

複数の魚眼カメラを用いた俯瞰画像生成手法の構築*

加瀬翔太** 光本尚訓*** 新垣洋平† 下村倫子† 梅田和昇††

A Method to Construct Overhead View Images Using Multiple Fish-Eye Cameras

Shota KASE, Hisanori MITSUMOTO, Yohei ARAGAKI, Noriko SHIMOMURA and Kazunori UMEDA

In recent years, safety technologies of cars are becoming important and the cases that cameras are mounted in cars are increasing. Since the perception of the distance of a usual image is difficult for drivers, method to construct overhead view images and assist drivers are proposed. In this paper, we propose methods for estimating camera parameters of multiple cameras and construct overhead view images with small errors. Effectiveness of the methods is examined by experiments.

Key words: overhead view images, fish-eye lens, wide-angle lens, camera calibration, camera paramater, intelligent transport systems

1. 緒 言

近年、ドライバーの安全確認を支援する車載カメラシステムが普及してきている。通常車載カメラ画像では距離感の知覚が難しいこともあり、車両を真上から見たような画像(俯瞰画像)に変換し、安全確認を補助する技術が提案されている¹⁾。さらに俯瞰画像を合成することで、車両の全周を容易に観測することを可能とするシステムも知られている²⁾³⁾。複数台のカメラを用いて、ずれの小さい俯瞰合成画像を生成するためには、それぞれのカメラの位置・姿勢を正しく算出することが重要である。また、カメラ台数を減らしてコストを低減するために、超広角の魚眼カメラを用いることは有効である。しかし、通常のピンホールカメラの内部パラメータ推定に関する研究⁴⁾⁵⁾は多く行われているのに対して、魚眼カメラの内部パラメータ推定に関する研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾は少なく、安定性、精度の面でも劣る。そのため、魚眼カメラの内部パラメータ推定も重要である。本研究では、複数魚眼カメラの外部パラメータと内部パラメータを推定し、ずれの小さい俯瞰合成画像を生成する手法を提案する。ここで、外部パラメータは、ワールド座標系におけるカメラの位置・姿勢を表し、通常のピンホールカメラの場合と同様に定義される。一方の内部パラメータは、2.2節で定義するように、魚眼カメラ特有である。

2. 魚眼カメラの概要

2.1 射影方式

魚眼レンズの射影方式は、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_f [pixel]によって、一般に記述される⁹⁾。図1に透視投影モデルと魚眼カメラモデルの投影の違いを示す。透視投影モデルの場合、シーンにおける点 P は、点 P からレンズ中心への投射線が画像平面と交わる点 p に投影される。それに対して、魚眼カメラモデルの場合、シーンにおける点 P は点 p' に投影される。

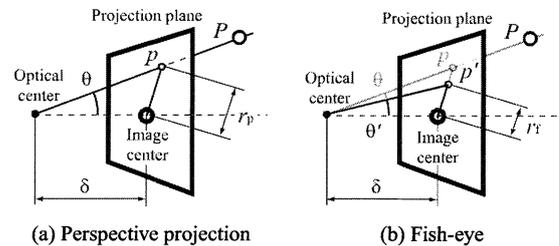


Fig. 1 Difference of projection

魚眼レンズは設計によって射影方式が異なるが、代表的なものは以下の四つである。

$$r_f = \delta \theta \text{ (等距離射影)} \quad (1)$$

$$r_f = \delta \sin \theta \text{ (正射影)} \quad (2)$$

$$r_f = 2\delta \tan(\theta/2) \text{ (立体射影)} \quad (3)$$

$$r_f = 2\delta \sin(\theta/2) \text{ (等立体角射影)} \quad (4)$$

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

これに対して、一般のカメラのモデルである透視投影モデルは、

$$r_p = \delta \tan \theta \text{ (透視投影モデル)} \quad (5)$$

と表せる。

2.2 魚眼カメラモデル

一般に魚眼レンズの投影は、製造過程で発生する誤差などの影響のために、式(1)~(4)の理想的な射影方式には従わない。本節では、中野らの報告⁸⁾に従い、魚眼カメラモデルについて述べる。

2.2.1 放射方向歪曲収差

式(1)~(4)で表される一般的な魚眼レンズの射影方式は、射影角 θ に対して線形か、 θ の \sin または \tan 関数で表されている。 \sin 関数、 \tan 関数のテイラー展開は θ の奇数乗の項のみとなる。本論文では、このテイラー展開の5乗項までを用いて

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

と近似した式を放射方向歪曲収差(radial distortion)を含む一般の魚眼レンズの射影方式として用いることにする。 k_1, k_3, k_5 はテイラー展開の各項の係数である。

* 原稿受付 平成20年4月1日

** 正会員 中央大学大学院(現, キヤノン(株))

*** 中央大学大学院(東京都文京区春日1-13-27)

† 日産自動車株式会社(神奈川県厚木市森の里青山1-1)

†† 正会員 中央大学(東京都文京区春日1-13-27)

2.2.2 光軸点のずれ

実際のレンズの光軸は、画像中心を通らずに多少ずれている (Shift of optical center). 魚眼カメラから得られた画像 (以下、魚眼画像と呼ぶ) 上のある点の位置を $\mathbf{m}_f = [u_f \ v_f]^T$ とする。また、魚眼画像上の光軸点の位置を $\mathbf{c} = [c_u \ c_v]^T$ 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、

$$\mathbf{m}_f' = \begin{bmatrix} u_f' \\ v_f' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f - c_u \\ v_f - c_v \end{bmatrix} \quad (7)$$

となる。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、一般のカメラの CCD の各画素は正方格子であることから、 $\gamma = 1$ とする。式 (7) は、極座標形式では

$$\begin{aligned} r_f &= \sqrt{u_f'^2 + v_f'^2} \\ \phi &= \arctan\left(\frac{v_f'}{u_f'}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

と表すことができる。

2.2.3 魚眼カメラの内部パラメータ

魚眼カメラには、上記のひずみ以外に接線方向歪曲収差があることが知られている。しかし一般に接線方向歪曲収差は小さいものなので¹⁰⁾、本論文では取り扱わない。以上から最終的な魚眼カメラモデルは

$$r_f = k_1\theta + k_3\theta^3 + k_5\theta^5 \quad (9)$$

となる。また、求める魚眼カメラの内部パラメータは

$$\mathbf{I} = [k_1 \ k_3 \ k_5 \ c_u \ c_v]^T \quad (10)$$

と表せる。

3. 俯瞰合成画像生成の概要

本章では、魚眼画像から俯瞰合成画像を生成する手法の概要を示す。まず、魚眼画像を透視投影モデルの画像 (以下、透視投影画像と呼ぶ) に変換する。次に、透視投影画像を俯瞰画像に変換する。俯瞰画像は、環境を真上から見下ろす位置に設置したと仮定した仮想的なカメラから見た画像である。最後に、異なる複数のカメラから得られた俯瞰画像を合成することにより俯瞰合成画像を生成する。

3.1 透視投影画像への変換

魚眼画像から透視投影画像への変換は、図 2 の透視投影画像座標系における位置 $\mathbf{m}_p = [u_p \ v_p]^T$ と、魚眼画像座標系における位置 $\mathbf{m}_f = [u_f \ v_f]^T$ の関係を求めることにより可能である。ここで、透視投影モデルは

$$r_p = \delta_p \tan \theta \quad (11)$$

で表される。また、その像高は

$$r_p = \sqrt{u_p^2 + v_p^2} \quad (12)$$

と表される。式 (11), (12) より、カメラの投影角 θ は

$$\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}}{\delta_p}\right) \equiv \theta(\mathbf{m}_p) \quad (13)$$

となり、 \mathbf{m}_p の関数となる。更に、光軸点のずれ $\mathbf{c} = [c_u \ c_v]^T$ を補正した魚眼画像座標系と透視投影画像座標系におけるそれぞれの方位角 ϕ が等しいことから

$$u_f = \frac{r_f}{r_p} u_p + c_u, \quad v_f = \frac{r_f}{r_p} v_p + c_v \quad (14)$$

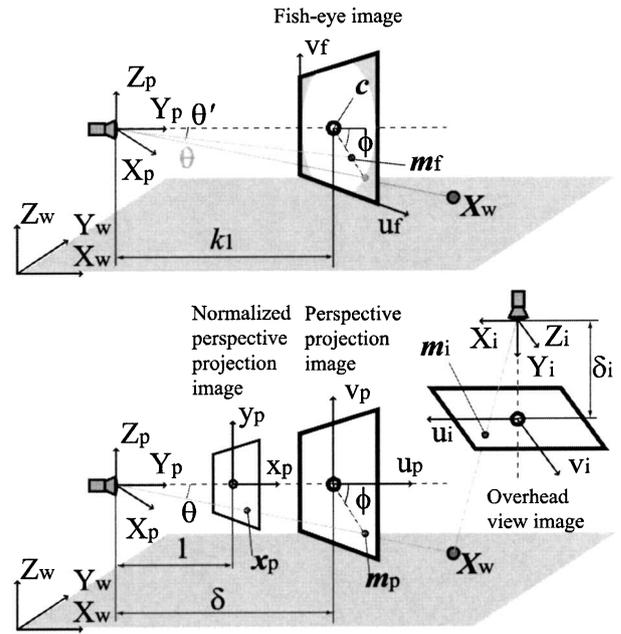


Fig. 2 Coordinate systems

が成り立つ。式 (14) に、式 (9), (12), (13) を代入することにより

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_f &= \begin{bmatrix} u_f \\ v_f \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{k_1\theta(\mathbf{m}_p) + k_3\theta(\mathbf{m}_p)^3 + k_5\theta(\mathbf{m}_p)^5}{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}} u_p + c_u \\ \frac{k_1\theta(\mathbf{m}_p) + k_3\theta(\mathbf{m}_p)^3 + k_5\theta(\mathbf{m}_p)^5}{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}} v_p + c_v \end{bmatrix} \\ &\equiv \begin{bmatrix} F_u(\mathbf{m}_p, \mathbf{I}) \\ F_v(\mathbf{m}_p, \mathbf{I}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

が求まり、 \mathbf{m}_f は \mathbf{m}_p の関数で表すことができる。

3.2 俯瞰画像への変換

透視投影画像から俯瞰画像への変換は、図 2 の俯瞰画像座標系における位置 $\mathbf{m}_i = [u_i \ v_i]^T$ と、透視投影画像座標系における位置 $\mathbf{m}_p = [u_p \ v_p]^T$ の関係を求めることにより可能である。焦点距離を 1 と正規化した画像座標系を前述の透視投影画像座標系と区別するために、正規化透視投影画像座標系と呼ぶことにする。カメラ座標系を、カメラの光学中心を原点として、 Y_p 軸を光軸方向に一致させ、 X_p 軸と Z_p 軸は画像の横方向と縦方向に平行にとる。ワールド座標系の、原点を観測する地表面上に、 Z_w 軸を地表面に垂直な方向にとる。透視投影画像座標系、正規化透視投影画像座標系、カメラ座標系、ワールド座標系における位置を同次座標で、

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{m}}_p &= \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{x}}_p = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix}, \\ \tilde{\mathbf{X}}_p &= \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{X}}_w = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

と表記する. 透視投影画像座標系と正規化透視投影画像座標系の関係は,

$$\tilde{\mathbf{m}}_p = \mathbf{A}_p \tilde{\mathbf{x}}_p \quad (16)$$

と表すことができる. ただし, \mathbf{A}_p は次に表されるカメラの内部パラメータからなる 3×3 行列である.

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} \delta_p & 0 & c_{pu} \\ 0 & \delta_p & c_{pv} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

魚眼画像から透視投影画像への変換の際に, 光軸のずれは補正されているために, $\mathbf{c}_p = [c_{pu} \ c_{pv}]^T = \mathbf{0}$ である. さらに, 正規化透視投影画像座標系とカメラ座標系の関係は,

$$\tilde{\mathbf{x}}_p = [\mathbf{J}|\mathbf{0}] \tilde{\mathbf{X}}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_p \quad (18)$$

と表現できる. またカメラ座標系とワールド座標系の関係式は,

$$\tilde{\mathbf{X}}_p = {}^p \mathbf{M}_w \tilde{\mathbf{X}}_w \quad (19)$$

と表現できる. ここで, ${}^p \mathbf{M}_w$ はカメラの外部パラメータから校正される 4×4 行列である. 式 (16)~(19) をまとめると, 透視投影画像座標系とワールド座標系の関係は,

$$\tilde{\mathbf{m}}_p = \mathbf{A}_p [\mathbf{J}|\mathbf{0}] {}^p \mathbf{M}_w \tilde{\mathbf{X}}_w = \mathbf{P}_p \tilde{\mathbf{X}}_w \quad (20)$$

で表すことができる¹⁰⁾. この 3×4 行列 \mathbf{P}_p は透視投影行列と呼ばれ, カメラの外部パラメータを含んでいる. \mathbf{P}_p の i 列目の成分を \mathbf{p}_i とし, 投影面が $Z_w = 0$ であることを考慮すると, 式 (20) は

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{m}}_p = \mathbf{P}_p \tilde{\mathbf{X}}_w &= \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_2 & \mathbf{p}_3 & \mathbf{p}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 & \mathbf{p}_2 & \mathbf{p}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_p \tilde{\mathbf{x}}_w \end{aligned} \quad (21)$$

となり, 3×3 の行列 \mathbf{H}_p を含む式に変換できる. 同様に, 俯瞰画像座標系における位置を $\tilde{\mathbf{m}}_i = [u_i \ v_i \ 1]^T$ とすると

$$\tilde{\mathbf{m}}_i = \mathbf{H}_i \tilde{\mathbf{x}}_w \quad (22)$$

が成り立ち, 式 (21), (22) から

$$\tilde{\mathbf{m}}_p = \mathbf{H}_p \mathbf{H}_i^{-1} \tilde{\mathbf{m}}_i \quad (23)$$

が求まり, \mathbf{m}_p は \mathbf{m}_i の関数で表すことができる.

3.3 俯瞰合成

3.1 節, 3.2 節で求まる複数の俯瞰画像は, 同一の仮想的なカメラからみた画像である. そのため複数のカメラに写った任意の点は, 同一の画素位置で表すことができる. つまり, それぞれの俯瞰画像の画素位置において画素値平均を求めることで, 俯瞰合成画像を生成することができる.

4. カメラパラメータの推定

4.1 内部パラメータの推定手法

魚眼カメラの内部パラメータ推定手法には, 中野らが提案した, しま模様校正パターンの直線性を利用する手法⁸⁾を利用する.

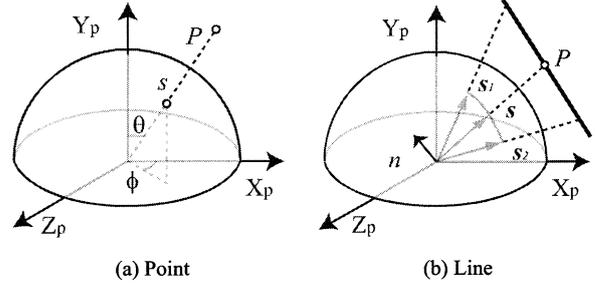


Fig. 3 Sphere model

図 3(a) に示すシーンにおける点 P の単位位置ベクトルは, カメラの光学中心を中心とした球にシーンを投影する球面モデルの投影角 θ と方位角 ϕ を用いて

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi & \cos \theta & \sin \theta \sin \phi \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

と表される. また, 図 3(b) に示す直線上の二点の単位位置ベクトル $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$ に直交する単位法線ベクトルを

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \end{bmatrix}^T \quad (25)$$

と表す. 式 (24), (25) から

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{s} = n_x \sin \theta \cos \phi + n_y \cos \theta + n_z \sin \theta \sin \phi = 0 \quad (26)$$

が成り立つ. この方程式を用いた評価関数

$$\xi_i = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^{P_l} (\mathbf{n}_l \cdot \mathbf{s}_i)^2 \quad (27)$$

を最小化する内部パラメータ \mathbf{I} を求める. ここで, L は観測直線の本数, P_l は l 本目の直線上の点の数である. パラメータの推定には, 線形近似による反復改良法である Gauss-Newton 法を用いる. 観測点が魚眼画像座標系において $\mathbf{m}_{fi} = [u_{fi} \ v_{fi}]^T$ と与えられたとき, 投影角 θ を式 (9) から Brent 法¹¹⁾ で求めて, 式 (24) に代入する. こうして投影座標 \mathbf{s}_i を求めることができる.

単位法線ベクトル \mathbf{n} は, 位置ベクトル $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$ を用いて,

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{s}_1 \times \mathbf{s}_2}{\|\mathbf{s}_1 \times \mathbf{s}_2\|} \quad (28)$$

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

とする. 本論文で用いる単位法線ベクトル \mathbf{n}_l は,

$$\mathbf{n}_l = \frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^{\mu} \frac{\mathbf{s}_{1k} \times \mathbf{s}_{2k}}{\|\mathbf{s}_{1k} \times \mathbf{s}_{2k}\|} \quad (29)$$

とする. μ は, 計算に用いるデータ組の数, $\mathbf{s}_{1k}, \mathbf{s}_{2k}$ は, k 組目の単位位置ベクトルの組である.

4.2 外部パラメータの推定手法

外部パラメータは, 観測点 P_i の魚眼画像座標系における位置 $\mathbf{m}_{fi} = [u_{fi} \ v_{fi}]^T$ とワールド座標系における位置 $\mathbf{X}_{wi} = [X_{wi} \ Y_{wi} \ Z_{wi}]^T$ の対応から求めることができる. ワールド座標系におけるカメラの方向を θ_{cam} , 仰角を α_{cam} , ロール角を β_{cam} とする. また, カメラの位置を $[X_{cam} \ Y_{cam} \ Z_{cam}]^T$ とすると, 求めるカメラの位置, 姿勢のパラメータは,

$$\mathbf{E} = [X_{cam} \ Y_{cam} \ Z_{cam} \ \theta_{cam} \ \alpha_{cam} \ \beta_{cam}]^T \quad (30)$$

となり, 式 (19) の ${}^p \mathbf{M}_w$ に含まれる. \mathbf{X}_{wi} を魚眼画像座標系に逆投影した点を \mathbf{m}_{wi} とすると, 式 (15), (20) より

$$\mathbf{m}_{wi} \equiv \mathbf{m}_{wi}(\mathbf{E}, \mathbf{X}_{wi}) \quad (31)$$

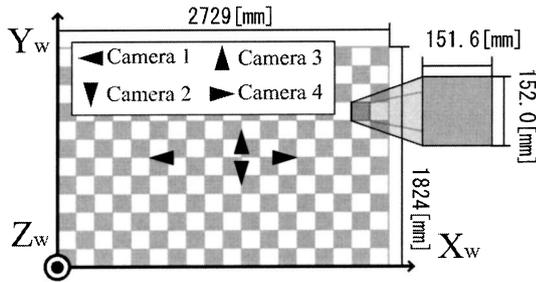


Fig. 4 World Coordinate system and camera position

と E, X_{wi} の関数で表すことができる。よって評価関数

$$\xi_e = \sum_{i=1}^N \{m_{fi} - m_{wi}(E, X_{wi})\}^2 \quad (32)$$

を最小化する E を求める。 N は観測点数である。パラメータの推定には、Gauss-Newton 法を用いる。この際、初期値は、カメラを設置した際にメジャーを用いて手動で測定した値を用いる。レンズ中心の位置が不明であることもあり誤差は大きい。初期値をおおざっぱに与えても同じ値に収束する。

4.3 カメラパラメータの同時最適化

式 (31) は、内部パラメータ I を含むので

$$m_{wi} \equiv m_{wi}(E, I, X_{wi}) \quad (33)$$

とも表すことができる。4.1 節、4.2 節で求めた内部パラメータ I 、外部パラメータ E を初期値として

$$\xi_c = \sum_{i=1}^N \{m_{fi} - m_{wi}(E, I, X_{wi})\}^2 \quad (34)$$

を最小化することで、最適化を行うことができる。

5. 俯瞰画像作成実験

以上で提案した手法を用いて、異なる位置に設置したカメラから俯瞰合成画像を生成した。節ごとの実験で用いられた複数の魚眼画像は、同一のカメラ及びレンズから撮影したものであり、合成はリアルタイムでは行っていない。実験で用いてはいないが、異なる複数のカメラを用いればリアルタイムで俯瞰合成画像を生成することも可能である。

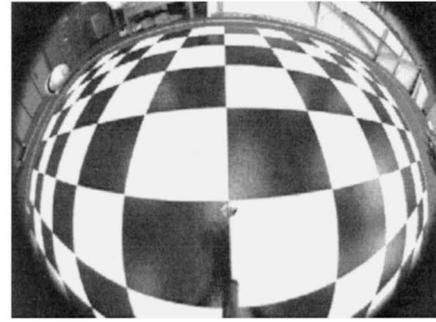
CCD カメラは PointGreyResearch 社の Dragonfly2 を、レンズはスペース社の TV1634M を用いた。TV1634M の射影方式は正射影である。実験では、カメラのソフトウェアの都合により 1024[pixel]×768[pixel] の画像をリサイズして、512[pixel]×384[pixel] としている。

ワールド座標系とカメラの位置を図 4 に示す。三角形の鋭角の先端でカメラの位置を、鋭角の向きでカメラの方向 θ_{cam} を表している。 θ_{cam} は、 Y_w 軸の向きを 0[deg] として反時計回りに正の値をとる。 α_{cam} は、地表面に光軸が平行なときを 0[deg] として、地表面に下向きに負の値をとる。いずれの実験でもカメラは $Z_w = 200[mm]$ の位置に設置した。

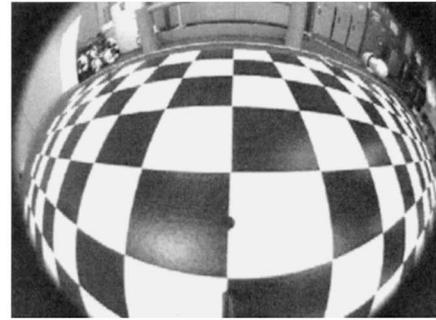
カメラの外部パラメータを算出する際の観測点の魚眼画像における位置は、チェックパターンの交点であり、これを手動で取得している。

5.1 最適化の評価

得られた魚眼画像を図 5 に示す。この画像から俯瞰画像を生成し、4.3 節の最適化を行う場合と行わない場合で、それぞれ



(a) Camera1



(b) Camera2

Fig. 5 Fish-eye images

俯瞰合成画像を生成し比較を行った。カメラの位置は図 4 の Camera1, 2 である。カメラの仰角は、 $\alpha_{cam} = -60[deg]$ とする。またロール角は、 $\beta_{cam} = 0[deg]$ とする。最適化前の画像を図 6 (a) に、最適化後の画像を図 6 (b) に示す。最適化前では 2 枚の画像がずれて合成画像が 2 重になっているのに対し、最適化後はこのずれが小さくなっていることが分かる。以降の実験では、すべて最適化を行うものとする。

5.2 カメラ仰角の違いの評価

二台のカメラの仰角を変化させて、俯瞰合成画像を生成した。このとき、 $\alpha_{cam} = -30[deg]$ である。その他のカメラの位置、姿勢は、5.1 節の実験と同じである。図 7 に結果を示す。角度を変化させた場合も、図 6 とほぼ同等のずれのない画像を生成することができた。

5.3 レンズの違いの評価

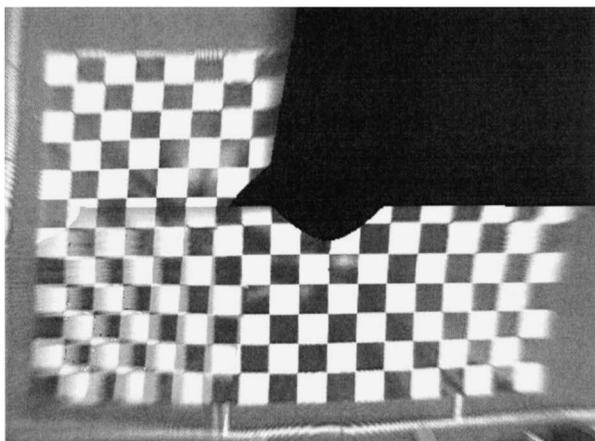
二台のカメラのレンズをフジノン社の FE185C046HA-1 に変更して、俯瞰合成画像を生成した。FE185C046HA-1 の射影方式は、等距離射影である。カメラの位置、姿勢は、5.1 節の実験と同じである。図 8 に結果を示す。異なったレンズを用いた場合も、図 6 とほぼ同等のずれのない画像を生成することができた。

5.4 全周囲画像の生成

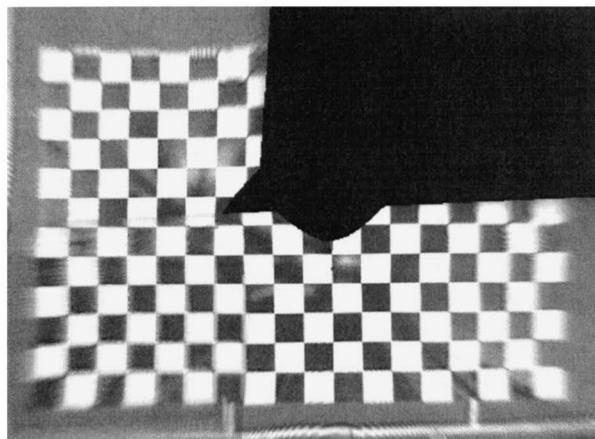
カメラの設置台数を四台にして全周囲画像を生成した。四台のカメラの位置は図 4 の Camera1~4 で表される。カメラの仰角はすべて $\alpha_{cam} = -60[deg]$ である。図 9 に結果を示す。多少のずれはあるものの全周囲の俯瞰合成画像を生成することができた。

6. 結 言

魚眼カメラを用いて、カメラパラメータを推定し、ずれの小さい俯瞰合成画像を生成する手法を提案し、実装した。実験を



(a) Without optimization



(b) With optimization

Fig. 6 Effect of Optimization

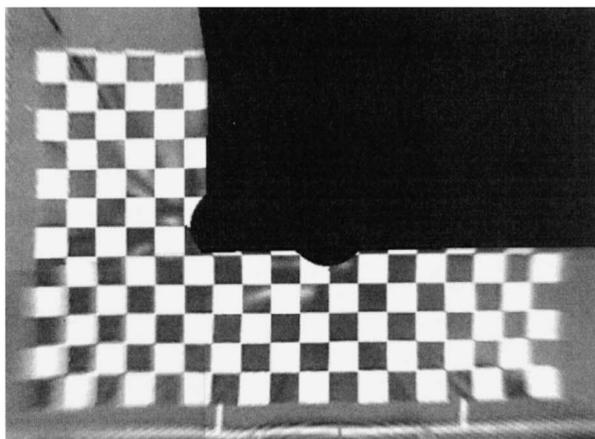


Fig. 7 Effect of elevation angle change ($\alpha_{cam} = -30[\text{deg}]$)

行い、俯瞰画像の生成手法の有用性を検討した。また実験条件の変化による比較を行った。

今後の展望として、接線方法歪曲収差などのレンズひずみを考慮した俯瞰合成画像生成手法の構築、校正に立体物を使用した場合の俯瞰合成画像の精度評価、俯瞰合成画像のずれやひずみの定量的な評価が挙げられる。

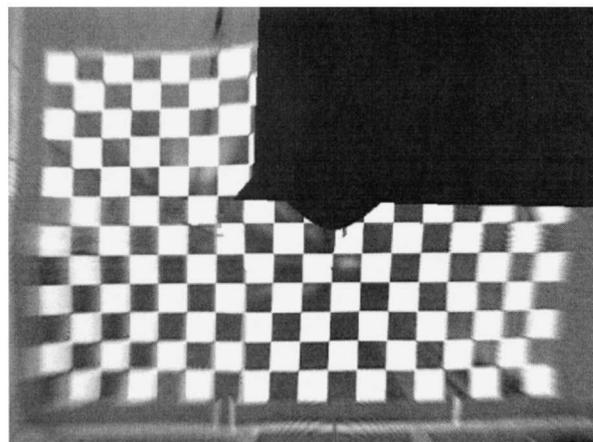


Fig. 8 Effect of lens change (lens: FE185C046HA-1)

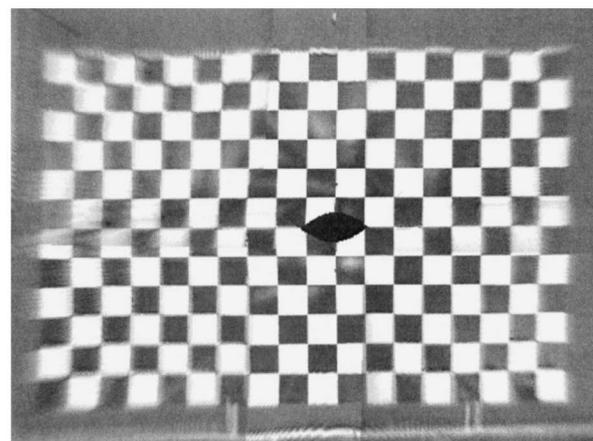


Fig. 9 Integrated overhead view image

謝 辞

実験で用いるレンズを貸与して頂いたフジノン株式会社の粉川博氏に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 浅利圭介, 石井洋平, 本郷仁志, 蚊野浩, “鳥瞰画像生成における校正環境の簡易化”, 第 13 回画像センシングシンポジウム予稿集 (2007) IN1-13.
- 2) K. Oizumi, “Development of “All-Around View” System,” SAE Technical Paper Series (2003).
- 3) 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, 116-07 (2007) 17.
- 4) 松山隆司など共著, “コンピュータービジョン”, 新技術コミュニケーションズ, 東京 (1999) 37.
- 5) Z. Zhang, “A Flexible New Technique for Camera Calibration,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22, 11 (2000) 1330.
- 6) 駒形英樹 他, “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”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, J89-D-II, 1 (2006) 64.
- 7) 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”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, J88-D-II, 9 (2005) 1847.
- 8) 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”, 電子情報通信学会論文誌 D, J90-D, 1 (2007) 73.
- 9) 長岡陽 他, “まるまる! 全方位カメラシステム”, 映像情報 industrial 臨時増刊号, 東京 (2006) 5.
- 10) 奥富正敏 他, “デジタル画像処理”, 財団法人 画像情報教育振興協会 (CG-ARTS 協会), (2007).
- 11) 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, 東京 (1993) 261.