

## 球面モデルに基づくしま模様パターンを用いた魚眼カメラの校正

中野 誠士<sup>†</sup>      李 仕剛<sup>†</sup>      千葉 則茂<sup>†</sup>

Calibrating Fisheye Camera by Stripe Pattern Based upon Spherical Model

Masao NAKANO<sup>†</sup>, Shigang LI<sup>†</sup>, and Norishige CHIBA<sup>†</sup>

あらまし 本論文では、しま模様パターンを用いた魚眼カメラの校正手法を提案する。しま模様パターンがもつ平行直線の消失点対は、広い視野をもつ魚眼画像上に写し込むことが可能である。本手法では、画像上で検出した消失点の性質を利用して魚眼カメラの基本パラメータの校正を行う。放射方向及び接線方向のレンズひずみを考慮した校正は、直線パターン上の全観測点の球面投影に基づく拘束を用いた非線形最適化によって行う。その際、消失点を利用して校正した基本パラメータ値をパラメータ初期値として用いるため、本手法は校正にレンズの設計値を必要とせず、様々なレンズに対して適用することが可能である。実験では等距離射影方式の魚眼カメラを用いているが、本手法は他の射影方式のカメラにも適用可能である。

キーワード カメラ校正, 魚眼カメラ, しま模様パターン, 球面モデル

### 1. ま え が き

魚眼カメラは、周辺監視やロボティクス、仮想環境の構築などに広く用いられている。特に、インタラクティブな没入型複合現実感のように、周囲環境の素早い取得 [4], [6], [8], [16], [18] ~ [20] が必要なタスクにおいては、少ない台数のカメラで環境マップを獲得することが望ましく、そのために魚眼カメラのような広域な視野をもつカメラを用いることは有効なアプローチである [1], [13], [14], [17]。

種々のタスクにカメラを用いるためには、カメラ校正を行い、必要なパラメータの値を獲得する必要がある。カメラの内部パラメータの校正精度を向上させるためには、なるべくカメラの視野全体の情報を校正に用いることが重要である。最も一般的なカメラモデルは図 1 (a) に示すようなピンホールカメラモデルであるが、魚眼レンズが半球以上の視野をもち得る（例えば Fisheye-NIKKOR 6 mm F5.6 は 220 度の画角をもつ）のに対し、このモデルによる平面への透視投影では半球以上の視野を表現できない（半球視野を表現するためには原理上、無限サイズの画像平面を要する）。そのため、ピンホールカメラモデルに基づくカメラ校

正手法では、魚眼カメラの視野全体の情報を用いることができない。

そこで、本論文では、図 1 (b) に示すような、シーン上の点がカメラ焦点を中心とした球面上に投影される球面モデルに基づいた魚眼カメラの校正手法を提案する。すべての方向の情報を均一に表現できる球面モデルには視野の限界がないため、魚眼カメラの視野全体の情報を用いることが可能である。本提案手法では、校正用パターンとして平行なしま模様のパターンを用いる。180 度以上の視野をもつ魚眼カメラはパターンがもつ平行直線の消失点をその撮影画像上に観測することができる。本論文では、まず、消失点の固有の性質を利用して魚眼カメラの基本パラメータ（光軸点位置、焦点距離、アスペクト比）を推定する。次に、パターン直線上の全観測点を用いて放射方向ひずみと接線方向ひずみを推定する。後者のレンズひずみを考慮した校正においては、非線形連立方程式を数値計算により解く必要があるため、消失点の性質を用いて推定された基本パラメータの値を初期値として用いる。そのため本手法はパラメータの設計値が未知であるカメラに対しても適用することが可能である。

本論文では、等距離射影方式の魚眼レンズを対象とした記述を行うが、レンズと画像平面間の射影は、射影方式によらず天頂角  $\theta$  と、撮影画像上での光軸点からの距離  $r$  で記述することができる [15] ため、本手法

<sup>†</sup> 岩手大学大学院工学研究科, 盛岡市  
Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka-shi, 020-8551 Japan

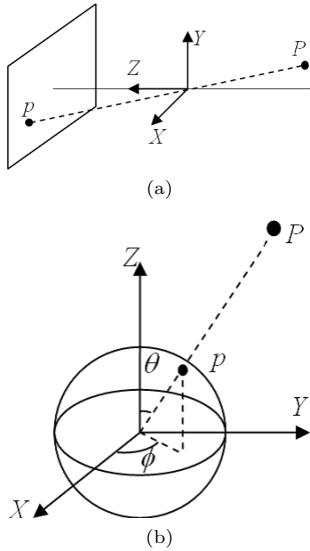


図 1 ピンホールカメラモデルと球面モデル

Fig. 1 (a) The perspective projection based upon a pin-hole camera model. (b) The spherical projection based upon a spherical model.

を他の射影方式のレンズへ拡張することは容易である。

以下, 2. では関連研究について, 3. では本手法で用いる球面投影モデルと魚眼レンズのひずみモデルについて, 4. では消失点の性質を利用した基本パラメータの校正手法について, 5. ではレンズひずみを含む校正手法と校正結果の評価方法について述べる. 6. で実験結果を示す. 7. はまとめである.

## 2. 関連研究

レンズの射影式は一般的な透視投影も含めて, シーンからレンズへの投射線がレンズの光軸となす角  $\theta$  と, 画像上での像高 (射影点の光軸点からの距離)  $r$  によって記述できる [15].

$$r = f \tan \theta \text{ (透視投影)}$$

$$r = f \theta \text{ (等距離射影)}$$

$$r = f \sin \theta \text{ (正射影)}$$

$$r = 2f \tan(\theta/2) \text{ (立体射影)}$$

$$r = 2f \sin(\theta/2) \text{ (等立体角射影)}$$

カメラレンズと画像平面間の関係を図 2 に示す. ここで,  $f$  はレンズの焦点距離である.  $OXYZ$  はレンズ焦点を原点とし  $Z$  軸をレンズの光軸方向としたカメラ座標系であり,  $cxy$  は光軸点を原点とした画像平面の座標系である. シーン内の点  $P$  は, 透視投影では  $P$  からレンズへの投射直線が画像平面と交わる点

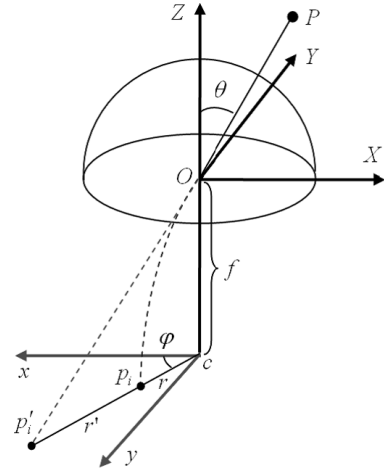


図 2 レンズと画像平面の関係 [2]

Fig. 2 A general model describing the relation between the camera lens and the image plane from [2].

$p'_i$  に射影する. 他の射影では, 投射光線はピンホールカメラモデルに従わずにカーブして  $p_i$  に射影する.

ピンホールカメラモデルに基づく一般的なレンズの校正に関して多くの研究がなされている [5], [10], [21], [22] のに比べると, 魚眼レンズの校正に関する研究は少なく, また, これまでの魚眼レンズ校正手法の多くはピンホールカメラモデルを用いているため, 180 度以上の視野をもつ魚眼レンズの視野全体の情報を扱うことができない [2], [9]. 文献 [23] は 180 度以上の視野をもつ魚眼レンズの校正手法を示したが, 特定のレンズに対して実験的に射影モデルを決定しているため一般の魚眼レンズに用いるのが困難である. また, 接線方向ひずみを取り扱っていない. 文献 [1] は球面画像を獲得するために複数の画像の重複領域の相関を計算して魚眼カメラの校正を行う手法を提案した. しかし, この手法はシーンのテクスチャに依存しており, また, 単一画像で校正を行うことができない.

カメラの校正では, 精度向上のために専用の校正パターンを用いる手法が多く, 本論文で提案する手法もこのカテゴリーに属する. 校正用パターンとしてはチェスボードパターンのような特徴的な図形を平面上に等間隔に配したパターンがよく用いられるが, そのようなパターンでは魚眼画像上で特徴形状を検出することは容易ではない. 例えば, 文献 [2] では校正用の観測パターンとして文献 [11] で用いられているのと同様

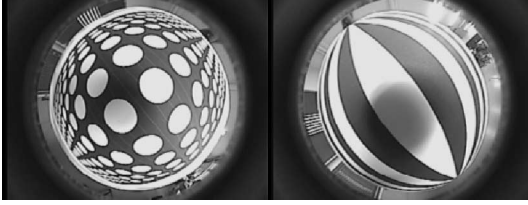


図 3 円形パターンとしま模様パターン  
Fig. 3 Left: Circle calibration pattern. Right: Stripe calibration pattern used in our method.

な円形パターンが用いられている．しかしながら図 3 左に示すように，魚眼カメラで撮影した画像上においては，円形パターンは画像中心から離れるにつれて急速に形状がつぶれ，また互いにつながってしまうために，すべての円パターンを検出することは容易ではない．そのため実際に検出できる円パターンは画像中心に近い，魚眼画像上で隣接パターンとの間がはっきりと認識できるものに限られてしまう．

校正用のパターンとしては直線もまたよく用いられている [3], [5], [9], [12]．駒形ら [24], [25] は平行直線パターンと球面投影モデルを用いた校正手法を提案しているが，本論文と比較して以下の違いがある．まず，レンズひずみを含む魚眼カメラの校正は数多くの未知数をもつ非線形連立方程式に対する最適解の探索により行われているが，数値計算による最適推定において局所解を避けるためには良い初期値を用いることが非常に重要である．しかし彼らの手法はパラメータの初期値にレンズの設計値を利用しているため，その初期値の良さは製造誤差に影響される上，設計値が不明なレンズの校正を行うことが困難である．レンズの放射ひずみのモデルとしては，彼らは文献 [26] の多項式モデルを用いているが，多項式の各係数の初期値の与え方が明確ではない．本論文では魚眼レンズの一般的な 4 種類の射影式のテイラー展開に基づいたモデルを提案している．そのため本手法では，放射ひずみをモデル化した多項式の各係数の初期値を，推定された基本パラメータの値を用いて，理想的な射影式のテイラー展開から決定することが可能である．また，彼らは校正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としているが，パターンの不鮮明さのために，検出したパターンの両端を除去しており，魚眼画像においてひずみが最も大きい視野境界付近に対応するデータ点が校正に用いられていない．本論文での提案手法では，魚眼画像の視野全体にわたって鮮

明に写り，パターンをロバストに検出することができるとしてしま模様パターンを用いることでこの問題を解決している．

### 3. 球面投影モデルと魚眼カメラひずみモデル

この章では，球面モデルに基づく球面画像と，本手法で用いるひずみモデルについて述べる．

#### 3.1 球面画像

図 1 (b) に示すように，空間に半径  $f$  の球と点  $P$  があるとき， $P$  と球の中心を結ぶ直線が球面と交わる点  $p$  を，点  $P$  の球面への投影点とする．球面画像とは，焦点を球の中心として，その周囲に見えている点すべてを球面上に投影することで得られる画像であり，ピンホールカメラモデルでの平面画像とは違って，球面画像は全天周視野を表現できる．本論文では，このような球面モデルに基づく投影によって得られた画像の全体または一部を指して単に球面画像と呼ぶことにする．

原点を球の中心においたカメラ座標系において，点  $P$  の座標が

$$\mathbf{M}_c = \begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

であるとき，この点の球面画像への投影点  $p$  の座標は，図 1 (b) に示すような投影光線の方向を表す二つの角度，天頂角  $\theta$  と方位角  $\phi$  を用いて

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} f \sin \theta \cos \phi & f \sin \theta \sin \phi & f \cos \theta \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

と書けるので，シーンの点  $P$  とその投影点  $p$  との関係は

$$\begin{aligned} \mathbf{m} &= \begin{bmatrix} f \sin \theta \cos \phi & f \sin \theta \sin \phi & f \cos \theta \end{bmatrix}^T \\ &= \frac{f}{\rho} \begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c \end{bmatrix}^T \quad (3) \\ \rho &= \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2} \end{aligned}$$

と表すことができる．ここで  $\lambda = f/\rho$  とおけば，

$$\mathbf{m} = \lambda \mathbf{M}_c \cong \mathbf{M}_c \quad (4)$$

が得られる．すなわち， $\mathbf{m}$  はスケールファクタを除いては  $\mathbf{M}_c$  に等しい． $f = 1$  とすれば，単位球への投影である正規化球面座標

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

が得られる．

### 3.2 魚眼カメラのひずみモデル

実際のレンズは製造過程で発生する誤差などの影響のために、その投影は理想的な射影式に正確には従わない。本論文では、[3]と同様に、カメラ校正において標準的に考慮されている3種類のひずみを取り扱う。

#### 3.2.1 放射方向歪曲収差

魚眼レンズの一般的な4種類の射影式は、投射角 $\theta$ に対して線形か、 $\theta$ の $\sin$ または $\tan$ 関数で表されており、 $\sin$ 関数、 $\tan$ 関数のテイラー展開は $\theta$ の奇数乗の項のみとなるため、理想的な射影式のテイラー展開

$$r = k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5 + \dots \quad (6)$$

をすべての射影方式に対する一般的な射影式として用いることにする。ここで、 $k_1, k_3, k_5, \dots$ はテイラー展開の各項の係数である。本論文では、このテイラー展開の5乗項までを用いた

$$r \approx k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5 \quad (7)$$

として近似する。この式は三つの内部パラメータ $k_1, k_3, k_5$ を用いて放射方向歪曲収差(radial distortion)と呼ばれる放射方向に沿うひずみをモデル化している。

#### 3.2.2 光軸点のずれ

実際のレンズの光軸は正確に画像中心を通らず、多少ずれている(shift of optical center)。撮影画像上での光軸点の位置を $c(x_0, y_0)$ とすると、画像上の点 $(x', y')$ の、画像平面座標系 $xy$ での座標値 $(x, y)$ は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' - x_0 \\ y' - y_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる。ここで $\alpha$ は撮影画像での単位距離当りの $x$ 方向、 $y$ 方向の画素数の比である。この画像座標系での位置 $p_i$ は、極座標形式では

$$\begin{aligned} r_i &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \phi_i &= \arctan(y, x) \end{aligned} \quad (9)$$

として表すことができる。

#### 3.2.3 接線方向歪曲収差

接線方向歪曲収差(decentering distortion)は光軸が画像平面に直交しないことに起因する、放射方向歪曲収差と垂直な方向に作用するひずみである。本手法では、このひずみを、[3]が用いているConradyのモデル[7]

$$\begin{aligned} \Delta T_x(p_i) &\approx P_1 r_i^2 (1 + 2 \cos^2 \phi_i) + 2P_2 r_i^2 \sin \phi_i \cos \phi_i \\ \Delta T_y(p_i) &\approx P_2 r_i^2 (1 + 2 \sin^2 \phi_i) + 2P_1 r_i^2 \sin \phi_i \cos \phi_i \end{aligned} \quad (10)$$

を極座標形式に書き直した式

$$\begin{aligned} \Delta T_r(p_i) &\approx 3P_1 r_i^2 \cos \phi_i + 3P_2 r_i^2 \sin \phi_i \\ \Delta T_\phi(p_i) &\approx -P_1 r_i \sin \phi_i + P_2 r_i \cos \phi_i \end{aligned} \quad (11)$$

で表す。

#### 3.2.4 完全なひずみモデル

上記の3種類のひずみをまとめた、本手法で用いる完全な魚眼レンズのひずみモデルは以下の式で表される。

$$\begin{aligned} k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5 &= r_i + \Delta T_r(p) \\ \phi &= \phi_i + \Delta T_\phi(p) \end{aligned} \quad (12)$$

校正により推定する内部パラメータは $(x_0, y_0, \alpha, k_1, k_3, k_5, P_1, P_2)$ である。

## 4. 基本パラメータの校正

この章では、魚眼カメラの内部パラメータのうち、レンズひずみを除いた基本的なパラメータの推定手法について述べる。魚眼カメラの校正手法の多くは魚眼画像上の視野の境界円(楕円)から基本パラメータの推定を行っている[1], [2], [23]。しかし、一般に魚眼画像上の視野境界は不鮮明であるため、この円パターンを検出して良い精度でパラメータを推定するのは容易ではない。我々は既に魚眼画像上で検出した消失点の幾何的性質を利用した基本内部パラメータ(光軸点位置 $c$ 及び焦点距離 $f$ )の推定法[13]を提案している。本論文では、この方法に推定するパラメータとしてアスペクト比 $\alpha$ を加えた手法により、基本パラメータの推定を行う。

魚眼カメラを用いてしま模様校正パターンを撮影すると、校正パターンのもつ平行な直線群は撮影画像上では1対の消失点をもつ曲線群として現れる。まず、撮影画像上において検出したそれぞれの直線の投影曲線のエッジに対して円錐曲線当てはめを行い、消失点対の撮影画像上での位置を、それらの円錐曲線の共通交点として推定する。画像上で消失点対を結ぶ線分は光軸点を通るので、2枚のパターン撮影画像を用いれば、光軸点位置 $c$ はそれぞれの消失点対を結んだ2本の線分の交点として推定することができる。光軸点位置が得られれば、魚眼画像上で検出した消失点対の位

置  $V_1(x_1, y_1)$ ,  $V_2(x_2, y_2)$  の像高が得られる．消失点対の像高  $r_1, r_2$  と入射角  $\theta_1, \theta_2$  の関係は，レンズの射影式を  $r = F_p(\theta)$  とすれば

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(\alpha x_1)^2 + y_1^2} = F_p(\theta_1) \\ r_2 &= \sqrt{(\alpha x_2)^2 + y_2^2} = F_p(\theta_2) \end{aligned} \quad (13)$$

と書ける．また，消失点は平行直線が無限遠で交わる点であるので，図 4 に示すように両消失点からのレンズへの入射光線の間の角度は 180 度である．

$$\theta_1 + \theta_2 = \pi \quad (14)$$

焦点距離とアスペクト比は式 (13), (14) をもとに推定する．

等距離射影方式の場合，消失点対の間の距離を求めれば  $f$  と  $\alpha$  を含む式

$$r_1 + r_2 = \sqrt{\alpha^2(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} = f\pi \quad (15)$$

が得られる．2 枚のパターン撮影画像上で検出した 2 組の消失点対に対する上式を連立方程式として解くことにより  $f$  と  $\alpha$  の値を推定することができる．等立体角射影方式の場合も同様である．

立体射影方式の場合は， $r_1/r_2$  から得られる

$$\theta_1/2 = \arctan \sqrt{r_1/r_2} \quad (16)$$

を式 (13) に代入することで得られる

$$f = r_1/2\sqrt{r_1/r_2} \quad (17)$$

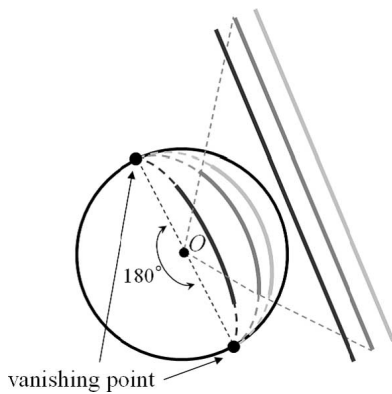


図 4 平行直線の消失点

Fig. 4 A pair of vanishing points of parallel lines. The angle made from two vanishing points and focal point  $O$  is 180 degrees.

を同様に連立方程式として解くことで  $f$  と  $\alpha$  の値の推定を行う．

正射影方式では原理上，表現できる入射角  $\theta$  の範囲が 90 度までに限定されるため，他の射影方式の場合と違い， $\theta_1$  または  $\theta_2$  が 90 度を超えると式 (14) を利用できない．そこで，正射影方式の場合は校正用パターン平面とレンズの光軸がなるべく垂直になるような姿勢でパターン撮影を行い，

$$r_1 \approx f \sin(\pi/2) = f \quad (18)$$

として近似することでパラメータの推定を行う必要がある．

図 7(b) に，等距離射影方式のレンズを用いた実験において検出した消失点位置を + マークで，推定した光軸点位置を × マークで，白い楕円によってその光軸点位置を中心とした半球状視野の推定範囲を示す．

## 5. レンズひずみを含む内部パラメータの校正

この章では，パターンの直線性を利用した魚眼カメラの校正のための目的関数と，推定されたパラメータの評価方法について述べる．

### 5.1 目的関数

図 5 に示すように，球面モデルではシーンの直線は大円の弧として投影される．本手法はこのことを利用し，魚眼カメラの内部パラメータの校正を行う．

大円の方程式は，大円の単位法線ベクトル

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

と，大円上の点の位置ベクトル

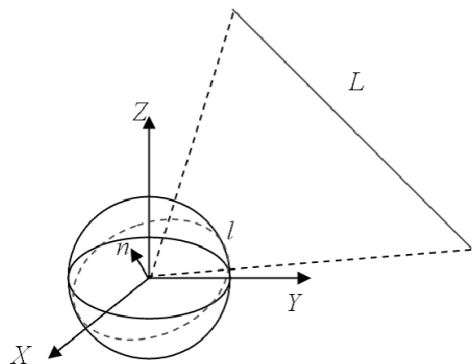


図 5 シーン直線の大円の弧への投影

Fig. 5 A scene straight line  $L$  is projected as a circular arc  $l$ , of a great circle onto a unit sphere.

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix}^T \quad (20)$$

を用いて

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{p} = n_x \sin \theta \cos \phi + n_y \sin \theta \sin \phi + n_z \cos \theta = 0 \quad (21)$$

と表される．本手法ではこの大円の方程式を用いた目的関数

$$\xi = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^{P_l} (\mathbf{n}_l \cdot \mathbf{p}_p)^2 \quad (22)$$

を校正に用いる．ここで， $L$  は観測直線の本数， $P_l$  は各直線上の点の数である．ある 1 組のパラメータ値が与えられたとき，観測直線上の点の球面上への投影座標  $\mathbf{p}_p$  は，式 (5) と式 (12) から算出することができるので，観測直線の投影大円の単位法線  $\mathbf{n}_l$  が与えられれば，この目的関数を計算することができる．

大円の法線はその大円上の 2 点の位置ベクトル  $\mathbf{p}_1$ ， $\mathbf{p}_2$  の外積として計算することができる．

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2}{\|\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2\|} \quad (23)$$

(ただし， $\mathbf{p}_1 \times \mathbf{p}_2 \neq 0$ )

本手法では，

$$\mathbf{n}_l = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{\mathbf{p}_{1k} \times \mathbf{p}_{2k}}{\|\mathbf{p}_{1k} \times \mathbf{p}_{2k}\|} \quad (24)$$

として法線ベクトルを推定し，目的関数の計算に用いる．ここで  $m$  は法線の計算に用いるデータ点対の数である．

### 5.2 パラメータ推定値の評価

カメラパラメータの真値は実際には知ることができないため，校正したパラメータ値をどのように評価するかは問題である．

格子状の校正パターンを用いた校正法では，ワールド座標が既知の制御点を撮影画像へ逆投影した位置とその点に対応する撮影画像上の特徴点の位置とのずれを計測する方法が評価方法としてよく用いられている．しかし，ワールド座標が既知でない線パターンを用いる本手法では，そのようなはっきりとした基準が存在しない．そこで，本論文では，校正したパラメータを用いて観測データから最適に推定した線と，実際の撮影画像上の線パターンとのずれを計測する．前述のよ

うに，シーンの直線は球面画像上に大円として投影される．この投影大円が乗る平面の単位法線を  $(a, b, c)$ ，観測点の座標を  $(x, y, z)$  とすると，単位法線ベクトルは以下の関数を最小化する最小二乗法により推定される．

$$\sum_i (ax_i + by_i + cz_i)^2 \quad (25)$$

$$a^2 + b^2 + c^2 = 1$$

この法線で定義される大円を，校正したカメラパラメータを用いて魚眼カメラの撮影画像上に逆投影する．撮影画像上の線パターンの観測点  $\mathbf{m}$  と，大円の逆投影曲線  $T$  との距離  $d(\mathbf{m}, T)$  を用いた誤差評価式は

$$\tau = \frac{1}{\sum_{l=1}^L P_l} \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^{P_l} d(\mathbf{m}_{p,l}, T_l) \quad (26)$$

となる．

## 6. 実験

実験に用いる魚眼カメラは，図 6 (b) に示すように SONY の HandyCam に魚眼コンバージョンレンズ Olympus FCON-02 (最大画角 185 度，等距離射影方式) を取り付けることで構成し，図 6 (a) に示すしま模様パターンを撮影した 2 枚の画像を用いて，この魚眼カメラの校正を行った．校正に用いた撮影画像を図 7 (a) に示す．撮影画像の解像度は 720×480 pixel である．まず，この 2 枚の撮影画像を用いて 4. に示した手法により，基本パラメータの推定を行った．図 7 (b) に，検出した消失点位置を + マークで，推定した光軸点位置を × マークで，白い楕円によってその光軸点位置を中心とした半球状視野の推定範囲を示す．次に，獲得した基本パラメータ値を初期値として

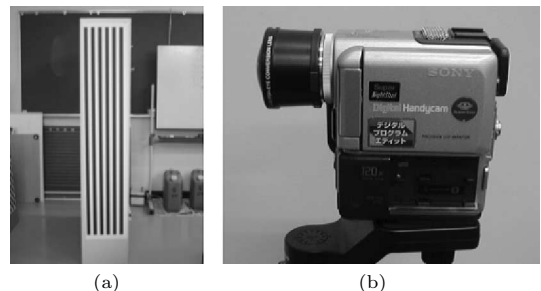


図 6 実験に用いた校正用パターンと魚眼カメラ  
Fig. 6 (a) A stripe pattern. (b) The fisheye camera to be calibrated.

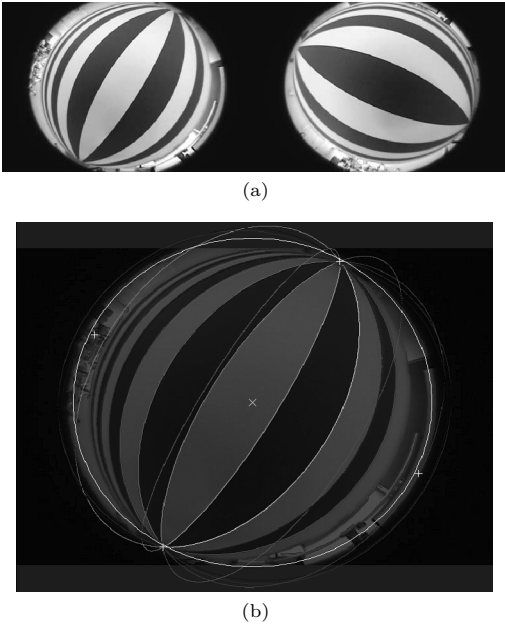


図 7 校正に用いたパターン撮影画像と基本パラメータ推定の様子

Fig. 7 (a) Two images of stripe pattern for calibration. (b) The estimated basic parameters where optical center is indicated as 'x' and the circle colored white corresponds to the hemispherical field of view.

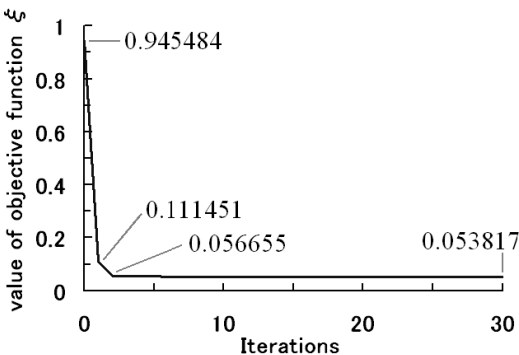


図 8 目的関数の推移

Fig. 8 Convergence of the objective function value.

用い ( $f$  は  $k_1$  の初期値に用いる), 残りのひずみパラメータの初期値を 0 とおいて, Levenberg-Marquardt 法により目的関数の最小化を行うことで, レンズひずみを含む内部パラメータの最終的な校正を行った. 目的関数の推移を図 8 に示す. 実際の観測データを用いて式 (24) により観測直線の投影大円の法線を推定する際には, 外積をとる 2 点が近すぎずに適当に大きな角をなす方が法線をロバストに推定できる. そこ

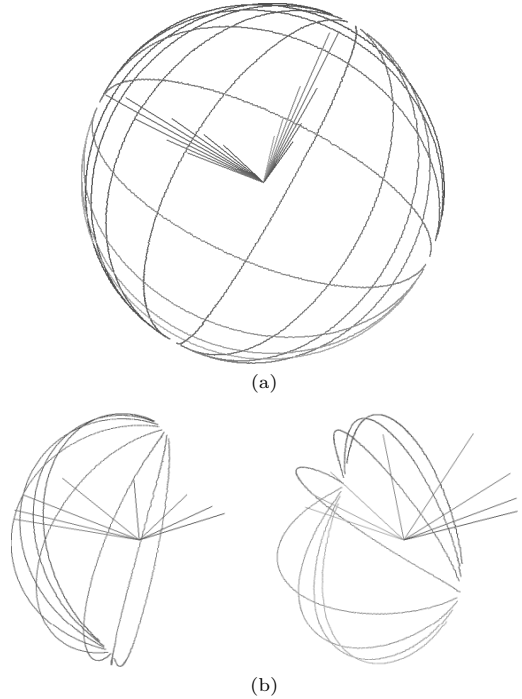
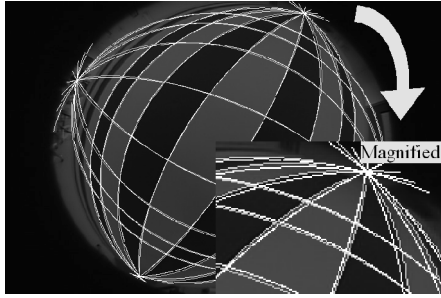


図 9 データに対して推定された法線ベクトル

Fig. 9 The estimated unit normal vectors from edge points. Normal direction is shown as line drawn from the center of unit sphere, colored with the same color as the corresponding edge points. (a) All edge points and estimated normals from two captured images. (b) Display from another angle. Data from each image is shown separately.

で実験では, 検出したパターン直線エッジが一方の端点  $p_1$  から他方の端点  $p_n$  までの  $n$  点  $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  であるとき, 法線推定に用いるエッジ点ペアとして  $\{(p_1, p_{n/2+1}), (p_2, p_{n/2+2}), \dots, (p_{n/2}, p_n)\}$  を用いた. 観測した直線エッジの球面上への投影である大円の弧状のデータ点群に対してそのようにして推定された法線ベクトルの様子を図 9 に示す.

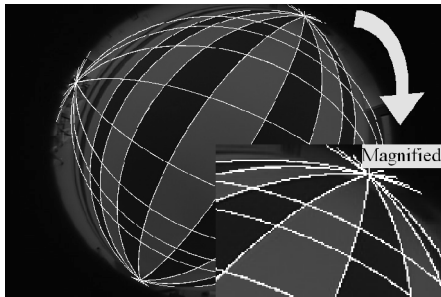
実験結果を視覚的に確認するために, 推定されたパラメータ値を用いて作成した画像を図 10 に示す. パラメータ初期値を用いて式 (25) により推定した大円を魚眼画像上に逆投影した結果を図 10 (a) に白線で示す. また, 同図 (b) にパラメータ初期値を用いてパターン撮影画像から作成した透視投影画像を示す. (c), (d) はレンズひずみを考慮した校正の結果得られた最終的なパラメータ値による同様の結果である. 最終的なパラメータによる逆投影画像 (c) では, パラメータ



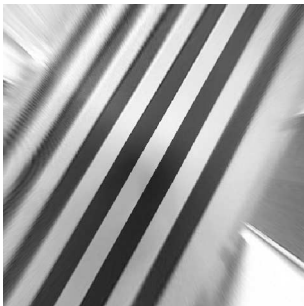
(a)



(b)



(c)



(d)

図 10 推定大円の逆投影と撮影画像の透視投影結果  
 Fig. 10 The back-projected scene straight line (a) and the sample of generated perspective image in terms of the initial parameters estimated from vanishing points (b). The corresponding final experimental result are shown in (c) and (d).

表 1 実験結果得られたカメラ内部パラメータ値  
 Table 1 The estimated parameter values.

	Initial value from vanishing points	Estimate by considering radial distortion	Final estimate by the full distortion model
$x_c$	356.358	357.501	357.765
$y_c$	232.667	233.256	231.055
$\alpha$	0.919857	0.913466	0.912560
$k_1$	158.444	144.082	148.783
$k_3$	0	18.0206	15.4199
$k_5$	0	-4.92029	-4.69688
$P_1$	0	0	$1.29856 \times 10^{-6}$
$P_2$	0	0	$-1.93208 \times 10^{-5}$
$\tau$	1.60522	0.381061	0.355139

初期値による (a) において特に視野の境界付近において見られた投影曲線と実際の線パターンとのずれが改善されている。また、(d) を (b) と比べると、直線パターンがより直線的に投影されている。

表 1 に実験結果得られたパラメータ値と、式 (26) による誤差評価値  $\tau$  の値を示す。左の列は本手法で初期値として用いた消失点の幾何的性質から推定したパラメータ値、中央の列は放射方向歪曲収差を考慮した（接線方向歪曲収差を扱わない）校正結果、右の列は完全なひずみモデルを用いた校正結果である。パラメータを用いた推定線と実際の直線パターンのエッジ点とのずれ  $\tau$  は、放射方向歪曲収差を考慮した結果において著しく減少し、接線方向歪曲収差を加えた完全なひずみモデルを用いた結果の  $\tau$  はほとんど変わっていない。放射方向のひずみに比べて接線方向のひずみが非常に小さくなるという結果は、他の研究で報告されている結果と一致している。

## 7. む す び

本論文では、半球以上の視野をもつ魚眼レンズの校正のための新しい手法を提案した。本提案手法の特徴は以下のとおりである。

- 校正パターンとしてしま模様パターンを用いる。線の検出は特徴点よりロバストに行うことができるため、校正に用いるデータ点の座標が正確になり、校正精度を向上させる。
- ピンホールカメラモデルに基づく従来の手法と比べると、球面モデルに基づく本手法は視野内の全情報を均一に表現でき、校正に用いることができる。本手法は様々な画角のカメラに適用することが可能である。
- 直線パターンを観測データとして利用するため、



撮影シーン内の直線を用いたセルフキャリブレーションが可能である。

将来の課題として、今後、校正を行った魚眼カメラを用いた仮想環境の構築などに取り組みたい。

## 文 献

- [1] Y. Xiong and K. Turkowski, "Creating image-based VR using a self-calibrating fisheye lens," Proc. CVPR, pp.237-243, 1997.
- [2] J. Kannala and S. Brandt, "A generic camera calibration method for fish-eye lenses," Proc. ICPR, pp.10-13, 2004.
- [3] R. Swaminathan and S.K. Nayar, "Nonmetric calibration of wide-angle lenses and polycameras," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.22, no.10, pp.1172-1178, 2000.
- [4] D.G. Aliga and I. Carlbom, "Plenoptic stitching: Scalable method for reconstructing 3D interactive walkthroughs," Proc. SIGGRAPH, pp.443-450, 2001.
- [5] D.C. Brown, "Close range camera calibration," Photogrammetric Engineering, vol.37, no.8, pp.855-866, 1971.
- [6] S.E. Chen, "QuickTime VR — An image-based approach to virtual environment navigation," Proc. SIGGRAPH '95, pp.22-38, 1995.
- [7] A. Conrady, "Decentering lens system," Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc., vol.79, pp.384-390, 1919.
- [8] P.E. Debevec, "Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography," Proc. SIGGRAPH '98, pp.189-198, 1998.
- [9] F. Devernay and O. Faugeras, "Straight lines have to be straight," Machine Vision and Applications, vol.13, no.1, pp.14-24, 2001.
- [10] O. Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision, The MIT Press, 1993.
- [11] J. Heikkila, "Geometric camera calibration using circular control points," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.22, no.10, pp.1066-1077, 2000.
- [12] S.B. Kang, "Semi-automatic methods for recovering radial distortion parameters from a single image," Technical Report Series CRL 97/3, Cambridge Research Laboratory, 1997.
- [13] S. Li, M. Nakano, and N. Chiba, "Acquisition of spherical image from a fish-eye conversion lens," Proc. IEEE VR Conference, pp.235-236, 2004.
- [14] S. Li and K. Fukumori, "Spherical stereo for construction of immersive VR environment," Proc. IEEE VR Conference, pp.217-222, 2005.
- [15] K. Miyamoto, "Fish eye lens," J. Optical Society of America, vol.54, no.8, pp.1060-1061, 1964.
- [16] K. Nishino and S.K. Nayar, "Eyes for relighting," Proc. SIGGRAPH 2004, pp.704-711, 2004.
- [17] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene," IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol.5, no.1, pp.1-12, 1999.
- [18] H.Y. Shum and R. Szeliski, "Construction and refinement of panoramic mosaics with global and local alignment," Proc. IEEE International Conference on Computer Vision, pp.953-958, 1998.
- [19] R. Szeliski, "Video mosaics for virtual environments," IEEE Comput. Graph. Appl., vol.16, no.2, pp.22-30, 1996.
- [20] C. Taylor, "VideoPlus: A method for capturing the structure and appearance of immersive environments," IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics, vol.8, no.2, pp.171-183, 2002.
- [21] 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. Robotics and Automation, vol.RA-3, no.4, pp.323-344, 1987.
- [22] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.22, no.11, pp.1330-1334, 2000.
- [23] H. Bakstein and T. Pajdla, "Calibration of a fish eye lens with field of view larger than 180," Proc. CVWW, pp.276-285, 2002.
- [24] 駒形英樹, 石井郁夫, 高橋 章, 今井博英, 牧野秀夫, "球面投影法による魚眼カメラ内部パラメータのキャリブレーション," 信学信越大, L1, pp.237-238, 2003.
- [25] 駒形英樹, 石井郁夫, 高橋 章, 若月大輔, "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," 信学論(D), vol.J89-D, no.1, pp.64-73, Jan. 2006.
- [26] J. Weng, P. Cohen, and M. Hernion, "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.14, no.10, pp.965-980, Oct. 1992.

(平成 17 年 7 月 19 日受付, 18 年 4 月 14 日再受付)



中野 誠士

平 13 岩手大・工・情報工学卒・平 15 同大大学院工学研究科修士課程了。現在、同大学院工学研究科博士課程在学中。



李 仕剛

1985年7月中国北京精華大学電機工程卒業．1987来日．1993大阪大学院博士課程了．同年大阪大学基礎工学部助手．広島市立大学情報科学部助教授を経て，現在，岩手大学工学部助教授．コンピュータビジョン，ロボットビジョン，映像メディア，複合現実などの研究に従事．博士（工学）．



千葉 則茂（正員）

昭50岩手大・工・電子卒．昭50～53（株）日本ビジネスコンサルタント（現（株）日立情報システムズ）勤務，昭59東北大学院博士課程情報工学専攻了（工博），以降，東北大学工学部助手，仙台電波高専情報工学科助教授，岩手大学工学部情報工学科助教授を経て，平3同教授．コンピュータグラフィックスに関する研究に従事．情報処理学会，IEEE，ACM等各会員．