

球体を用いた魚眼カメラの内部パラメータ校正

奧津 良太 $^{\dagger a)}$ 专林 賢司 $^{\dagger b)}$ 梅田 和昇 †

Calibration of Intrinsic Parameters of a Fish-Eye Camera Using a Sphere

Ryota OKUTSU^{†a)}, Kenji TERABAYASHI^{†b)}, and Kazunori UMEDA[†]

あらまし 本論文では,高精度かつ簡易な魚眼カメラの内部パラメータ校正手法の構築を目指し,球体を校正 パターンとして用いる手法を提案する.球体の輪郭は真円を描くため,この既知形状を校正パターンとして利用 する.本提案手法では,球体輪郭上の観測点群を用い,球面への投影を考える球面モデルに基づく幾何拘束から 最適化を行うことにより,内部パラメータを校正する.このとき,適当に配置された魚眼画像上の球体から,画 像中心部と周辺部の情報を同時に扱うことができるため,ひずみの大きい視界周辺部においても精度向上が期待 できる.また,魚眼画像上の球体輪郭は特徴点として鮮明に検出できる.一方,球体はありふれた物体であり, 校正パターンとしての利用方法は単に撮像するのみである.また,球体の大きさや位置をパラメータとして使用 する必要がないため,簡易な手法といえる.内部パラメータ推定実験及び視覚的な精度評価を通して,本提案手 法の有用性を示す.

キーワード 魚眼カメラ,カメラ校正,内部パラメータ,球体

1. まえがき

魚眼カメラは,外界情報を取得するセンサとして広 く利用されている.このカメラは超広角であり視野角 180度程度をもつため,一度に広範囲の外界情報を取 得できる.この点は,カメラ台数やコストの削減等に つながるため,自動車の視界補助システムや監視用途 等の様々なセンサシステムにおいて有効である[1],[2].

カメラを計測に用いる場合,校正を行い,カメラの 内部・外部パラメータを取得する必要がある.特に魚 眼カメラは特有のひずみを有するため,内部パラメー タの校正が重要である.魚眼カメラは,通常のピン ホールカメラと射影モデルや視野角の点で大きく異な り,ひずみの大きい視界周辺部を考慮するには,超広 角な視界全体の情報から校正を行う必要がある.この 理由により,魚眼カメラに対してピンホールカメラの 校正手法をそのまま適用することはできない.しかし, ピンホールカメラの校正[3],[4] に関しては多くの手法

† 中央大学大学院理工学研究科, 東京都

が提案され,実用的な手法が存在するのに比べると, 魚眼カメラの校正に関しては様々な研究が行われてい るのが現状である.

カメラの校正では,既知である形状やパターンを用 いる手法が多く提案されており,魚眼カメラにおいて も,直線や正方格子といった既知パターンを用いる校 正手法が研究されている.この既知パターンには,平 面パターンと立体的なパターンが存在する.

円形や直線等を等間隔に配置した平面パターンを用 いた手法が提案されている[5]~[10].これらの手法で は、平面上の円形や直線を特徴として検出し、既知パ ターンとして利用することにより、校正を行っている. しかし、円形パターンを用いた校正手法[5],[6]では, ひずみが大きい魚眼画像の周辺部分において特徴形状 である円形がつぶれ、その検出が容易ではない.直線 パターンを用いた校正手法[7]~[10]においても同様の 現象が起こる場合がある.また、魚眼カメラの視界の 広角域に配置された直線は、画像の周辺部に沿うよう に位置するため、ひずみの大きい画像周辺部の情報が 校正精度に影響を与える場合がある.そのため、校正 パターンの配置を考慮する必要がある.

一方,立体的なパターンとして,円筒内部に張った 格子パターンを用いた手法が提案されている[11].こ

Faculty of Science and Engineering, Chuo University, Tokyo, 112–8551 Japan

a) E-mail: okutsu@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

b) E-mail: terabayashi@mech.chuo-u.ac.jp



図 1 魚眼画像上の球体と検出された輪郭 Fig.1 A sphere captured by a fish-eye camera and detected contour.

の手法は,円筒内部の格子パターンを検出し,実空間 と対応づけることにより校正を行った.この校正手法 は,魚眼カメラの視野角である180度以上を覆うこと ができ,視界全体の情報を校正に用いることができる. しかし,円筒の中心軸とカメラの光軸を合わせる必要 があり,校正は容易ではない.

以上より,魚眼カメラの校正において,視界全体に 対してより高精度な手法の構築が必要である.更に, 実用化を考慮する上では,魚眼レンズの個体差やレン ズ交換時の再校正などに対応する必要があり,簡易な 手法が望まれる.

本論文では,高精度かつ簡易な魚眼カメラの内部パ ラメータ校正手法の構築を目指し,球体を校正パター ンとして用いる手法を提案する.球体の輪郭は真円を 描くため,この既知形状を校正パターンとして利用す る.図1に示すように,本提案手法では,適当に配置 された魚眼画像上の球体から,画像中心部と周辺部の 特徴点を同時に扱うことできる.これにより,画像全 体の情報を校正に用いることができ,ひずみの大きい 視界周辺部においても精度向上が期待できる.また, 魚眼画像上の球体輪郭は特徴点として鮮明に検出でき る.一方,球体はありふれた物体であり,校正パター ンとしての利用方法は単に撮像するのみである.また, 球体の大きさや位置をパラメータとして使用する必要 がないため,簡易な手法といえる.

カメラ校正に球体を用いた手法として, ピンホール カメラに対する校正は従来から研究されている[12]. この手法は,球体輪郭の真円を利用し,ピンホールカ メラの校正を行った.ピンホールカメラモデルに基づ く画像平面(透視投影画像)への投影では,球体輪郭 の投影形状は楕円となる.よって,この楕円と球体輪 郭の観測点群との誤差を最小化することで, 内部パラ メータを推定できる.しかし,魚眼カメラはピンホー ルカメラと射影方式が異なるため,魚眼画像上の球体 輪郭は非線形にひずみ、画像上の輪郭と楕円とは形 状にずれが存在する.また,魚眼カメラの投影をピン ホールカメラモデルで考える場合,視界の広角域にお ける情報を精度良く扱うことが難しく,180度以上の 視野角においては原理的に投影を表現することができ ない.一方,このような球体を用いた手法において, 魚眼カメラの校正手法は見当たらない.

本研究では,魚眼カメラの投影において,あるシー ン点がカメラの光学中心を中心とする球面へ投影され る球面モデルを考える.球面モデルは,全天周の情報 を表現できるため,魚眼カメラの視界全体の情報を扱 える.ここで,球面モデルにおける球体輪郭の投影を 考えると,その投影形状は真円である.よって,この 真円と球体輪郭の観測点群との誤差を最小化すること で,魚眼カメラの内部パラメータを推定できる.本提 案手法は,非線形性をもつ魚眼カメラモデルに対して 適用できる.

本提案手法を用いた魚眼カメラの内部パラメータ推 定実験及び魚眼画像のひずみ補正による精度評価を通 して,簡易な手法で精度の良い校正が行えることを示 す.これにより,本提案手法の有用性を示す.

本論文の構成は以下のとおりである.2.では魚眼カ メラの射影モデル,3.では球体を用いた内部パラメー タ校正,4.では内部パラメータ推定実験,5.では本 論文のまとめを述べる.

2. 魚眼カメラの射影モデル

カメラの校正では,魚眼カメラの射影モデルに基づ いたパラメータを推定する.ここで,魚眼カメラの様々 な設計や製造誤差等が考慮された,汎用的に使用でき る魚眼カメラモデルが必要である.本研究において適 用した,汎用的な魚眼カメラモデルについて述べる.
 2.1 射影方式

ー般のピンホールカメラのモデルである透視投影モ デルは,シーンからレンズへの投射線がレンズの光軸 となす角 θ と,画像上の像高(射影点の光軸からの距 離) r_p [pixel]によって次式で表せる.

$$r_p = \delta \tan \theta$$
 (透視投影モデル) (1)

一方 , 魚眼レンズの射影方式は , 設計によって異なり , 像高 *r_f* の代表的なモデルは以下の四つである .

 $r_f = \delta \theta$ (等距離射影) (2)

 $r_f = \delta \sin \theta (正射影)$ (3)

 $r_f = 2\delta \tan(\theta/2)$ (立体射影) (4)

$$r_f = 2\delta \sin(\theta/2)$$
 (等立体角射影) (5)

$$\delta = f/w, f$$
: 焦点距離 $[mm], w$: 画素サイズ $[mm]$

2.2 魚眼カメラモデル

魚眼レンズは,式(2)~(5)のように様々な射影方式 が存在する.魚眼レンズがもつひずみは,基本的には 設計の射影方式に従うが,製造過程で生じる誤差から 接線方向歪曲収差や光軸ずれの影響を受ける.そこで, 本研究では中野ら[10]の報告に従い,放射方向歪曲収 差,光軸点位置,接線方向歪曲収差をモデル化し,汎 用的な魚眼カメラモデルを構築する.

2.2.1 放射方向歪曲収差

ー般的な魚眼レンズの射影方式は,式(2)~(5)で表 される.理想的なこれらの射影方式は,テイラー展開 により次式で一様に表せる.

$$r_f = k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5 + \cdots \tag{6}$$

ここで, *k*₁, *k*₃, *k*₅, … 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 を用いて

$$r_f \approx k_1 \theta + k_3 \theta^3 + k_5 \theta^5 \tag{7}$$

と近似した式を魚眼レンズの射影方式として用いる. この式は放射方向に沿うひずみである放射方向歪曲収 差(radial distortion)を表現している.

2.2.2 光軸点のずれ

実際のレンズの光軸は,正確には画像中心を通らない (shift of optical center).魚眼画像上のある点の位置を $m_f = [u_f \ v_f]^{\top}$,魚眼画像上の光軸点の位置を

 $m{c} = [c_u \; c_v]^ op$ とする.このとき, $m{c}$ を原点とした座標 系における位置 $m{m_f}'$ と $m{m_f}$ の関係は,

$$\boldsymbol{m}_{f}^{'} = \begin{bmatrix} u_{f}^{'} \\ v_{f}^{'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{f} - c_{u} \\ v_{f} - c_{v} \end{bmatrix}$$

$$\tag{8}$$

である.ここで, γ は u_f 方向, v_f 方向の画素サイズの比である.本論文では,一般的なカメラの CCD の 各画素が正方格子であることから, $\gamma = 1$ とする.画像位置 $m_f^{'}$ は,極座標形式では次式で表せる.

$$r_{f} = \sqrt{u_{f}'^{2} + v_{f}'^{2}}$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{v_{f}'}{u_{f}'}\right)$$
(9)

ここで, ϕ は, u_f 方向を基準とした方位角である.

2.2.3 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より生じる.このひず みは, Swaminathan [13] が用いている Conrady のモ デル[14] により, u, v 方向の接線方向歪曲収差 ∇T_u , ∇T_v は,二つの接線方向歪曲収差パラメータ D_1, D_2 を用いて

$$\nabla T_u \approx D_1 r_f^2 (1 + 2\cos^2 \phi) + 2D_2 r_f^2 \sin \phi \cos \phi$$
$$\nabla T_v \approx D_2 r_f^2 (1 + 2\sin^2 \phi) + 2D_1 r_f^2 \sin \phi \cos \phi$$
(10)

と表せる.これを,式 (9) と同様に極座標形式に変換 すると,半径方向,方位角方向の接線方向歪曲収差 $\nabla T_r, \nabla T_o$ は,次式で表せる.

$$\nabla T_r \approx 3D_1 r_f^2 \cos \phi + 3D_2 r_f^2 \sin \phi$$

$$\nabla T_\phi \approx -D_1 r_f \sin \phi + D_2 r_f \cos \phi$$
(11)

2.2.4 魚眼カメラの内部パラメータ

校正に用いる最終的な魚眼カメラモデルは次式で表 せる.

$$r_f + \nabla T_r = k_1 \theta + k_3 \theta^3 + k_5 \theta^5$$

$$\phi' = \phi + \nabla T_\phi$$
(12)

よって,校正する魚眼カメラの内部パラメータは

$$\mathbf{I} = [k_1 \ k_3 \ k_5 \ c_u \ c_v \ D_1 \ D_2]^\top$$
(13)

2647

である.

3. 球体を用いた内部パラメータ校正

本論文では,球体を用いた魚眼カメラの内部パラ メータ校正手法を提案する.球体の輪郭は真円を描く ため,これを校正パターンとして利用できる.本提案 手法では,球体輪郭上の観測点群を用い,球面への投 影を考える球面モデルに基づく幾何拘束から最適化を 行うことにより,内部パラメータを校正する.これに より,非線形性をもつ魚眼カメラモデルに対しての校 正が可能である.更に,簡易な作業で取得できる2点 間の既知角度による制約条件を付加し,安定かつ高精 度な最適化による内部パラメータ推定を行う.一方, 最適化には適切な初期値が必要であるため,光軸点位 置を初期推定する手法を提案する.

3.1 内部パラメータの推定手法

本提案手法では,球面モデルに基づく幾何拘束から 評価関数を決定し,最適化により魚眼カメラの内部パ ラメータを推定する.

3.1.1 球面モデルに基づく幾何拘束

投影面上の球体輪郭の観測点群に対する真円度を評価するため,幾何拘束をたてる必要がある.このとき, 井上ら[12]が考えているピンホールカメラモデルによる平面への投影では,魚眼カメラの投影を表現することは難しい.そこで,本論文では,図2に示すように, あるシーン点がカメラの光学中心を中心とする球面へ





投影される球面モデルを考える.球面モデルでは,全 天周の投影を表現できるため,魚眼カメラの視界全体 の情報を扱える.また,式(12)のような非線形性を もつ魚眼カメラモデルを扱うことが可能である.

図 2 (a) に示すシーン点 *P* の単位位置ベクトルは, 球面モデルの投射角 *θ* と方位角 *φ* により次式で表せる.

$$\boldsymbol{s} = \begin{bmatrix} \sin\theta\cos\phi & \cos\theta & \sin\theta\sin\phi \end{bmatrix}^{\top} \quad (14)$$

図 2(b) に示すように,シーン球体の輪郭が投影された場合,これらの観測点群の形状は理想的には真円である.よって,球面モデル上の観測点群の真円度を評価することで,最適な内部パラメータを推定できる.

3.1.2 真円あてはめ

単位球面モデル上の点群に対し, Gray らの方法 [15] を用いて真円あてはめを行い, 真円度を評価する.

単位球面 ||*a*|| = 1 上において,中心 *x*(||*x*|| = 1), 角度半径 μ(0 < μ < π) である真円を考える.この真 円は単位球面と平面の交線として次式で得られる.

$$\boldsymbol{x}^{\top}\boldsymbol{a} = \cos\mu \tag{15}$$

単位球面上の m 個のデータ点(ある球体から観 測した点)を $a_i(i = 1, \dots, m)$ とする.このとき, $\|a_i\| = 1$ であり, $a_i \ge x \ge 0$ 角度を $\psi_i \ge 0$ すると,次 式が成り立つ.

$$\boldsymbol{x}^{\top}\boldsymbol{a}_{i} = \cos\psi_{i} \tag{16}$$

ここで,すべてのデータ点 a_i が同一の真円上に誤差なく存在する場合, $\psi_i = \mu$ が成り立つ.よって,角度半径の誤差である

$$e_i = \mu - \psi_i \tag{17}$$

の二乗和である次の評価関数

$$J = \sum_{i=1}^{m} e_i^2 \tag{18}$$

を最小化する真円パラメータ x, µ を推定する. なお, 非線形関数 Jの最小化にはニュートン法を用いる.

3.1.3 評価関数

図 2(b) に示すように, ある球体の輪郭が投影され た観測点を考える.同様に複数の観測点を取得するこ とにより, 3.1.2 で示した単位球面における真円あて はめが適用できる.更に, このような球体の投影を複



図 3 制約条件として用いる既知角度 Fig. 3 A given angle used as constraints.

数回行う.各球体の投影に対して真円あてはめを行う と,式(17),(18)により,内部パラメータの最適化の ための評価関数は次式となる.

$$\xi = \sum_{n=1}^{N} \sum_{i=1}^{P_n} (e_{ni}/\mu_n)^2$$

$$e_{ni} = \mu_n - \psi_i$$
(19)

ここで, N は球体の個数, P_n は n 個目の球体輪郭上の特徴点数である.また,球面モデルにおける球体の大きさのばらつきを考慮し, n 個目の球体における真円の半径角度 μ_n で除する.この評価関数を最小化する内部パラメータ I を求める.

観測点は魚眼画像座標系から球面画像座標系へ逆投 影する必要がある.魚眼画像座標系において,観測点 $m_{fi} = [u_{fi} v_{fi}]^{\top}$ と与えられたとき,式(12)から非 線形方程式の解として投射角 θ を求める.この解法に はBrent法[16]を用いる.次に,求まった θ を式(14) に代入することで,球面モデル上の単位位置ベクトル s_i を求めることができる.

3.2 制約条件

式(19)に示す評価関数において,非線形な魚眼カ メラモデルを扱うため,最適化の結果が収束しないこ とや局所解に陥ることが問題である.真円度のみの評 価では,像高 rf のスケールが実際と異なる場合でも 式(19)の評価関数が小さくなることがあり,像高 rf のスケールが小さく魚眼画像が光軸中心に向かってつ ぶれるような局所解が存在する.そこで本論文では, 任意の2点間の角度を既知として用いることにより, 最適化に対して制約条件を付加し,この問題を解決す る.これにより,簡易な作業で安定かつ高精度な最適 化によるパラメータ推定を行うことができる.

制約条件として用いる 2 点間の既知角度を図 3 に 示す.ここでは,既知である角度を *π* [rad] としてい る.世界座標上に配置された 2 点を魚眼カメラを用い



図4 元軸点位直の初期推定の構态図 Fig.4 Initial estimation of optical center.

て撮像する.このとき,カメラ中心と2点間の角度が 既知となるように設定する.この2点は球面モデル 上へ投影され,その座標位置は式(12),(14)より算 出できる.ここで,球面モデルにおける2点間の角度 は,設定した既知角度と同値である.これが成り立つ ことを制約条件とし,内部パラメータの最適化に適用 する.なお,本論文における既知角度は,設置作業が 簡易である π [rad] としたが,他の角度でも適用でき る.よって,2点間の角度が既知であれば,一般シー ンにおける任意の2点を使用することも可能である. また,この既知角度を手動により計測した場合,設置 誤差が生じるが,十分遠方に配置された2点を用いる ことによってこの誤差は無視できる.

本論文では,制約条件付最適化手法を適用する.球 面モデルにおける2点A,B間の角度 $\theta_{AB} = \pi [rad]$ の場合, $g_c = 0$ となる制約条件は次式で表せる.

$$g_c = |\pi - \theta_{\rm AB}| \tag{20}$$

ここで制約条件を付加すると,式(19)に示す評価関数は最終的に次式となる.

$$\xi = \sum_{n=1}^{N} \sum_{i=1}^{P_n} (e_{ni}/\mu_n)^2 + \lambda g_c$$

$$e_{ni} = \mu_n - \psi_i$$
(21)

この評価関数を最小化する内部パラメータ *I* を求める. なお,非線形関数 *ξ* の最小化には Gauss-Newton 法を用いる.

3.3 光軸点位置の初期推定

内部パラメータの最適化において,適切な初期値を 使用することが重要である.ここでは,最適化の初期 値として用いるための光軸点位置の推定手法を示す.

光軸点位置の初期推定の概念図を図4に示す.図1 に示すように,魚眼画像上での球体は楕円のようにひ ずむ.ここで,光軸中心方向への球体のひずみが最大 である.よって,魚眼画像上での球体の最大ひずみ方 向を求めることにより,光軸中心方向を算出できる.

球体の最大ひずみ方向は,魚眼画像上の球体領域へ の主成分分析により求める.ここで,取得した複数球 体の第2主成分の交点が光軸中心である.この交点を 求めるとき,実際には誤差をもつため,複数の第2主 成分は正確に一点で交わるとは限らない.そこで本論 文では,ロバストな最適化手法である RANSAC [17] を適用した最小二乗法により交点を算出する.

4. 内部パラメータ推定実験

4.1 実験内容

本提案手法を用いて魚眼カメラの内部パラメータの 推定を行い,魚眼カメラモデルの違いによる検討及び 校正精度の評価を行った.

精度評価のため,推定された内部パラメータを用い て魚眼画像を補正し,透視投影画像へ変換した.補正 画像のひずみから,推定精度を評価できる.一方,魚 眼カメラの校正精度の評価において,視界全体におい て高精度であることを確認する必要がある.生成した 透視投影画像の撮像範囲は,設定する焦点距離を用い て算出できる.

本実験において使用した校正パターンと魚眼カメラ を図 5 に示す.使用した球体はプラスチック製のボー ルであり,高精度な真円度をもつものではない.ま た,CCD カメラは PointGreyResearch 社の Dragonfly2,魚眼レンズは SPACE 社の TV1634M を用いた. TV1634M の射影方式は正射影,最大画角は 180 [deg] である.また,画像サイズは,512 [pixel]×384 [pixel] である.

なお,球体は図1のように撮影及び輪郭抽出し ており,校正に利用した球体の数は N = 40 で 分布が偏らないようにし,一つの球から輪郭点は





(a) A sphere
 (b) The fish-eye camera
 図 5 校正用の球体と魚眼カメラ
 Fig. 5 Calibration setup.

 $P_n = 40 (n = 1, \dots, N)$ 点で, Canny のエッジ検出 によってサブピクセル精度で検出した.また,制約条 件の角度制約は180 [deg] とし,そのための2点は,遠 くに配置した球体が魚眼画像の縁に映り込むように, カメラを光軸及び球体方向と垂直に180 [deg] 回転さ せ撮影した2枚の魚眼画像において,球体をマニュア ルで指定した.

4.2 魚眼カメラモデルの違いによる評価

2.2 で示した魚眼カメラモデルを用いて内部パラ メータの推定を行った.推定結果を表1に示す.Initial Value は光軸点位置の初期推定による値を用いている. また,Fish-Eye Model 5D は放射方向歪曲収差のみ を考慮したモデル,Full Fish-Eye Model は更に接線 方向歪曲収差を考慮した完全なモデルである.

表 1 に示す評価関数 ξ の値を比較すると, Initial Value の場合に対し,推定を行った二つのモデルの場合 の方が,値が小さい.このことから,球面モデルへ投影 された球体輪郭の観測点群に対する真円度が向上して いることが分かり,内部パラメータが真値に近づいた

表 1 内部パラメータの推定結果 Table 1 The estimated intrinsic parameters and values of evaluation function ξ .

	Initial Value	Fish-Eye Model	Full Fish-Eye
		5D	Model
k_1	162.97	171.46	172.53
k_3	0	-0.80	-1.07
k_5	0	-1.25	-1.25
c_u	9.66	6.23	8.97
c_v	6.72	9.55	10.21
D_1	0	0	9.93×10^{-6}
D_2	0	0	4.12×10^{-6}
ξ	0.47151	0.02827	0.02823



図 6 補正用の魚眼画像:格子パターン Fig. 6 The fish-eye image for correction : Grid pattern.



(a) Initial Value



(b) Fish-Eye Model 5D



(c) Full Fish-Eye Model

- 図 7 内部パラメータ推定値を用いて変換された透視投影 画像:格子パターン
- Fig. 7 Pinhole images generated using the estimated intrinsic parameters : Grid pattern.

と考えられる.Fish-Eye Model 5D と Full Fish-Eye Model の値を比較すると,Full Fish-Eye Model の方 が評価関数の値は小さいが,その差は小さい.この理 由として,一般的に接線方向歪曲収差は小さいことや 接線方向歪曲収差による観測点群の真円度へ与える影

響が小さいことが考えられる.

表1の推定された内部パラメータを用いて魚眼画 像を補正し,透視投影画像を生成した.格子パターン を撮像した補正用の魚眼画像を図6に示す.内部パラ メータが真値に近ければ,魚眼画像では曲線になって いる格子が,補正画像では直線になる.生成した透視 投影画像を図7に示す.これは,約165[deg]の画角 における補正結果を示している.

図7において、図7(a)では、魚眼カメラモデルが 不十分であり、放射方向歪曲収差が推定されていない ため、レンズひずみがうまく補正されていない.更に 光軸の傾きやずれが影響し、画像全体が傾いたような 透視投影画像が生成されている.図7(b),(c)では、 内部パラメータが精度良く推定されているため、視界 の広範囲にわたってひずみが補正され、格子が正しく 直線になっていることが分かる.更に図7(b)と(c) とを比較すると、画像周辺部で違いが見られ、格子パ ターンのもつ平行性の観点から、Full Fish-Eye Model を用いた場合の方が補正精度が良いことが分かる.更 に、図7(c)において、図6に示す魚眼画像では格子 がつぶれているような広角域に対し、精度良くひずみ が補正されていることが確認できる.

以上より, Full Fish-Eye Model である式 (12) によ り,魚眼カメラがより正しくモデル化されていると考 えることができ,視界全体において魚眼カメラの内部 パラメータを精度良く校正することができた.

4.3 実環境シーンを撮像した魚眼画像の補正

推定内部パラメータを用いて,実環境シーンを撮像 した魚眼画像を補正し,透視投影画像を生成した.

建物群や廊下といった屋外・屋内環境を撮像した魚 眼画像と生成した透視投影画像を図8,図9に示す. 補正のために使用した内部パラメータは,表1におけるFull Fish-Eye Modelの場合の推定値である.

図 8, 図 9 に示すように,魚眼画像上では曲線と なっている建物のラインや廊下の形状が,透視投影画 像上では直線となっている.以上より,実環境シーン を撮像した魚眼画像に対して精度良く補正を行えてい ることが分かり,本提案手法の有用性を確認できる.

本章では,正射影モデルの魚眼レンズを用いて実験 を行ったが,式(2),(4),(5)に示した代表的な他の 射影方式についても,これらのテイラー展開が式(6) の形式によって記述できることから,理論的には本手 法の適応が可能であると考えられる.



(a) Fish-eye image



(b) Pinhole image 図 8 魚眼画像と透視投影画像:屋外環境 Fig. 8 A Fish-eye image and the generated pinhole image : Outdoor environment.

5. む す び

本論文では,魚眼カメラの内部パラメータ校正手法 として,球体を用いた校正手法を提案した.本提案手 法を用い,内部パラメータの推定実験を行った.また, この推定値を用いて魚眼画像のひずみを補正し,生成 した透視投影画像により視覚的に精度評価を行った. 本実験を通し,球体を用いて魚眼カメラの内部パラ メータを精度良く校正できることを示し,非線形性を もつ汎用的な魚眼カメラモデルに対しての校正が可能 であることを確認した.また,簡易に校正実験が行え ることを確認した.以上より,球体を用いることによ り,簡易な魚眼カメラの内部パラメータ校正手法を構 築し,精度良く校正できることを確認した.これによ り,本提案手法の有用性を示した.

今後の展望として,制約条件に利用する2点のサブ ピクセル精度検出,定量的な精度評価により他の手法



(a) Fish-eye image



(b) Pinhole image 図 9 魚眼画像と透視投影画像:屋内環境

Fig. 9 A Fish-eye image and the generated pinhole image : Indoor environment.

との精度比較を行う.

文 献

- [1] 鈴木政康,知野見聡,高野照久,"俯瞰ビューシステムの開発",自動車技術学会学術講演会前刷集,vol.116, no.07, pp.17-22, 2007.
- [2] R. Okutsu, K. Terabayashi, Y. Aragaki, N. Shimomura, and K. Umeda, "Generation of overhead view images by estimating intrinsic and extrinsic camera parameters of multiple fish-eye cameras," Proc. IAPR Conf. MVA, 2009.
- [3] 松山隆司,久野義徳,井宮 淳,コンピュータービジョン, 新技術コミュニケーションズ,1999.
- [4] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.22, no.11, pp.1330–1334, 2000.
- [5] J. Kannala and S.S. Brandt, "A generic camera model and calibration method for conventional, wideangle, and fish-eye lenses," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol.28, no.8, pp.1335–1340, 2006.
- [6] J. Heikkila, "Geometric camera calibration using circular control points," IEEE Trans. Pattern Anal.

Mach. Intell., vol.22, no.10, pp.1066-1077, 2000.

- [7] F. Devernay and O. Faugeras, "Straight lines have to be straight," Machine Vision and Applications, vol.13, no.1, pp.14–24, 2001.
- [9] 中野誠士,李 仕剛,千葉則茂,"球面画像獲得のための 魚眼カメラの校正",信学論(D-II),vol.J88-D-II, no.9, pp.1847-1856, Sept. 2005.
- [10] 中野誠士,李 仕剛,千葉則茂,"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",信学論(D), vol.J90-D, no.1, pp.73-82, Jan. 2007.
- [11] H. Bakstein and T. Pajdla, "Panoramic mosaicing with a 180° field of view lens," IEEE Proc. OM-NIVIS'02, 2002.
- [12] 井上雄輝,寺本博久,徐 剛,"複数の球体画像による カメラ内部変数と外部変数の最適推定",信学論(D-II), vol.J87-D-II, no.5, pp.1071–1082, May 2004.
- [13] 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.
- [14] A. Conrady, "Decentering lens system," Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc., vol.79, pp.384– 390, 1919.
- [15] N.H. Gray, P.A. Geiser, and J.R. Geiser, "On the least-squares fit of small and great circles to spherically projected orientation data," Mathematical Geology, vol.12, no.3, 1980.
- [16] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, Numerical Recipes in C, 技術評論社, 1993.
- [17] M.A. Fischler and R.C. Bolles, "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Commun. ACM, vol.24, pp.381–395, 1981.

(平成 22 年 4 月 1 日受付, 7 月 21 日再受付)



寺林 賢司

2002 北大・工・システム工学卒.2004 同大大学院システム情報工学専攻修士課程 了.2008 東京大学大学院工学系研究科精 密機械工学専攻博士課程了,博士(工学). 同年,中央大学理工学部精密機械工学科助 教,現在に至る.ヒューマンインタフェー

ス,ロボットビジョン等の研究に従事.精密工学会,日本ロボッ ト学会,日本機械学会,IEEE 等各会員.



梅田 和昇 (正員)

1989 東大・工・精密機械工学卒.1994 同大大学院精密機械工学専攻博士課程了, 博士(工学).同年中央大学理工学部精密 機械工学科専任講師,1998 より同助教授, 2006 より同教授,現在に至る.ロボットビ ジョン,距離画像処理,ヒューマン・イン

タフェースの研究に従事.画像の認識・理解シンポジウム 2004 MIRU 長尾賞受賞.日本ロボット学会,精密工学会,日本機械 学会,IEEE 等各会員.



奥津 良太

2008 中大・理工・精密機械工学卒.現 在,同大大学院理工学研究科精密工学専攻 博士課程前期課程在学中.