、透視投影モデルに当てはめる手法があるが、 $180^\circ$ 以上の広視野角をもつ魚眼カメラには適用できない。そこで、本論文では魚眼カメラの射影関数と幾何学的ひずみモデルを組み合わせた投影モデルと球面投影によるキャリブレーション法を提案する。提案法ではキャリブレーションパターンとして、液晶ディスプレイに表示した水平・垂直線を用いるため、パターンの幾何学的な情報を精度良く得ることができ、簡便で高精度なキャリブレーションを行うことができる。画像周辺部が高解像度である立体射影方式魚眼カメラを用いて行った評価実験により、提案法の有効性を示す。

キーワード 魚眼レンズ、キャリブレーション、球面投影、内部パラメータ、投影モデル

## 1. ま え が き

魚眼カメラ（魚眼レンズを取り付けたカメラ）は $180^\circ$ 程度の視野角をもち、広範囲の計測に有効である。また、被写界深度が深く、画像全体を鮮明に撮影することができる。そのため、ロボットナビゲーションシステムのための三次元再構築 [1], [2] や建造物の三次元再構築 [3], [4] などに魚眼カメラを活用する研究が行われている。画像ベースで三次元再構築の精度を向上させるためには、カメラ内部パラメータの幾何学的ひずみ及び光学的ひずみのキャリブレーションが必要となる。幾何学的ひずみは撮影画像に現れる放射状の

ひずみ（放射ひずみ）とそれに直交する接線ひずみで構成されており、光学的ひずみは明度低下現象などで構成されている。光学的ひずみについては天野らが魚眼カメラにも適用できるキャリブレーション法を示したが [5]、魚眼カメラの幾何学的ひずみのキャリブレーションについては十分な精度が得られていない。そこで、本論文では魚眼カメラの幾何学的ひずみを補正するための、幾何学的キャリブレーション法について述べる。

魚眼カメラで撮影した画像（魚眼画像）は大きな放射ひずみを伴う。そこで、Baseらは多項式と対数式を用い [6]、Devernayらは半球面を用いて放射ひずみをモデル化した [7]。しかし、これらのモデルは接線ひずみを考慮していないため、幾何学的ひずみのモデルとしては不十分であった。また、BeaucheminらはWengらが提案した透視投影カメラの幾何学的ひずみモデル [8] を用いて放射ひずみと接線ひずみをモデル化した [9]、魚眼カメラ特有の放射ひずみを考慮していなかった。更に、上記のすべてのモデルは透視投影モデルに基づいているため、本質的に視野角 $180^\circ$ 以

<sup>†</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology Niigata University, 2-8050 Igarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

<sup>††</sup> 長岡工業高等専門学校, 長岡市

Nagaoka National College of Technology, 888 Nishikataki, Nagaoka-shi, 940-8532 Japan

<sup>†††</sup> 筑波技術短期大学, つくば市

Tsukuba College of Technology, 4-3-15 Amakubo, Tsukuba-shi, 305-0005 Japan

\* 現在, NEC モバイルリング株式会社

上を表すことができず、広視野角の魚眼カメラの視野全体を扱うことができない。

そこで、Baksteinらは魚眼レンズを製造する際に用いられている射影関数を用いて放射ひずみのモデル化を行い、円筒内部に張った格子パターンの撮影画像と実空間の対応付けを行うことによりキャリブレーションを行った[10]。この手法は視野角180°以上をキャリブレーションすることができるが、接線ひずみをモデル化していない。また、円筒の中心軸とカメラの光軸を合わせる必要があり、容易にキャリブレーションを行うことができない。

そこで、本論文では魚眼レンズを製造する際に用いられている射影関数にWengらが提案した幾何学的ひずみモデル[8]を組み合わせて、魚眼カメラ特有の幾何学的ひずみをモデル化する。また、カメラ焦点を中心とした仮想球面を考え、その投影像を用いることにより180°程度の広視野角の魚眼カメラに適するキャリブレーション法を提案する。

## 2. 投影モデル

### 2.1 魚眼カメラの幾何学的性質

カメラ座標系原点(視点)とオブジェクトを結ぶ直線に平行な単位ベクトルを投影ベクトル $P$ とし、光軸と $P$ のなす角を $\theta$ とする。また、カメラ撮像面上の投影像と光軸中心との距離を $r$ とし、焦点距離を $f$ とすると、透視投影カメラのモデルは図1となり、 $r = f \tan \theta$ となる射影関数が成り立つ。一方、魚眼カメラは表1のように、(A)立体射影方式、(B)等距

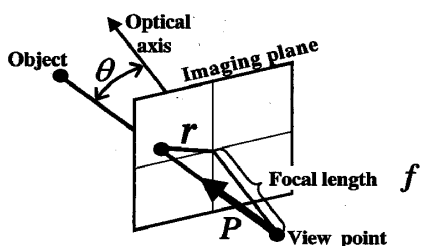


図1 透視投影モデル  
Fig. 1 Perspective projection model.

表1 魚眼カメラの射影関数

Table 1 Projection function of fish-eye camera.

Projection type	$r$
(A) Stereographic projection	$2f \tan(\theta/2)$
(B) Equidistant projection	$f\theta$
(C) Equi-solid angle projection	$2f \sin(\theta/2)$
(D) Orthographic projection	$f \sin \theta$

離射影方式、(C)等立体角射影方式、(D)正射影方式の4種類の射影関数がいわれている。これらの中で、本論文では画像周辺部における解像度低下の最も少ない立体射影方式を用いる。図2のように、視点を中心とする半径 $f$ の球面への投影像を $T_1$ とし、視点から $f$ の距離にある光軸上の点を $T_2$ とすると、立体射影モデルは $T_2$ を二次的な視点として $T_1$ を再投影するモデルとして表すことができる。なお、提案するキャリブレーション法は他の射影方式にも適用可能である。

### 2.2 幾何学的性質を考慮した投影モデル

魚眼画像上のオブジェクトの座標値を $S$ とし、魚眼画像上の光軸中心の座標値を $C$ とする。また、 $f$ と撮像素子の大きさの比の値を $(f_u, f_v)$ とし、立体射影方式の射影関数を用いると、 $P$ と $S$ の関係を表す投影モデルは式(1)となる。(付録1.参照)

$$P // [4\hat{u} \quad 4\hat{v} \quad 4 - \hat{r}^2]^T \quad (1)$$

ここで、 $\hat{u}$ と $\hat{v}$ 及び $\hat{r}$ を式(2)で表す。

$$\begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 \\ 0 & f_v \end{bmatrix}^{-1} (S - C)$$

$$\hat{r} = \sqrt{\hat{u}^2 + \hat{v}^2} \quad (2)$$

式(1)で表される投影モデルを立体射影モデル(SPM: Stereographic Projection Model)とする。

魚眼カメラはSPMをもとに設計されているが、完全ではない。Wengらは透視投影カメラに含まれる理論的射影関数からのひずみ成分を四つの内部パラメータ $(g_1, g_2, g_3, g_4)$ と光軸中心から放射方向の多項式ひずみ成分 $R$ を用いてモデル化した[8]。そこで、SPMにWengらの提案した幾何学的ひずみを付加したモデルを提案し、式(3)に示す。

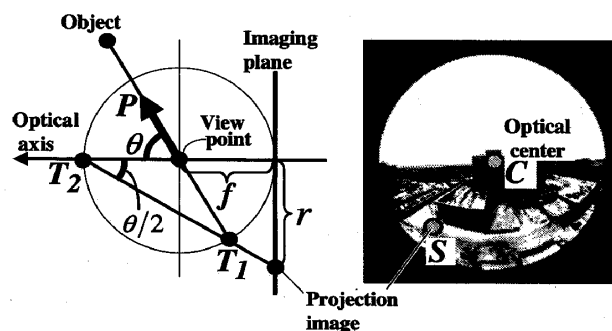


図2 立体射影モデル  
Fig. 2 Stereographic projection model.

表 2 Weng のモデルの放射ひずみ成分

Table 2 Radial distortion components of Weng's model.

(I) 1st order polynomial	$R = 1 + k_1 r^2$
(II) 2nd order polynomial	$R = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4$
(III) 3rd order polynomial	$R = 1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6$

$$P // [4\tilde{u} \quad 4\tilde{v} \quad 4 - (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2)]^T \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{u}$  と  $\tilde{v}$  を式 (4) で表す。

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 + g_3 & g_2 \\ g_4 & g_3 \\ g_1 & g_2 + g_4 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{u}^2 \\ \hat{u}\hat{v} \\ \hat{v}^2 \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \end{bmatrix} \quad (4)$$

本論文では  $R$  の値として、内部パラメータ  $k_1, k_2, k_3$  を用いて三次多項式まで考える (表 2)。 $R$  の値に (I) 一次多項式を用いたモデルを立体射影ひずみモデル 1 (SPDM1: Stereographic Projection and Distortion Model 1) とし、(II) 二次多項式を用いたモデルを立体射影ひずみモデル 2 (SPDM2)、(III) 三次多項式を用いたモデルを立体射影ひずみモデル 3 (SPDM3) とする。

### 3. 球面投影によるキャリブレーション法

#### 3.1 球面投影キャリブレーション法の概要

従来法 [6], [7], [9] では、透視投影モデルに当てはめることによりキャリブレーションを行っているが、透視投影モデルは本質的に視野角  $180^\circ$  以上を表すことができない。そこで、本論文ではカメラ焦点を中心とする半径 1 の仮想球面を考え、仮想球面への投影像を用いて、キャリブレーションを行う方法を提案する。

キャリブレーションには液晶ディスプレイに表示した水平・垂直平行線パターンを用いる。液晶ディスプレイは位置・姿勢を保持したままパターンの変更が可能であり、パターンの幾何学的精度が高い。また、平行線パターンは格子点パターンと比べ、パターンから抽出できる座標点が多いので、キャリブレーション精度向上に有効である。

液晶ディスプレイに表示した平行線パターンを魚眼カメラで撮影すると、図 3 のように、魚眼画像上で曲線群が得られる。これらの曲線上の座標点を計測点と呼ぶ。提案した投影モデルを用いて、計測点を仮想球面へ投影する。投影モデルが理想的な場合、仮想球面への投影像について次の幾何学的条件が成立する。

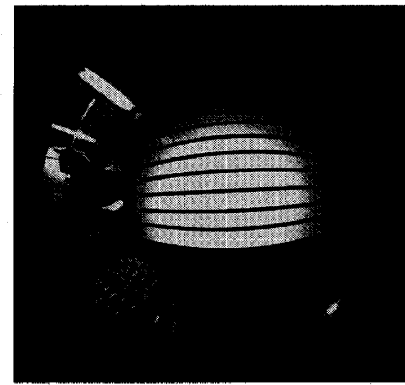


図 3 平行線パターンを撮影した魚眼画像

Fig. 3 Fish-eye image of parallel lines.

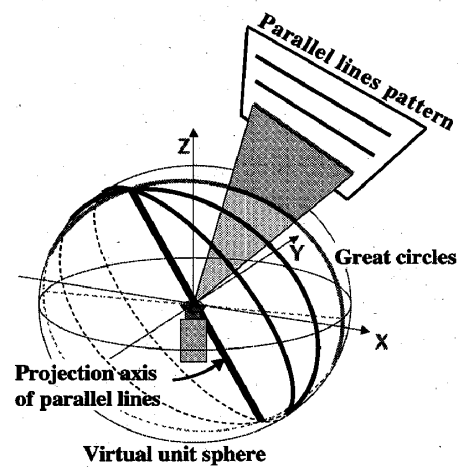


図 4 球面投影モデル

Fig. 4 Spherical projection model.

- (i) 直線性 直線の投影像は視点を中心とする円 (大円) の一部となる (図 4)。
- (ii) 平行性 平行線が作る複数の大円群は視点を通る 1 本の軸 (平行線投影軸) を通る (図 4)。
- (iii) 直交性 空間で直交する 2 組の平行線群の平行線投影軸は直交する。

実際の計測点から得られる再投影像に対し、(i)~(iii) を最もよく満たす内部パラメータを求めることで、キャリブレーションを行う。

評価すべき値が 3 種類あるが、キャリブレーションを行うためには評価値を一つにする必要がある。評価値を一つにする方法として、各性質に対する誤差の重み付け平均をとることも考えられるが、これらはそれぞれ独立した性質であるため、重み係数を定式化することは極めて困難である。そこで、本論文では (i)~(iii) の各性質を幾何学的に拘束して理想的な投影像を

推定し、理想的な投影像と再投影像との誤差を評価値とする。各性質を同時に拘束するためには (iii) 直交性, (ii) 平行性, (i) 直線性の順に拘束する必要がある。

### 3.2 パターンの撮影

液晶ディスプレイに表示した  $m_h$  本の水平平行線パターンと  $m_v$  本の垂直平行線パターンを魚眼カメラの位置・姿勢を固定して1枚ずつ撮影し、取得した水平・垂直線画像を合わせて1組の画像と呼ぶ。次に、魚眼カメラの位置・姿勢を変えて同様に撮影し、複数組の画像を得る。得られた画像組数を  $l$  とする。

### 3.3 直交性の拘束

1組の画像について考える。直交性の拘束は水平線と垂直線の平行線投影軸に直交性をもたせることである。直交性をもった平行線投影軸に平行な単位ベクトルをそれぞれ平行線ベクトル  $H', V'$  とする。 $H'$  と  $V'$  は単位ベクトルであるため、それぞれ2自由度である。ここで、直交性の拘束条件  $H' \perp V'$  が保証されれば、合計3自由度となる。これらの三つのパラメータを最適化手法により求める。

最適化手法は評価関数を最も小さくするパラメータを再帰的に探索する手法であるが、探索時間の縮小及び探索を成功させるためには適切な初期値を与える必要がある。そこで、最小二乗法を用いて求めた近似解を初期値とする。

$H', V'$  の初期値をそれぞれ  $H, V$  とし、水平・垂直平行線の計測点の数をそれぞれ  $n_{hi} (i \in 1 \dots m_h)$ ,  $n_{vi} (i \in 1 \dots m_v)$  とする。また、図5のように、これらの計測点から得られる再投影ベクトルをそれぞれ  $P_{H_{ij}} (i \in 1 \dots m_h, j \in 1 \dots n_{hi})$ ,  $P_{V_{ij}} (i \in$

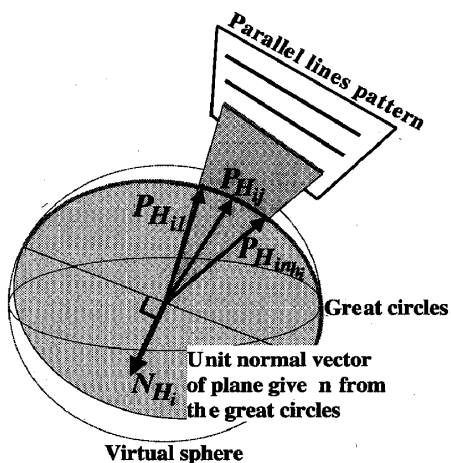


図5 大円の単位法線ベクトル

Fig. 5 Unit normal vector of plane given from the great circles.

$1 \dots m_v, j \in 1 \dots n_{vi}$ ) とし、3.1 で示した直線性を示す大円の単位法線ベクトルをそれぞれ  $N_{H_i}, N_{V_i}$  とする。投影モデルが理想的な場合、 $P_{H_{ij}}$  と  $P_{V_{ij}}$  はそれぞれ  $N_{H_i}$  と  $N_{V_i}$  に直交する。したがって、上記を最もよく満たすよう、最小二乗推定のための方程式 (5) より  $N_{H_i}$  と  $N_{V_i}$  を求める。

$$\frac{\partial}{\partial N_{H_i}} \sum_j^{n_{hi}} \|P_{H_{ij}} \cdot N_{H_i}\|^2 = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial N_{V_i}} \sum_j^{n_{vi}} \|P_{V_{ij}} \cdot N_{V_i}\|^2 = 0 \quad (5)$$

式 (5) を解くと、 $N_{H_i}$  と  $N_{V_i}$  はそれぞれ  $\Upsilon(P_{H_{ij}}, n_{hi}, j)$ ,  $\Upsilon(P_{V_{ij}}, n_{vi}, j)$  となる。ここで、 $\Upsilon$  は式 (6) の関数を表す。

$$\Upsilon(A, p, \alpha) // \begin{bmatrix} U_{12}U_{23} - U_{22}U_{13} \\ U_{12}U_{13} - U_{11}U_{23} \\ U_{11}U_{22} - U_{12}^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} \\ U_{12} & U_{22} & U_{23} \\ U_{13} & U_{23} & U_{33} \end{bmatrix} = \sum_{\alpha}^p AA^T \quad (6)$$

また、投影モデルが理想的な場合、 $N_{H_i}$  と  $N_{V_i}$  は 3.1 で示した平行性を示す平行線投影軸に直交する (図6)。したがって、上記を最もよく満たすよう、最小二乗推定のための方程式 (7) より  $H$  を推定する。

$$\frac{\partial}{\partial H} \sum_i^{m_h} \|N_{H_i} \cdot H\|^2 = 0 \quad (7)$$

式 (7) を解くと、 $H$  は  $\Upsilon(N_{H_i}, m_h, i)$  となる。 $V$  は先に求めた  $H$  と垂直な平面  $\Pi$  で拘束され (式

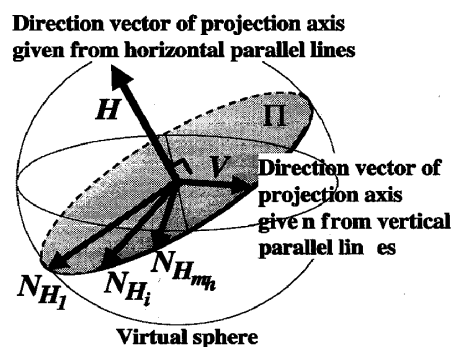


図6 平行線ベクトル

Fig. 6 Direction vector of projection axis.

(8)), この平面内で最小二乗推定のための方程式 (9) を満たす方向となる。

$$H \cdot V = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial V} \sum_i^{m_v} \|N_{V_i} \cdot V\|^2 = 0 \quad (9)$$

式 (9) を解くと,  $V$  は  $\Psi(H, N_{V_i}, m_v, i)$  となる。 $\Psi$  は式 (10) に示す関数を表す。

$$\Psi(D, E, q, \beta) // c_1 B + \left(c_2 - \sqrt{c_1^2 + c_2^2}\right) G$$

$$B = [-D_z \ 0 \ D_x]^T$$

$$G = B \times D$$

$$c_1 = 2B^T \sum_{\beta}^q (EE^T) G$$

$$c_2 = B^T \sum_{\beta}^q (EE^T) B - G^T \sum_{\beta}^q (EE^T) G \quad (10)$$

式 (10) の導出法を付録 2. に示す。

以上より  $H$  と  $V$  を推定したが,  $H$  と  $V$  は同時に推定されていないため誤差を含む。したがって, 推定した  $H$  と  $V$  を用いて 3.4 と 3.5 で述べる手法で  $P_{H_{ij}}$  と  $P_{V_{ij}}$  を更新し, それらと同時に  $H$  と  $V$  を反復推定することにより最適化する。

### 3.4 平行性の拘束

直交性の拘束後の平行線投影軸を通る大円を求めることで, 平行性を拘束する。水平・垂直平行線投影軸を通る大円の単位法線ベクトルをそれぞれ  $W_{H_i} (i \in 1 \dots m_h)$ ,  $W_{V_i} (i \in 1 \dots m_v)$  とすると,  $W_{H_i}$  と  $H'$  及び  $W_{V_i}$  と  $V'$  はそれぞれ直交するため, 式 (11) が成り立つ。

$$\begin{aligned} H' \cdot W_{H_i} &= 0 \\ V' \cdot W_{V_i} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$W_{H_i}$  と  $W_{V_i}$  を式 (11) により拘束し, 最小二乗推定のための方程式 (12) を解くと  $W_{H_i}$  と  $W_{V_i}$  はそれぞれ  $\Psi(H', P_{H_{ij}}, n_{h_i}, j)$ ,  $\Psi(V', P_{V_{ij}}, n_{v_i}, j)$  となる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial W_{H_i}} \sum_j^{n_{h_i}} \|P_{H_{ij}} \cdot W_{H_i}\|^2 &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial W_{V_i}} \sum_j^{n_{v_i}} \|P_{V_{ij}} \cdot W_{V_i}\|^2 &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

### 3.5 評価関数とキャリブレーション

平行性と直交性が拘束された大円を一部分とする投影像が (i)~(iii) の各性質を拘束した理想的な投影像となる。この理想的な投影像と  $P_{H_{ij}}$ ,  $P_{V_{ij}}$  の球面投影像との距離を残差  $e_{H_i}$ ,  $e_{V_i}$  とすると,  $e_{H_i}$ ,  $e_{V_i}$  は式 (13) となる。

$$\begin{aligned} e_{H_i} &= \sum_j^{n_{h_i}} \|W_{H_i} \cdot P_{H_{ij}}\| \\ e_{V_i} &= \sum_j^{n_{v_i}} \|W_{V_i} \cdot P_{V_{ij}}\| \end{aligned} \quad (13)$$

$e_{H_i}$  と  $e_{V_i}$  の 2 乗和を評価関数  $F$  とする。ここで,  $l$  組の水平・垂直平行線パターン画像を用いると  $F$  は式 (14) となる。

$$F = \sum_l \left\{ \sum_i^{m_h} e_{H_i}^2 + \sum_i^{m_v} e_{V_i}^2 \right\} \quad (14)$$

また,  $l$  組の画像を用いると, 平行線ベクトル  $H'$ ,  $V'$  に関する未知パラメータは  $3l$  個となる。したがって,  $F$  には投影モデルの内部パラメータと  $H'$ ,  $V'$  に関する  $3l$  個のパラメータが含まれる。これらのパラメータを  $F$  が最小となるように最適化手法を用いて推定する。投影モデルの内部パラメータの初期値はレンズやカメラの設計値を与える。

## 4. 評価実験

### 4.1 実験環境・方法

実験には, 立体射影方式魚眼レンズ (FIT 社 FI-21) と KODAK MEGAPLUS カメラ (ES1.0/MV, 1008×1018 画素, gray スケール) 及びキャリブレーションパターンを表示するための液晶ディスプレイ (SHARP LL-T1610W, 1280×1024 [pix], 画素ピッチ 0.248 [mm]) を用いた。パターンには 57 本の水平平行線と 71 本の垂直平行線を用いた。

魚眼カメラは被写界深度が深く, 近距離にあるパターンを撮影することができる。キャリブレーションの精度を上げるためには魚眼画像の広範囲にパターンを写す必要があるため, 撮影時の魚眼カメラと液晶ディスプレイの距離をなるべく近づけ (10~200 [mm]) 撮影した。撮影では, ランダムノイズ軽減及び明度低下によるパターンの抽出精度低下を抑えるため, 8 フレームを用いた時間平均化処理とパターンを表示しない背景画像からの差分処理を行った。

パターン上の曲線の抽出は撮影画像内の輝度変化による影響を受けにくい Steger らの手法 [11] を用いた。この手法はサブピクセル精度で曲線を抽出できるが、曲線の両端が正確に抽出されないため、両端の 30 [pix] を除去した。また、キャリブレーション精度向上のために、長さ 400 [pix] 以上の曲線のみを使用した。

最適化の精度に依存しない公正な評価をするため、キャリブレーション用の画像と精度評価用の画像を区別し、キャリブレーション用に 50 組の画像、精度評価用に別の 50 組の画像を使用した。

キャリブレーションでは最適化手法として、一次元の最適化と多次元の最適化にそれぞれ Brent 法と Powell 法を用いた [12]。Brent 法及び Powell 法による最適化は最低 10 回反復計算させることとし、局所解の相対誤差が  $10^{-5}$  以下となるまで反復計算を行った。

#### 4.2 キャリブレーション結果

本論文では比較する従来法として、二次多項式モデル PFET2 [6] と FOV [7] 及び FOV に一次多項式を組み合わせた FOV1 [7] を用い、提案した四つの投影モデル (SPM, SPDM1, SPDM2, SPDM3) と同じ実験環境でキャリブレーションを行った。従来法のキャリブレーション結果を表 3 に、提案法のキャリブレーション結果を表 4 に示す。

表 3 従来法のキャリブレーション結果

Table 3 Calibration results of existing methods.

	PFET2	FOV	FOV1
$C_u$ [pix]	508.12	508.63	507.80
$C_v$ [pix]	495.74	504.32	502.65
$s$	1.0262	1.0013	0.99975
$k_1 [\times 10^{-5}]$	-30891	—	-56.919
$k_2 [\times 10^{-5}]$	20839	—	—
$\omega [\times 10^{-5}]$	—	-78172	78819
$\chi [\times 10^7]$	9.9860	1.3395	1.1493

表 4 提案法のキャリブレーション結果

Table 4 Calibration results of proposed methods.

	SPM	SPDM1	SPDM2	SPDM3
$C_u$ [pix]	507.89	506.63	506.77	507.73
$C_v$ [pix]	506.13	491.55	496.79	492.77
$f_u [\times 10^{-3}]$	4.1644	4.3035	4.2580	4.2616
$f_v [\times 10^{-3}]$	4.1611	4.3059	4.2608	4.2649
$k_1 [\times 10^{-5}]$	—	-967.21	-74.487	-231.94
$k_2 [\times 10^{-5}]$	—	—	-201.21	-136.77
$k_3 [\times 10^{-5}]$	—	—	—	-78139
$g_1 [\times 10^{-5}]$	—	-131.08	-117.70	-161.56
$g_2 [\times 10^{-5}]$	—	-1483.6	-987.10	-1389.8
$g_3 [\times 10^{-5}]$	—	401.29	365.17	151.58
$g_4 [\times 10^{-5}]$	—	3143.4	2190.8	3057.3
$F$	7.0206	1.7478	1.1038	1.1527

シオン結果を表 4 に示す。表 3 における  $s$  と  $\omega$  は従来法の内部パラメータを表し、 $\chi$  は従来法における評価関数 (魚眼画像における理想点と計測点の距離の 2 乗和) を表す。

表 3 では、 $\chi$  の値が最も小さい FOV1 が従来法の中で最も精度が良いといえる。表 4 では、 $F$  の値が最も小さい SPDM2 が提案法の中で最も精度が良いといえる。しかし、従来法と提案法では投影モデルが異なるため、パラメータを直接比較して精度を評価することはできない。また、真値を実空間で精度良く求めることは困難なため、次節の評価を行った。

#### 4.3 精度評価方法

水平平行線パターンと垂直平行線パターンの魚眼画像上の交点群を用い、これらの交点群の仮想三次元復元像の誤差を評価する。交点は曲線のスプライン補間を行い、サブピクセル精度で求める。

これらの交点群を仮想三次元復元するためには、液晶ディスプレイ平面の方程式 (15) を満たす  $N_D$  と  $d$  を求める必要がある。

$$[X \ Y \ Z]N_D + d = 0 \quad (15)$$

ここで、 $N_D$  は液晶ディスプレイ平面の単位法線ベクトルを表し、 $d$  は視点と液晶ディスプレイの距離を表す。3.3 と同様に直交性をもつ平行線投影軸を求め、これを  $\hat{H}'$ 、 $\hat{V}'$  とすると、 $N_D$  は  $\hat{H}' \times \hat{V}'$  となる。一方、 $d$  を求めるためには実空間のスケールが必要になる。そこで、本論文では液晶ディスプレイの画素ピッチの設計値を用いてパターンの水平・垂直平行線の間隔を計算し、これらを実空間のスケールとして与えた。与えた水平・垂直平行線の間隔をそれぞれ  $t_h$ 、 $t_v$  とする。

##### 4.3.1 交点パターンの復元像

復元した仮想ディスプレイ平面上では、交点の復元像は図 7 に示すような点群になる。水平・垂直平行線の本数をそれぞれ  $\hat{m}_h$ 、 $\hat{m}_v$  とし、交点の復元像のカメラ座標系における位置を  $P_{D_{x,y}}$  ( $x \in 1 \dots \hat{m}_h, y \in 1 \dots \hat{m}_v$ ) とすると、 $P_{D_{x,y}}$  は式 (16) のように  $d$  を用いて表すことができる。

$$P_{D_{x,y}} = \frac{d}{\cos \rho} P_{I_{x,y}} = \frac{d}{N_D \cdot P_{I_{x,y}}} P_{I_{x,y}} \quad (16)$$

ここで、 $P_{I_{x,y}}$  はキャリブレーション済みの投影モデルを用いた交点の単位再投影ベクトルを表し、 $\rho$  は  $N_D$  と  $P_{I_{x,y}}$  のなす角を表す。

図 7 のように交点の復元像の水平方向の間隔を  $T_{h,x,y}$

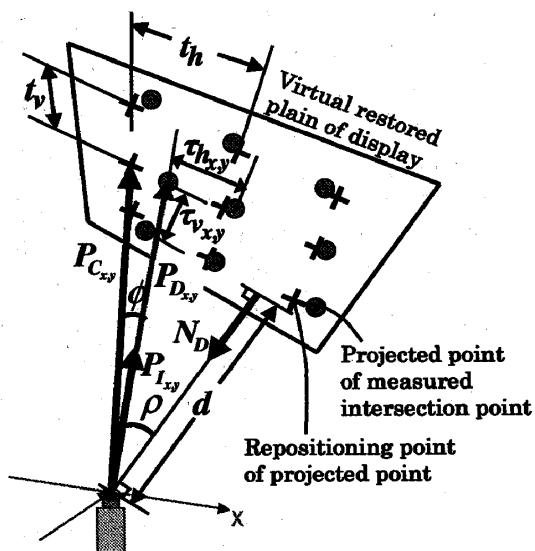


図7 交点パターンの復元像

Fig. 7 Restoration image of intersection patterns.

とし、垂直方向の間隔を  $\tau_{v,x,y}$  とする。  $\tau_{h,x,y}$  の平均が  $t_h$  となるように求めた  $d$  を  $d_h$ 、  $\tau_{v,x,y}$  の平均が  $t_v$  となるように求めた  $d$  を  $d_v$  とすると、  $d_h$  と  $d_v$  は式 (17) となる。

$$d_h = \frac{\sum_{y=1}^{m_v} \sum_{x=1}^{m_h-1} \tau_{h,x,y} \|P_{I_{x+1,y}} - P_{I_{x,y}}\|}{m_v(m_h-1)t_h}$$

$$d_v = \frac{\sum_{y=1}^{m_v-1} \sum_{x=1}^{m_h} \tau_{v,x,y} \|P_{I_{x,y+1}} - P_{I_{x,y}}\|}{(m_v-1)m_h t_v} \quad (17)$$

$d_h$  と  $d_v$  を用いて式 (18) のように  $d$  を決め、交点パターンの復元像の位置  $P_{D_{x,y}}$  を求める。

$$d = (d_h + d_v)/2 \quad (18)$$

### 4.3.2 復元像の誤差の評価

もし、正確な投影モデルを用いたならば、  $P_{D_{x,y}}$  は平行性と直交性及び縦横比を保つ。そこで、  $P_{D_{x,y}}$  の幾何学的な誤差を評価する。

$t_h$  と  $t_v$  を用いて平行・直交性と縦横比を保つ理想的な交点パターンを考える。この交点パターンの位置を  $P_{C_{x,y}}$  とし、図7において十字線で示す。  $P_{C_{x,y}}$  は  $P_{C_{x,y}}$  と  $P_{D_{x,y}}$  の距離の2乗和  $\sigma$  (式(19)) が最小となるように、最適化により求める。

$$\sigma = \sum_{x=1}^{m_h} \sum_{y=1}^{m_v} (P_{C_{x,y}} - P_{D_{x,y}})^2 \quad (19)$$

求めた  $P_{C_{x,y}}$  と  $P_{D_{x,y}}$  のなす角を角度誤差  $\phi$  とし、  $P_{C_{x,y}}$  に対応する魚眼画像上の座標と  $P_{I_{x,y}}$  に対応する魚眼画像上の座標の距離を距離誤差  $\epsilon$  とする。

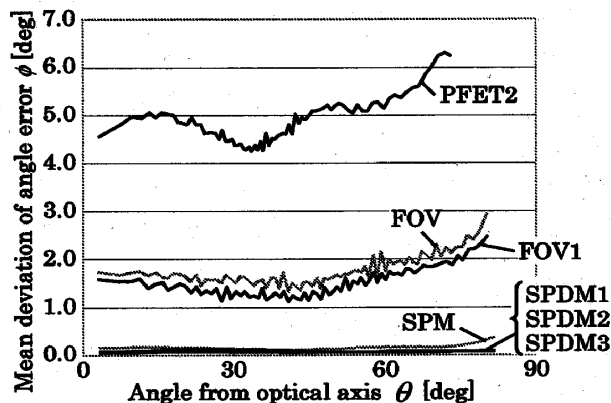


図8 角度誤差  $\phi$  の平均偏差

Fig. 8 Mean deviation of angle error  $\phi$ .

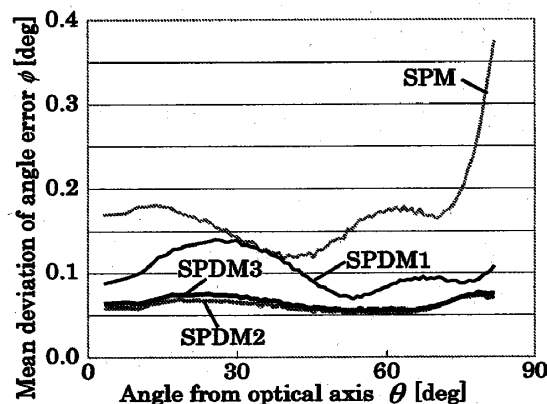


図9 図8の別スケール表示

Fig. 9 Different scale of Fig. 8.

誤差の比較は交点パターンの投影ベクトルと光軸のなす角  $\theta$  ごとの  $\phi$  の平均偏差と、魚眼画像上の交点パターンの位置と光軸中心の距離  $r'$  ごとの  $\epsilon$  の平均偏差とする。

### 4.4 キャリブレーションモデルの精度の比較結果

角度誤差  $\phi$  について、従来法と提案法を比較した結果を図8に、提案法のみを比較した結果を図9に示す。

図8で示すように、従来法に比べ、提案法の誤差が極めて小さい。したがって、提案した球面投影キャリブレーション法が有効に働いていることが分かる。図9に示すように、SPMでは画像周辺部に大きな誤差が現れたが、SPDM1を用いることにより画像周辺部の角度誤差を小さくすることができた。また、SPDM2とSPDM3はほとんど角度誤差に差がないため、本実験では放射ひずみ成分に二次多項式を用いるだけで十分であった。SPDM2とSPDM3の画像全体に対する角度誤差の平均偏差は約0.0608 [deg]であり、これは1[m]先のオブジェクトを約1.06 [mm]の誤差で検出

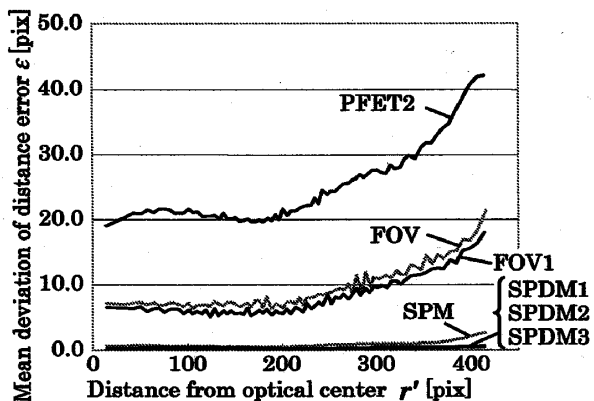
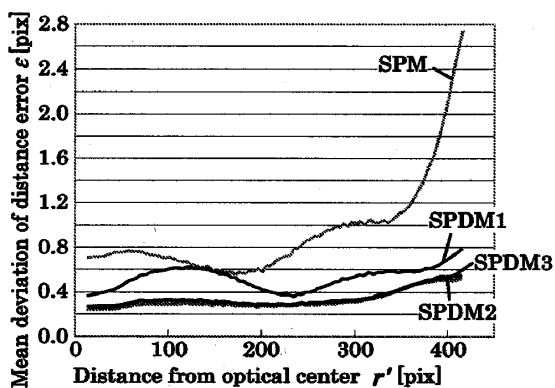
図 10 距離誤差  $\epsilon$  の平均偏差Fig. 10 Mean deviation of distance error  $\epsilon$ .

図 11 図 10 の別スケール表示

Fig. 11 Different scale of Fig. 10.

可能であることを表す。

次に、距離誤差  $\epsilon$  について、従来法と提案法を比較した結果を図 10 に、提案法のみを比較した結果を図 11 に示す。

距離誤差  $\epsilon$  も従来法の誤差が大きく、従来法の中で一番精度が高かった FOV1 でも 10 [pix] 程度の距離誤差であった (図 10)。一方、提案法の SPDM2 では画像中心部で 0.3 [pix] 程度、画像周辺部でも 0.5 [pix] 程度の誤差であり (図 11)、従来法に比べて十分な精度でキャリブレーションを行うことができることが明らかになった。

## 5. むすび

本論文では、魚眼カメラの射影関数に Weng が提案した幾何学的ひずみモデルを付加した広視野角の魚眼カメラに適する投影モデルを提案した。また、幾何学的精度の高い液晶ディスプレイに表示した水平・垂直平行線パターンを用い、それらのパターンの仮想球面への投影像を利用した魚眼カメラ内部パラメータの

幾何学的キャリブレーション法を提案した。仮想球面への投影像は直線性と平行性及び直交性の 3 種類の性質をもっている。キャリブレーションはこれらの性質の最小二乗法による拘束と内部パラメータの最適化の複合により行った。

次に、提案法の精度を評価するため、キャリブレーションにより求めた内部パラメータをもとに水平・垂直平行線パターンを三次元復元し、理想的な投影像と再投影像の誤差 (平均偏差) を求めた。提案法の誤差は魚眼画像中心部で 0.3 [pix] (カメラ座標系で 0.06 [deg]) 程度であり、画像周辺部でも 0.5 [pix] (カメラ座標系で 0.08 [deg]) 程度であった。これらは従来法と比べて極めて小さな誤差であり、また、魚眼画像からの平行線抽出精度 (サブピクセル精度) に近い精度を保っているため、提案法が有効であり、高精度であることが分かる。

本論文では魚眼カメラについて述べたが、提案法は水平・垂直平行線パターンの球面投影像を使用しているため、広角カメラや全方位カメラにも適用可能である。

今後の課題として、魚眼カメラを広範囲の三次元計測に適用し、実際の三次元計測における提案法の効果を検証することなどが挙げられる。

## 文 献

- [1] S. Shah and J.K. Aggarwal, "Mobile robot navigation and scene modeling using stereo fish-eye lens system," *Machine Vision and Applications*, vol.10, pp.159-173, 1997.
- [2] 宮川 勲, 若林佳織, 荒川賢一, "魚眼投影モデルに基づく画像系列からの平面運動と 3 次元形状の復元," *信学論 (D-II)*, vol.J87-D-II, no.5, pp.1120-1132, May 2004.
- [3] 宮川 勲, 若林佳織, 有川知彦, "全方位射影型因子分解法による全方位画像からの運動と形状復元," *信学技報*, PRMU2002-37, June 2002.
- [4] 奥住啓介, 吉田克明, 辻 求, 山崎由喜, "車両搭載型センサを用いた 3 次元都市空間モデルの自動構築," 第 12 回機能図形情報システムシンポジウム, 2001.
- [5] 天野 晃, 浅田尚紀, 馬場雅志, "ズームレンズの光学的ひずみの解析と補正—可変円筒モデルを用いた口径蝕減少の解析と画像周辺部明度低下の補正," *信学論 (D-II)*, vol.J80-D-II, no.6, pp.1458-1465, June 1997.
- [6] A. Base and S. Licardie, "Alternative models for fish-eye lenses," *Pattern Recognit. Lett.*, no.16, pp.433-441, April 1995.
- [7] F. Devernay and O. Faugeras, "Straight line have to be straight — Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments," *Machine Vision and Applications*, vol.13, pp.14-24, 2001.



- [8] J. Weng, P. Cohen, and M. Herniou, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.14, no.10, pp.965-980, Oct. 1992.
- [9] S.S. Beauchemin, R. Bajcsy, and G. Givaty, "A unified procedure for calibrating intrinsic parameters of fish-eye lenses," *Vision Interface*, pp.272-279, Canada, May 1999.
- [10] H. Bakstein and T. Pajdla, "Calibration of a fish eye lens with field of view larger than 180°," *Proc. CVWW 2002*, pp.276-285, Feb. 2002.
- [11] C. Steger, "Extraction of curved lines from images," *13th Int. Conf. on Pattern Recognit. vol.II*, pp.251-255, 1996.
- [12] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flanery (著), 丹廣勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎, 小林誠 (訳), *Numerical Recipes in C*, 技術評論社, 1993.

## 付 録

### 1. 式(1)の導出法

表 1(A) より, 立体射影方式の射影関数は  $\theta = 2\arctan(r/2f)$  となる. これを用いると,  $P$  と  $S$  の関係は式 (A.1) となる.

$$P // \left[ u \quad v \quad r/\tan\{2\arctan \frac{r}{2f}\} \right]^T \quad (\text{A.1})$$

ここで,  $u$  と  $v$  及び  $r$  を式 (A.2) で表す.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = f \begin{bmatrix} f_u & 0 \\ 0 & f_v \end{bmatrix}^{-1} (S - C)$$

$$r = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (\text{A.2})$$

$\tan 2\gamma = 2/\{(1/\tan\gamma) - \tan\gamma\}$  であるため, 式 (A.1) は式 (A.3) となる.

$$P // \left[ u \quad v \quad \frac{r}{2} \left( \frac{2f}{r} - \frac{r}{2f} \right) \right]^T \\ // \left[ u \quad v \quad f - \frac{r^2}{4f} \right]^T \quad (\text{A.3})$$

また,  $u = f\hat{u}$ ,  $v = f\hat{v}$ ,  $r = f\hat{r}$  であるため, 式 (A.3) は式 (A.4) となる.

$$P // \frac{f}{4} \left[ 4\hat{u} \quad 4\hat{v} \quad 4 - \hat{r}^2 \right]^T \quad (\text{A.4})$$

式 (A.4) は式 (1) と平行であるため, 式 (1) が成り立つ.

### 2. 式(10)の導出法

式 (10) において,  $B$  と  $G$  及び  $V$  は図 6 の  $\Pi$  に乗

る単位ベクトルである. また,  $B \perp G$  であるため,  $V$  は  $B$  と  $G$  の成分で表すことができる. ここで,  $B$  と  $V$  のなす角を  $\varphi$  とすると,  $V$  は式 (A.5) となる.

$$V = B \cos \varphi + G \sin \varphi \quad (\text{A.5})$$

また,  $K = \sum_i^{m_v} (N_{V_i} N_{V_i}^T)$  とおき,  $\varphi$  を用いると, 式 (9) は式 (A.6) となる.

$$V^T K \frac{\partial V}{\partial \varphi} = 0 \quad (\text{A.6})$$

式 (A.5) より,  $\frac{\partial V}{\partial \varphi} = G \cos \varphi - B \sin \varphi$  となるため, 式 (A.6) は式 (A.7) となる.

$$(B^T K B - G^T K G) \sin \varphi \cos \varphi \\ = B^T K G (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \quad (\text{A.7})$$

ここで,  $c_1 = 2B^T K G$ ,  $c_2 = B^T K B - G^T K G$  とおき, 2倍角の公式を用いると, 式 (A.7) は式 (A.8) となる.

$$2\varphi = \arctan(c_1/c_2) \quad (\text{A.8})$$

したがって, 式 (A.9) が成り立つ.

$$\sin 2\varphi = c_1 / \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \\ \cos 2\varphi = c_2 / \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \quad (\text{A.9})$$

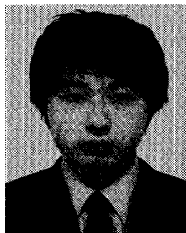
式 (A.9) を  $\sin \varphi$  と  $\cos \varphi$  について解き, 式 (A.5) に代入して整理すると,  $V$  は次式となる.

$$V // c_1 B + \left( c_2 - \sqrt{c_1^2 + c_2^2} \right) G \quad (\text{A.10})$$

したがって, 式 (10) が成り立つ.

(平成 17 年 3 月 2 日受付, 6 月 16 日再受付)

### 駒形 英樹 (正員)

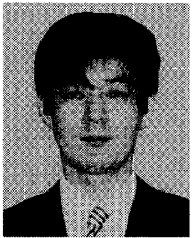


2003 新潟大・工・情報卒. 2005 同大大学院修士課程了. 同年 NEC モバイルリンク (株) 入社, 現在に至る. 在学中, コンピュータビジョンに関する研究に従事.



石井 郁夫 (正員)

1963 新潟大・工・電気卒。新潟大助手、助教授を経て、1989 教授。2005 定年退職。新潟大名誉教授。人工現実感、コンピュータビジョン、画像処理などの研究に従事。日本 VR 学会会員。工博。



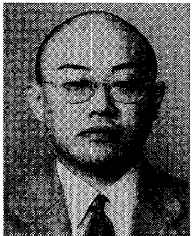
高橋 章 (正員)

1991 新潟大・工・情報卒。1993 同大大学院工学研究科修士課程了。1996 同大学院自然科学研究科博士課程了。長岡高専・電子制御工学科・助手、講師を経て、2003 助教授。コンピュータビジョン、人工現実感などの研究に従事。博士(工学)。



若月 大輔 (正員)

1998 新潟大・工・情報卒。2000 同大大学院自然科学研究科博士前期課程了。2003 同大学院博士後期課程了。現在、筑波技術短期大学聴覚部助手。人工現実感、画像処理に関する研究に従事。日本 VR 学会会員。博士(工学)。



今井 博英 (正員)

1993 新潟大・工・情報卒。1995 同大大学院修士課程了。1998 同大学院自然科学研究科博士後期課程了。1998 同大学院自然科学科学研究科助手。2003 同大工学部情報工学科助手。2004 同大自然科学科学系助手。共有仮想環境、ネットワークシステムの性能評価に関する研究に従事。博士(工学)。