

球体を用いた魚眼カメラの内部パラメータ校正

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

奥津 良太 寺林 賢司 梅田 和昇

Ryota Okutsu, Kenji Terabayashi, Kazunori Umeda

中央大学

Chuo University

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

Abstract

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、歪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。さらに、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無いため、簡易な手法といえる。内部パラメータ推定実験及び精度評価を通して、本提案手法の有用性を示す。

1 序論

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度程度を持つため、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繋がるため、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歪みを有するため、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、歪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の特徴として検出し、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、歪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、歪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、実空間と対応付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。さらに、実用化を考慮する上で、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ができる．これにより，画像全体の情報を校正に用いることができ，歪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無いため，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歪み，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

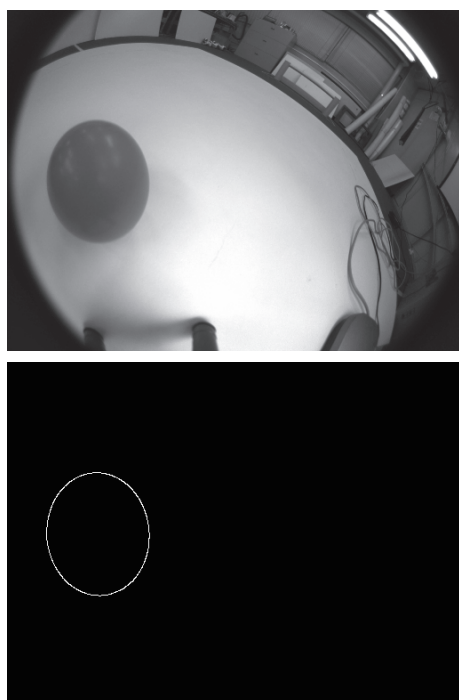


図1 魚眼画像上の球体と検出された輪郭

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，非線形性を持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歪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通りである．2章では魚眼カメラの射影モデル，3章では球体を用いた内部パラメータ校正，4章では内部パラメータ推定実験，5章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

一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 [pixel] によって次式で表せる．

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

一方，魚眼レンズの射影方式は，設計によって異なり，代表的なモデルは以下の4つである．

$$r_f = \delta \theta \text{ (等距離射影)} \quad (2)$$

$$r_f = \delta \sin \theta \text{ (正射影)} \quad (3)$$

$$r_f = 2\delta \tan(\theta/2) \text{ (立体射影)} \quad (4)$$

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

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

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．また，製造過程等で生じる誤差の影響のため，理想的な射影方式のいずれにも厳密には従わない．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

一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．

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

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乗項までを用いて

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

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歪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 $\mathbf{m}_f = [u_f \ v_f]^\top$ ，魚眼画像上の光軸点の位置を $\mathbf{c} = [c_u \ c_v]^\top$ とする．このとき， $\mathbf{c}$ を原点とした座標系における位置 $\mathbf{m}_f'$ と $\mathbf{m}_f$ の関係は，

$$\mathbf{m}_f' = \begin{bmatrix} u_f' \\ v_f' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f - c_u \\ v_f - c_v \end{bmatrix} \quad (8)$$

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 $\mathbf{m}_f'$ は，極座標形式では次式で表せる．

$$\begin{aligned} r_f &= \sqrt{u_f'^2 + v_f'^2} \\ \phi &= \arctan\left(\frac{v_f'}{u_f'}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

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．この歪みは，Swaminathan[13] が用いている Conrady のモデル[14]により，

$$\begin{aligned} \nabla T_u &\approx D_1 r_f^2 (1 + 2 \cos^2 \phi) + 2 D_2 r_f^2 \sin \phi \cos \phi \\ \nabla T_v &\approx D_2 r_f^2 (1 + 2 \sin^2 \phi) + 2 D_1 r_f^2 \sin \phi \cos \phi \end{aligned} \quad (10)$$

と表せる．この式は極座標形式では次式で表せる．

$$\begin{aligned} \nabla T_r &\approx 3 D_1 r_f^2 \cos \phi + 3 D_2 r_f^2 \sin \phi \\ \nabla T_\phi &\approx -D_1 r_f \sin \phi + D_2 r_f \cos \phi \end{aligned} \quad (11)$$

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．

$$\begin{aligned} r_f + \nabla T_r &= k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5 \\ \phi' &= \phi + \nabla T_\phi \end{aligned} \quad (12)$$

よって，校正する魚眼カメラの内部パラメータは

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

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，非線形性を持つ魚眼カメラモデルに対しての校正が可能である．さらに，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．

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持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．

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

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．

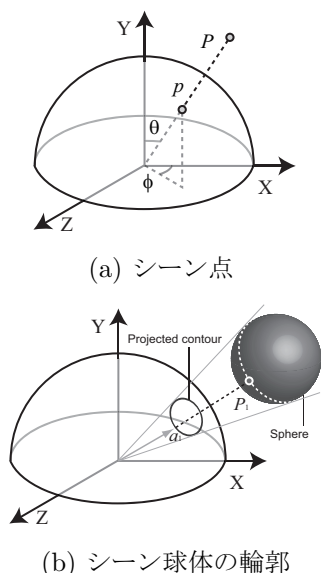


図2 球面モデルへの投影

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 $\|\mathbf{a}\| = 1$ 上において，中心 $\mathbf{x}$ ($\|\mathbf{x}\| = 1$)，角度半径 μ ($0 < \mu < \pi$) 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．

$$\mathbf{x}^\top \mathbf{a} = \cos \mu \quad (15)$$

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 $\mathbf{a}_i$ ($i = 1, \dots, m$) とする．このとき， $\|\mathbf{a}_i\| = 1$ であり， $\mathbf{a}_i$ と $\mathbf{x}$ との角度を ψ_i とすると，次式が成り立つ．

$$\mathbf{x}^\top \mathbf{a}_i = \cos \psi_i \quad (16)$$

ここで，全てのデータ点 $\mathbf{a}_i$ が同一の真円上に誤差無く存在する場合， $\psi_i = \mu$ が成り立つ．よって，角度半径の誤差である

$$e_i = \mu - \psi_i \quad (17)$$

の2乗和である次の評価関数

$$J = \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (18)$$

を最小化する真円パラメータ $\mathbf{x}$ ， μ を推定する．なお，非線形関数 J の最小化には Newton 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項で示した単位球面における真円あてはめが適用できる．さらに，このような球体の投影を複

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．

$$\xi = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{P_n} (e_{ni} / \mu_n)^2 \quad (19)$$

$$e_{ni} = \mu_n - \psi_i$$

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 $\mathbf{I}$ 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 $\mathbf{m}_{fi} = [u_{fi} \ v_{fi}]^\top$ 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，求めた 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 $\mathbf{s}_i$ 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．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

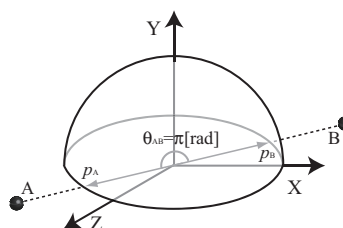


図3 制約条件として用いる既知角度

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，Lagrangeの未定乗数法を用いた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 $\theta_{AB} = \pi[\text{rad}]$ の場合， $g_c = 0$ となる制約条件は次式で表せる．

$$g_c = \pi - \theta_{AB} \quad (20)$$

ここでLagrange乗数 λ を用いて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．

$$\xi = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{P_n} (e_{ni}/\mu_n)^2 + \lambda g_c \quad (21)$$

$$e_{ni} = \mu_n - \psi_i$$

この評価関数を最小化する内部パラメータ $\mathbf{I}$ 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．

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，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．内部パラメータが真値に近ければ，魚眼画像の歪みが補正され，透視投影画像では実環境における直線性が保存される．よって，補正画像の歪みから，校正精度を評価できる．

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4に示す．使用した球体はプラスチック製のボールであり，高精度な真円度を持つものではない．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 $180[\text{deg}]$ である．また，画像サイズは $512[\text{pixel}] \times 384[\text{pixel}]$ である．なお，特徴点として利用する球体輪郭はサブピクセル精度で検出した．

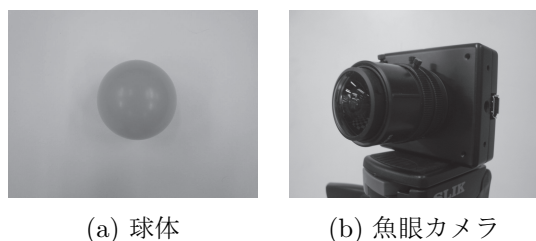


図4 校正用の球体と魚眼カメラ

4.2 実験結果

2.2節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．校正における初期値と推定値を内部パラメータの推定結果として表1に示す．

推定された内部パラメータを評価するため，表1の内部パラメータ推定値を用いて魚眼画像を補正し，透視投影画像を生成した．補正用の魚眼画像と生成した透視投影画像を図5，図6に示す．

図5(a)，図6(a)に示すように，魚眼カメラの特有な歪みによって，魚眼画像上の建物や廊下の形状等，実際は直線性を持つ部分が曲線となっていることがわかる．一方，図5(b)，図6(b)に示すように，推定された内部パラメータを用いることにより，魚眼カメラの歪みが上手く補正され，建物や廊下の形状等が，透視投影画像上では直線となっている．

このことから，魚眼画像に対して精度良く補正を行っていることが確認でき，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．以上より，本提案手法の有用性を示した．

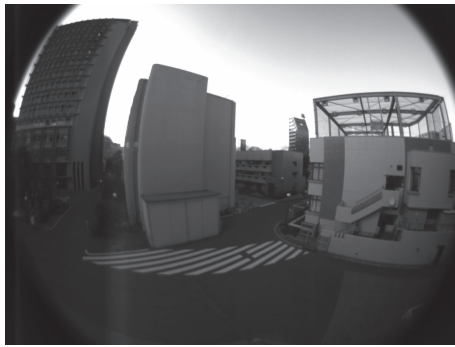
5 結論

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歪みを補正し，生成した透視投影画像により精度評価を行った．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，非線形性を持つ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．

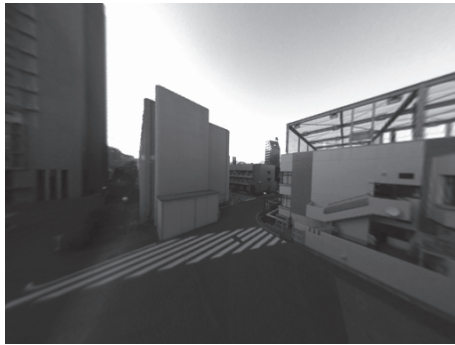
今後の展望として，定量的な精度評価により他の手法との精度比較を行う．

表1 内部パラメータの推定結果

	Initial Value	Estimated Value
k_1	162.97	172.53
k_3	0	-1.07
k_5	0	-1.25
c_u	0	8.97
c_v	0	10.21
D_1	0	9.93×10^{-6}
D_2	0	4.12×10^{-6}



(a) 魚眼画像



(b) 透視投影画像

図 5 魚眼画像と透視投影画像：屋外環境



(a) 魚眼画像



(b) 透視投影画像

図 6 魚眼画像と透視投影画像：屋内環境

参考文献

- [1] 鈴木政康 他: “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 et al.: “Generation of Overhead View Images by Estimating Intrinsic and Extrinsic Camera Parameters of Multiple Fish-Eye Cameras,” Proc. of IAPR Conf. MVA, 2009.
- [3] 松山隆司 等共著: “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. PAMI, Vol.22, No.11, pp.1330-1334, 2000.
- [5] J. Kannala and Sami S. Brandt, “A Generic Camera Model and Calibration Method for Conventional, Wide-Angle, and Fish-Eye Lenses,” IEEE Trans. PAMI, Vol.28, No.8, pp.1335-1340, 2006.
- [6] J. Heikkila, “Geometric Camera Calibration Using Circular Control Points,” IEEE Trans. PAMI, 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.
- [8] 駒形英樹, 石井郁夫, 高橋章, 若月大輔, 今井博英, “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, 2006.
- [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, D-II Vol.J88-D-II, No.9, pp.1847-1856, 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, 2007.
- [11] H. Bakstein, T. Pajdla, “Panoramic Mosaicing with a 180° Field of View Lens,” IEEE Proc. of OMNIVIS'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, D-II Vol. J87-D-II, No.5, pp.1071-1082, 2004.
- [13] R. Swaminathan et al.: “Nonmetric Calibration of Wide-Angle Lenses and Polycameras,” IEEE Trans. PAMI, 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 et al.: “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 et al.: “Numerical Recipes in C,” 技術評論社, 1993.