

既知パターンを用いた複数魚眼カメラの外部パラメータ推定

岡本 寛也† Abdelaziz Khat ‡ 下村 倫子‡ 梅田 和昇†

†中央大学 ‡日産自動車(株) 総合研究所

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

Abstract

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. ずれの少ない全周囲俯瞰画像を生成するためには, 車両に搭載されている複数カメラの外部パラメータを正しく算出することが重要である. 本論文では, 既に車両に設置された複数台の魚眼カメラの外部パラメータを簡便に同時に校正する手法を提案する. 従来は, 外部パラメータを推定するためにキャリブレーション用のターゲットを車両周囲に敷き詰める必要があり, 校正環境が大掛かりとなっていた. ここで提案する手法では, 持ち運べるサイズで既知の形状パターンを車両の四隅方向に配置し, 全周囲俯瞰画像を生成した後に, 生成した全周囲俯瞰画像を利用して車載カメラの外部パラメータを推定する. 実車に対して提案手法を適用した結果とシミュレーションによる結果を照らし合わせて定量的評価を行う.

1 序論

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. 通常の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[1]し, それを合成することで車両の周囲を容易に観測することを可能とするシステムが提案されている[2][3]. これらのシステムでは, 車両に搭載されている複数台の魚眼カメラが用いられている. ずれの少ない全周囲俯瞰画像を生成するためには, これらのカメラの位置・姿勢(以下, 外部パラメータ)を正しく算出することが重要である. 従来研究では, 一台のカメラに対してキャリブレーション用のターゲットを複数枚提示してカメラの内部・外部パラメータを推定する手法が提案されている[4][5]. この手法を適用し個々のカメラに対してキャリブレーションを行った結果を用いて全周囲俯瞰画像を生成した場合, 全周囲俯瞰画像中において複数カメラの共通した領域でずれが生じる. また, 複数台のカメラの内部・外部パラメータを同時に

最適化し, ずれの少ない全周囲俯瞰画像を生成する手法が提案されている[6]. この手法はキャリブレーションを行う際, 車両周囲の地平面上にキャリブレーション用ターゲットを敷き詰める必要があり, 校正環境が大掛かりとなる. 俯瞰画像生成時の校正環境を簡易化する手法も提案されている[1]. この手法は既知の形状パターンを利用することで簡便に俯瞰画像を生成しているが, 俯瞰画像の表示までしか行っていない.

これらに対して本論文では, 簡便に全周囲俯瞰合成画像を生成すると同時に複数台の魚眼カメラの外部パラメータを推定する手法を提案する. 提案手法では, 持ち運べるサイズの既知の形状パターンを車両の四隅方向に任意に配置し, 既知パターンの形状を基にカメラの位置・姿勢を推定する. 実車に対して提案手法を適用した結果とシミュレーションによる結果を照らし合わせて定量的評価を行う.

2 魚眼カメラの概要

一般のピンホールカメラモデルでは, 計測点からレンズへの投射線がレンズの光軸となす角 $\theta[\text{rad}]$ と画像上の像高(射影点の光軸からの距離) $r_p[\text{pixel}]$ を用いて射影モデルを

$$r_p = \delta \tan \theta \quad (1)$$

と表すことができる. ただし

$$\delta = f / w \quad (2)$$

であり, f は焦点距離[mm], w は画素サイズ[mm/pixel]を表す.

一方, 魚眼レンズには, いくつか射影方式がある. 代表的な等距離射影では

$$r_f = \delta \theta \quad (3)$$

また, 正射影では

$$r_f = \delta \sin \theta \quad (4)$$

と表される. 魚眼レンズの射影方式は製造誤差やレンズ収差などの影響のために, 理想的な射影モデルには従わない. そこで魚眼カメラモデルは次式のように射影モデルをテイラー展開して得られる奇数次数項の近似式

によって表現されることが多い[6].

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

ここで k_1, k_3, k_5 はテイラー展開の各項の係数であり，カメラの内部パラメータである．さらに光軸の位置 (c_u, c_v) を考慮するとカメラの内部パラメータは

$$I = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad c_u \quad c_v]^T \quad (6)$$

となる． I は直線・球体などの既知のパターンを観測することで推定される[6][7].

3 提案手法

本章では，既知パターンを用いて魚眼カメラの外部パラメータを推定する手法について述べる．本手法では内部パラメータを既知とした4台の魚眼カメラを用いる．Fig.1 に示す，各カメラの共通した視野領域内に形状が既知であるパターンを配置した環境において全周囲俯瞰画像を生成する．生成した全周囲俯瞰画像を利用して4台の魚眼カメラの外部パラメータの推定を行う．Fig.2 に示す提案手法のフローチャートに沿って具体的に説明する．

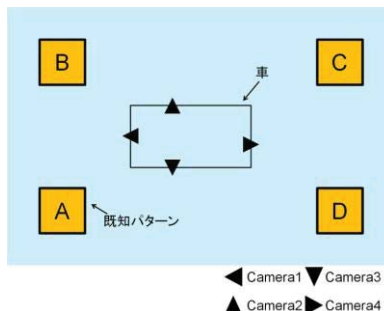


Fig.1 校正環境

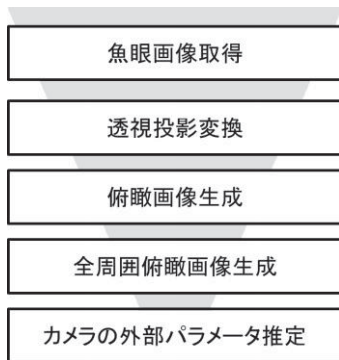


Fig.2 提案手法のフローチャート

3.1. 透視投影画像の生成

魚眼画像から透視投影画像への変換は Fig.3 の透視投影画像座標系における位置 $\mathbf{m}_p = [u_p \quad v_p]^T$ と魚眼画像座標系における位置 $\mathbf{m}_f = [u_f \quad v_f]^T$ の関係を求めることで

可能である[8]. ここで，透視投影モデルは

$$r_p = \delta_p \tan \theta \quad (7)$$

で表される．また，その像高は

$$r_p = \sqrt{u_p^2 + v_p^2} \quad (8)$$

と表される．式(7), (8)よりカメラの投影角 θ は

$$\theta = \arctan \left(\frac{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}}{\delta_p} \right) \equiv \theta(\mathbf{m}_p) \quad (9)$$

となり， $\mathbf{m}_p$ の関数となる．さらに光軸点のずれ $\mathbf{c} = [c_u \quad c_v]^T$ 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方位角 ϕ が等しいことから

$$u_f = \frac{r_f}{r_p} u_p + c_u, v_f = \frac{r_f}{r_p} v_p + c_v \quad (10)$$

が成り立つ．式(10)に式(5)(8)(9)を代入することにより

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_f &= \begin{bmatrix} u_f \\ v_f \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{k_1\theta(\mathbf{m}_p) + k_3\theta(\mathbf{m}_p)^3 + k_5\theta(\mathbf{m}_p)^5}{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}} u_p + c_u \\ \frac{k_1\theta(\mathbf{m}_p) + k_3\theta(\mathbf{m}_p)^3 + k_5\theta(\mathbf{m}_p)^5}{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}} v_p + c_v \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} F_u(\mathbf{m}_p, I) \\ F_v(\mathbf{m}_p, I) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

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

また，透視投影画像系における位置 $\mathbf{m}_p$ とワールド座標系における位置 $\mathbf{X}_w$ の関係は次のように表せる．透視投影画像座標系，焦点距離を1とした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

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

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

$$\mathbf{m}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p \quad (12)$$

と表すことができる．ここで， $\mathbf{A}_p$ 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。

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} \delta_p & 0 & c_{pu} \\ 0 & \delta_p & c_{pv} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

魚眼画像から透視投影画像への変換の際に，光軸のずれ $\mathbf{c}_p = [c_{pu} \ c_{pv}]^T$ は補正されているため $\mathbf{0}$ 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，

$$\mathbf{x}_p = [\mathbf{J} | \mathbf{0}] \mathbf{X}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X}_p \quad (14)$$

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は，

$$\mathbf{X}_p = {}^p\mathbf{M}_w \mathbf{X}_w \quad (15)$$

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(12)～(15)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，

$$\mathbf{m}_p = \mathbf{A}_p [\mathbf{J} | \mathbf{0}] {}^p\mathbf{M}_w \mathbf{X}_w = \mathbf{P}_p \mathbf{X}_w \quad (16)$$

と表すことができる。 $\mathbf{P}_p$ 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。

3.2. 俯瞰画像の生成

俯瞰画像の生成には，浅利らが提案した校正パターンを用いた手法[1]を利用する。既知の形状には浅利らと同様に正方形を用いる。3.1 節で生成した透視投影画像を平面射影変換により俯瞰画像に変換する。

3.2.1. 平面射影変換

平面射影変換は透視投影画像座標系における位置 $\mathbf{m}_p = [u_p \ v_p]^T$ から俯瞰画像座標系における位置 $\mathbf{m}_i = [u_i \ v_i]^T$ への変換で，同次座標を用いて次のように表現できる。

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$= \mathbf{H} \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix}$$

ここで， $\mathbf{H}$ はホモグラフィ行列と呼ばれる。このホモグラフィ行列 $\mathbf{H}$ を求めることで俯瞰画像を生成する。 $\mathbf{H}$ は地表面に設定された2次元座標とカメラで撮影された画像上の2次元座標との対応から求める。 $\mathbf{H}$ は自由度が8

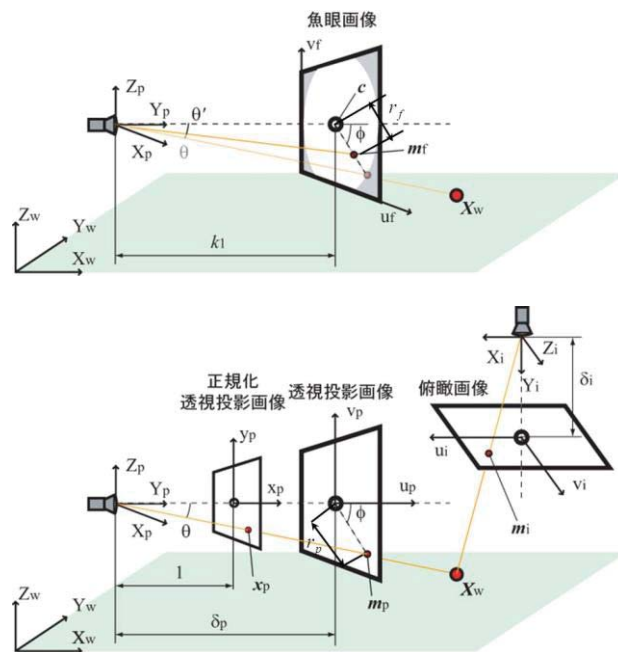


Fig.3 座標系

であるので，4点以上の対応を用いることで求めることができる。

3.2.2. 俯瞰画像の生成手順

処理の手順を Fig.4 に示す。カメラで撮影された画像中で校正パターンは変形した四角形として観測される。まず初めに校正パターンの中から一つを用いて形状が既知の形状となるように初期校正を行う。校正パターンの正方形の頂点 4 点からホモグラフィ行列の初期値を求める。次に，すべての校正パターンが既知の形状になるようにホモグラフィ行列の各要素を繰り返し演算により最適化する。撮像画面中に配置したすべての校正パターンが既知の形状として投影されるホモグラフィ行列を求めることで，カメラの撮像画面を地表面に投影した俯瞰画像を生成する。

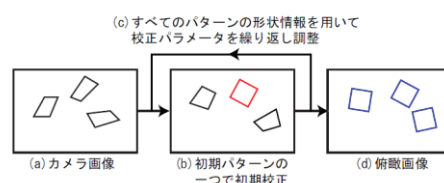


Fig.4 俯瞰画像の生成手順[1]

3.2.3. ホモグラフィ行列の最適化

ホモグラフィ行列の最適化では，ホモグラフィ行列の初期値を用いて他の校正パターンの特徴点に対して変換後の座標を求め，既知のパターン形状と変換後の形状との誤差を算出する。算出された誤差を繰り返し演算

によって最小化することによって最適な校正パラメータを求める。誤差の評価に関しては Fig.5 のように変換後の形状から次のように定式化する[1]。

$$D_1 = \sum_{\text{全パターン}} \sum_{\text{各パターン内}} |d_n|^2 \quad (18)$$

式(18)において、 d_n は変換後の形状が正方形の場合の座標値からの誤差であり、配置した校正パターンの特長点に対する誤差の総和を誤差の合計 D_1 としている。また誤差最小化アルゴリズムには滑降シンプレックス法を用いた。

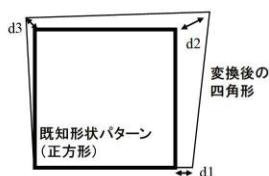


Fig.5 既知の形状と変換後の形状との誤差の算出[1]

3.3. 全周囲俯瞰画像の生成

3.1 節、3.2 節により求まる複数の俯瞰画像を合成する方法について述べる。俯瞰合成では、各カメラに撮像されている共通したパターン同士が一致するように最適化し、各々の俯瞰画像を全周囲俯瞰画像上でユークリッド変換する。

3.3.1. ユークリッド変換パラメータ

全周囲俯瞰画像上でのカメラ 1 の俯瞰画像の並進を T_1 、回転行列を R_1 とする。同様に、カメラ 2、カメラ 3、カメラ 4 の並進を T_2, T_3, T_4 、回転行列を R_2, R_3, R_4 とする。そうすると、各カメラの俯瞰画像座標 $m_{in}=[u_{in} \ v_{in}]^T$ は平行移動 T_n 、回転 R_n を用いて、次式により全周囲俯瞰画像座標 $m_{at}=[U_n \ V_n]^T$ に変換される

$$\begin{bmatrix} U_n \\ V_n \\ 1 \end{bmatrix} = R_t_n \begin{bmatrix} u_{in} \\ v_{in} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$R_t_n = R_n T_n$$

$$R_n = \begin{pmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n & 0 \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T_n = \begin{pmatrix} 1 & 0 & t_{un} \\ 0 & 1 & t_{vn} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

ただし、 n は各カメラ番号、 θ_n は各カメラ画像の回転角度 [deg]、 t_{un}, t_{vn} は各カメラの俯瞰画像の平行移動 [pixel] を表している。

3.3.2. ユークリッド変換パラメータの最適化

3.3.1 項で求めた R_t_n は俯瞰画像生成の過程において、様々な誤差要因により投影誤差が生じるため、 R_t_n に対して最適化処理を行う。Fig.6 に示すように各俯瞰画像中において対応する校正パターン同士の頂点との誤差を算出し、誤差の総和が最小化となる各カメラの並進及び回転パラメータ t_{un}, t_{vn}, θ_n を算出する。誤差の評価に関しては、各カメラにおいて対応するパターンの頂点同士との距離 d_n を誤差と定義し、その誤差の総和 D_2 を次式で定式化する。

$$D_2 = \sum_{\text{全パターン}} \sum_{\text{各頂点}} |d_n|^2 \quad (21)$$

但し、 n は各カメラにおいて対応する頂点の番号を表す。誤差最小化アルゴリズムには滑降シンプレックス法を用いた。

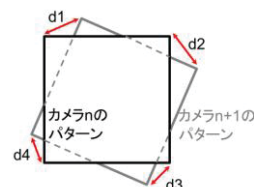


Fig.6 合成時の誤差の算出

3.4. 外部パラメータ推定手法

本節では、全周囲俯瞰画像を生成するために用いた既知の形状の校正パターンを利用してカメラの外部パラメータ推定する手法について述べる。

3.4.1. ワールド座標の設定

既知パターンはカメラの共通視野内に任意に配置されているため、パターン同士の位置関係が未知である。そこで、Fig.7 に示すように全周囲俯瞰画像からパターン同士の位置関係を決定する。全周囲俯瞰画像中の各パターンの頂点座標と各辺の長さは全周囲俯瞰画像を生成する際に求まっている。また、実環境においては校正パターンの各辺の長さが既知である。これらを利用して pixel 単位で表される全周囲俯瞰画像の座標系から mm 単位で表される実環境の座標系に単位変換する。そして、パターンの任意の 1 点をワールド座標系の原点としてワールド座標系を設定する。但し、パターンが同一平面上にあると仮定している。

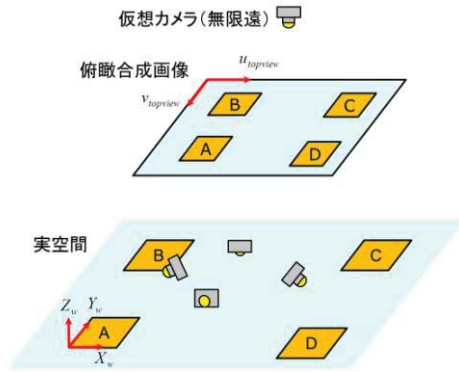


Fig. 7 ワールド座標系の設定

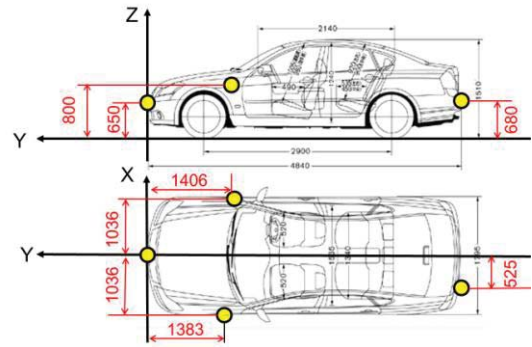


Fig.8 車載カメラの設置位置[9]

3.4.2. 外部パラメータの推定

外部パラメータは、観測点 P_i の透視投影画像座標における位置 $\mathbf{m}_{pi} = [u_{pi} \ v_{pi}]^T$ とワールド座標系における位置 $\mathbf{X}_{pi} = [X_{wi} \ Y_{wi} \ Z_{wi}]^T$ と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ピッチ角を θ_{cam} , ロール角を α_{cam} , ヨー角を 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・姿勢パラメータは、

$$\mathbf{E}_{cam} = [X_{cam} \ Y_{cam} \ Z_{cam} \ \theta_{cam} \ \alpha_{cam} \ \beta_{cam}] \quad (22)$$

となり、式(16)に含まれる。 $\mathbf{X}_{wi}$ を透視投影画像座標系に逆投影した点を $\mathbf{m}_{wi}$ とすると式(16)より、

$$\mathbf{m}_{wi} \equiv \mathbf{m}_{wi}(\mathbf{E}, \mathbf{X}_{wi}) \quad (23)$$

と表すことができる。よって評価関数

$$\xi_e = \sum_{i=1}^N \{\mathbf{m}_{pi} - \mathbf{m}_{wi}(\mathbf{E}, \mathbf{X}_{wi})\}^2 \quad (24)$$

を最小化する $\mathbf{E}$ を求める。 N は観測点数である。パラメータ推定には Levenberg-Marquardt 法を用いる。

4 実車実験

以上で提案した手法を用いて、全周囲俯瞰図の生成と車両に設置されている複数台の車載カメラの外部パラメータ推定を行った。CCD カメラは PointGreyResearch 社の Flea3 を、レンズはフジノン社の FE185C046HA-1 を用いた。FE185C046HA-1 の射影方式は等距離射影である。カメラの内部パラメータ $\mathbf{I}$ は奥津らが提案した球体を用いた校正手法[7]を用いて求めた。その結果を Table 1 に示す。本実験では、ソフトウェアの関係により 1328[pixel]×1048[pixel] の画像をリサイズして 668[pixel]×524[pixel]としている。

車載カメラの配置を Fig.8 に示す。Front カメラの真下

をワールド座標の原点とした。各カメラの外部パラメータを Table 2 に示す。この値は手動により計測したもので、本実験ではこれを真値として用いる。単位は X_{cam} , Y_{cam} , Z_{cam} が mm, θ_{cam} , α_{cam} , β_{cam} が deg である。カメラの光軸を Y 軸と一致させる。 θ_{cam} はカメラのピッチ角, α_{cam} はロール角, β_{cam} はヨー角であり、反時計まわりを正とする。外部パラメータ推定用の既知パターンには 1 辺が 1500[mm]の正方形を用いた。カメラの外部パラメータを推定する際の観測点の魚眼画像における位置は正方形パターンの各頂点であり、これを手動で取得している。

4.1. 全周囲俯瞰画像生成実験

適当な位置と向きで正方形パターンが配置された環境における全周囲俯瞰画像生成を 2 つの環境で行った。得られた魚眼画像を Fig.9 に、全周囲俯瞰画像を生成した結果を Fig.10 に示す。正方形パターンが概ね一致していることから、既知パターンを用いた全周囲俯瞰画像の生成ができることを確認した。

4.2. 外部パラメータ推定実験

4.1 節で生成した俯瞰画像を利用して、Front, Right, Left, Rear カメラの外部パラメータ推定を行った。Table 3, 4 に実験環境 1, 2 における推定値の誤差を示す。また、推定した位置を XY 平面と YZ 平面から見た図を Fig.11 に示す。ワールド座標の原点は Front カメラの真下に設定した。XY 平面を見ると、Right カメラと Rear カメラが大きく X 軸の正方向にずれていることがわかる。また、YZ 平面を見ると、Front, Rear カメラの高さ Z は概ね真値と同等の推定結果を得ることができた。Left, Right カメラに関しては、誤差が大きくなっている。

Table 1 カメラの内部パラメータの推定値

Cam	k_1	k_3	k_5	c_u	c_v
Front	169.259	12.315	-0.682	6.067	-26.046
Left	168.557	13.387	-0.618	3.707	-16.274
Right	171.517	10.166	-0.531	-5.541	-17.594
Rear	175.049	10.450	-0.961	21.724	-21.555

Table 2 カメラの外部パラメータ

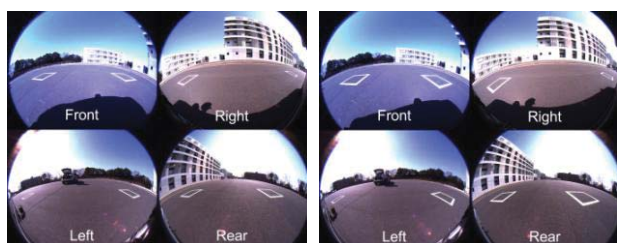
Cam	X_{cam}	Y_{cam}	Z_{cam}	θ_{cam}	α_{cam}	β_{cam}
Front	0	0	650	-18.3	0	0
Left	-1036	-1383	800	-20.1	2.0	-90.3
Right	1036	-1406	800	-20.2	2.3	88.2
Rear	-525	-4993	670	-20.9	0.1	180.1

Table 3 実験環境 1 における推定誤差

Cam	X_{cam}	Y_{cam}	Z_{cam}	θ_{cam}	α_{cam}	β_{cam}
Front	0.00	0.00	-1.19	-7.32	0.43	2.79
Left	60.42	-228.88	103.12	-14.25	-4.72	1.91
Right	743.79	261.85	24.33	-19.03	-10.35	4.63
Rear	591.00	32.54	-24.13	-4.44	2.40	10.76

Table 4 実験環境 2 における推定誤差

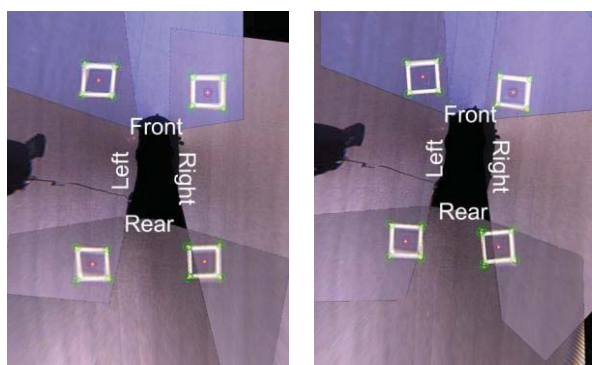
Cam	X_{cam}	Y_{cam}	Z_{cam}	θ_{cam}	α_{cam}	β_{cam}
Front	0.00	0.00	-11.32	-6.25	1.78	5.65
Left	-94.74	-83.96	4.07	-18.91	-4.68	0.80
Right	465.36	406.79	-107.80	-9.51	-12.24	1.34
Rear	392.11	359.19	-41.95	-2.41	1.41	6.96



(a)実験環境 1

(b)実験環境 2

Fig.9 魚眼画像



(a)実験環境 1

(b)実験環境 2

Fig.10 俯瞰合成結果

5 シミュレーション実験

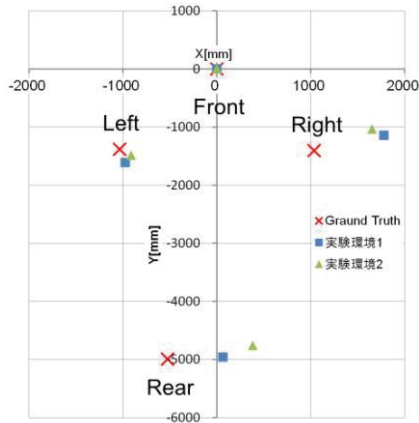
実車を用いて外部パラメータを推定した結果, 推定誤差が大きかった. そのため, 推定値の誤差の要因を検討するためにシミュレーション実験を行った. シミュレーションデータは実験環境 1 を想定して既知パターンを配置し, Table 1, Table 2 の内部・外部パラメータを使用した. そして, 既知パターンが魚眼画像に投影された際の既知パターンの頂点座標を特徴点として取得した. 以下では, 特徴点の誤差と内部パラメータの誤差が与える外部パラメータ推定値の誤差の要因を検討する.

5.1. 特徴点の誤差が与える影響

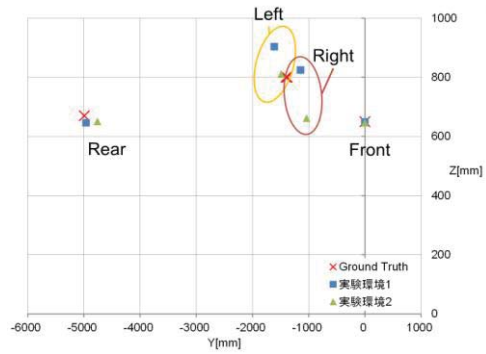
魚眼画像中のパターンの特徴点の誤差が外部パラメータ推定値に与える誤差の影響を検討した. まず, 魚眼画像中の特徴点にランダムに誤差を与えたものを入力として, 各カメラの外部パラメータ E_{cam} を推定した. そして, 推定したカメラの外部パラメータ E_{cam} と透視投影画像中の既知パターンの特徴点の座標値を用いて, 既知パターンをワールド座標系の $Z_w=0$ の平面に再投影した. Fig.12 に示すように再投影した既知パターンの特徴点($X_{r_n}, Y_{r_n}, 0$)からシミュレーションデータ作成時の既知パターンの特徴点($X_{w_n}, Y_{w_n}, 0$)までの再投影誤差 d_n を式(25)より算出した.

$$d_n = \sqrt{(X_{r_n} - X_{w_n})^2 + (Y_{r_n} - Y_{w_n})^2} \quad (25)$$

但し, n は頂点番号であり, 全パターンの特徴点に対して d_n を算出した. 入力時の特徴点に $\sigma=0, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0[\text{pixel}]$ のガウシアンノイズを与えた. それぞれのガウシアンノイズに対して再投影誤差を 100 回算出した. 結果を Fig.13 示す. 横軸は与えた誤差 $\sigma[\text{pixel}]$, 縦軸は再投影誤差 $d_n[\text{mm}]$ の平均と標準偏差を表している. Fig.13 より, 特徴点の誤差と再投影誤差はほぼ比例して大きくなるのがわかる. これは, 正方形の特徴点の誤差により, 俯瞰図にしたときに完全な正方形に戻らず, ワールド座標の設定の際に実際のパターンのサイズになってないことが考えられる. カメラごとに見ると, 再投影誤差は Front カメラが最小, Rear カメラが最大となり, Right・Left カメラではほぼ同等である. これは, ワールド座標系の原点からカメラが離れるほど再投影誤差が大きくなっていると考えられる.



(a)XY 平面



(b) YZ 平面

Fig.11 外部パラメータ推定結果

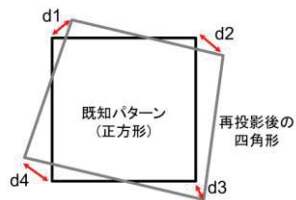


Fig.12 再投影誤差の算出

5.2. 内部パラメータの誤差が与える影響

内部パラメータの誤差が外部パラメータに与える影響を検討した。本実験では、内部パラメータの係数項が与える影響と光軸点のずれが与える影響の2つについて検討を行った。

5.2.1. 係数項の誤差が与える影響

入力時に内部パラメータの係数項 k_1, k_3, k_5 にそれぞれ $\sigma=0, 1, 3, 5, 7$ [%] のガウシアンノイズを与え、再投影誤差を算出した。その他の実験方法・再投影誤差の評価方法は5.1節と同様である。結果を Fig.14 に示す。横軸は与えた誤差 σ [%], 縦軸は再投影誤差 d_n [mm] の平均と標準偏差を表している。 Fig.14 より、係数項の

誤差と再投影誤差との関係は特徴点に誤差を与えた時と同様の傾向にある。係数項に誤差を与えた場合、魚眼画像を透視投影画像に変換すると透視投影画像上での既知パターンの見え方が異なるために、外部パラメータ推定に誤差が生じると考えられる。また、透視投影画像上でのパターンの見え方の変化により、特徴点が画像内に収まらないことがある。これも再投影誤差が大きくなる要因だと考えられる。このことから、外部パラメータだけでなく内部パラメータも同時に推定する必要があると考えられる。

5.2.2. 光軸点のずれの誤差が与える影響

入力時に光軸点のずれ $\mathbf{c}=[c_u \ c_v]^T$ に $\sigma=0, 0.2, 0.5, 0.7, 1.0$ [pixel] のガウシアンノイズを与え、再投影誤差を算出した。そのほかの実験方法・再投影誤差の評価方法は5.1節と同様である。実験結果を Fig.15 に示す。横軸は与えた誤差 σ [pixel], 縦軸は各特徴点の距離 d_n [mm] の平均と標準偏差を表している。 Fig.15 より、光軸点に誤差を与えた場合、ほかの2条件に比べて再投影誤差は小さいことがわかる。光軸点のずれは、魚眼画像を透視投影画像に変換した際、既知パターンの見え方には大きな変化はなく、画像上を並進するのみとなるため、ワールド座標の設定・外部パラメータの推定にそれほど影響しないと考えられる。

6 結論

既知パターンの正方形を用いることで簡便にかつ同時に複数魚眼カメラの外部パラメータを推定する手法の提案を行った。実車実験では外部パラメータ推定の誤差が大きかったが、シミュレーション実験より、頂点の誤差と内部パラメータの係数項の誤差が外部パラメータの推定に影響することを確認した。また、理想的なカメラモデルの時には手法で外部パラメータを推定することができることを確認した。今後は、外部パラメータ推定精度の向上や、魚眼画像から直接外部パラメータを推定する手法の検討を行う。

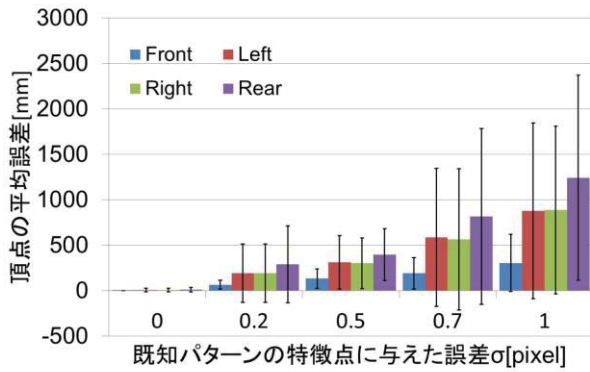


Fig.13 特徴点に誤差を与えた時の再投影誤差

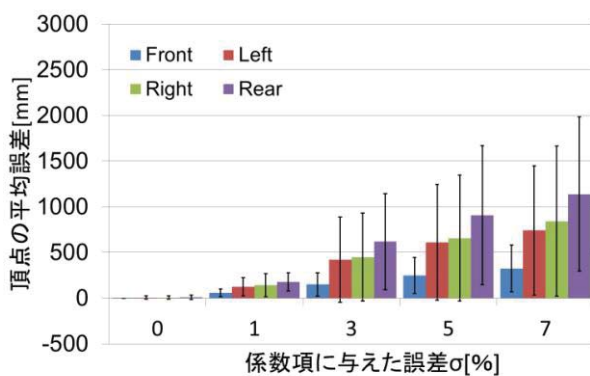


Fig.14 係数項に誤差を与えた時の再投影誤差

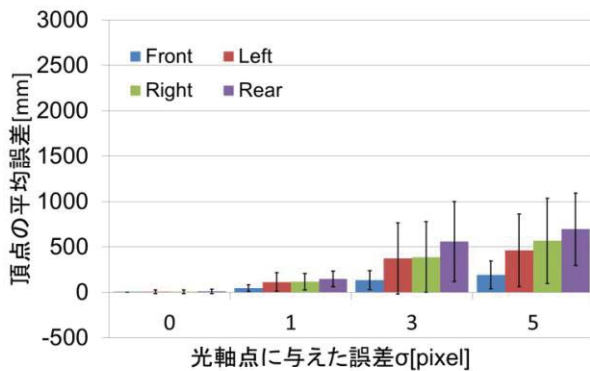


Fig.15 光軸点に誤差を与えた時の再投影

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, IN1-13, 2007.
- [2] Oizumi, K.: Development of “All-Around View” System, SAE Technical Paper Serise, 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, Vol.116, No.07, pp.17-22, 2007.
- [4] Z.Zhang, “A Flexible New Technique for Camera Calibration,” IEEE Transcation on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.10, pp.1330-1334, 2000.
- [5] Scaramuzza, D., Martinelli, A. and Siegwart, R., “A Toolbox for Easily Calibrating Omnidirectional Cameras”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), pp.5695-5701, 2006.
- [6] 加瀬翔太, 光本尚訓, 新垣洋平, 下村倫子, 梅田和昇: “複数の魚眼カメラを用いた俯瞰画像生成手法の構築”, 精密工学会誌, Vol.75, No.2, pp.251-255, 2009.
- [7] 奥津良太, 寺林賢司, 梅田和昇: “球体を用いた魚眼カメラのパラメータ校正”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J93-D, No.12, pp.2645-2653, 2007.
- [8] 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
- [9] 日産自動車, <http://www.nissan.co.jp/>