

校正マーカ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** 田中祐輝*** キアットアブデラジズ† 下村倫子† 増山岳人†† 梅田和昇†††

Pose Estimation of Multiple Fish-eye Cameras Using Calibration Markers

Hiroya OKAMOTO, Yuki TANAKA, Abdelaziz KHIAT, Noriko SHIMOMURA, Gakuto MASUYAMA and Kazunori UMEDA

There is a need for precise extrinsic parameters of vehicle mounted cameras in order to provide a good overhead view image to the driver. In this paper, we propose a simultaneous estimation of the extrinsic parameters of multiple fish-eye cameras using simple calibration targets. The proposed method estimates the parameters directly from the fish-eye images, giving more accurate results in comparison with a previous method that uses perspective projection converted images. Moreover, this method allows parameter estimation by simply arranging calibration targets anywhere around the vehicle. We conducted two experiments to quantitatively evaluate the estimation accuracy of the proposed method. In each experiment, two cases have been considered. In one case (the known case), targets' position were known beforehand. In the other case (the unknown case), targets' positions were unknown beforehand. In each experiment, the estimation error for the unknown case was 4-5 times bigger than the known case. In a simulation experiment, we compared the estimation accuracy of different target shapes, in order to identify the optimal shape of the target. The cubic shape turned out to be the most appropriate.

Key words: fish-eye camera, in-vehicle camera, extrinsic parameter, camera calibration, PnP problem, calibration marker

1. 序 論

近年、ドライバーが車両の周囲を確認しやすくするための車載カメラシステムが普及してきている。しかし、通常車載カメラ画像から車体と画像内に写る物体の間の距離を推測することは困難である。そのため、車両を真上から見たような画像(俯瞰画像)に変換し、それを合成することで車両の周囲の環境を直感的に把握可能とするシステムが提案されている¹⁾²⁾。これらのシステムでは、車両に搭載された複数台の魚眼カメラを用いて全周囲俯瞰画像を生成している。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。

従来研究として、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³⁾⁴⁾。しかし、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場合、生成される全周囲俯瞰画像中の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⁵⁾。この手法は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⁶⁾。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。

これらに対して我々は、持ち運べるサイズの平面の校正マーカを車両の周囲に任意に配置した環境において、全周囲俯瞰画像を基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している⁷⁾。本手法は、全周囲俯瞰合成画像よりマーカの世界座標系における3次元座標を算出し、魚眼画像を透視投影画像に変換した画像に対してPnP(Perspective n - Point)問題⁸⁾を解くことによりカメラの外部パラメータを推定する。この時、魚眼画像を透視投影画像に変換する際の誤差が外部パラメータの推定精度に影響する。そこで、本論文ではさらなる精度向上のために、魚眼画像から直接外部パラメータを推定する手法を適用し、複数カメラの外部パラメータを同時に推定する手法を提案する。この手法を適用し、シミュレーション実験⁹⁾から入力点の誤差に対する推定値の変化を考察することで、現状の問題点を抽出する。さらに、シミュレーション実験においてマーカの形状の違いによる外部パラメータの推定精度の比較を行うことで本手法に適するマーカの形状を検討する。最後に実車実験を行い、本手法が実際の環境にも適用可能であることを示す。また、その際の問題点を挙げる。

2. 魚眼カメラモデル

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 radと、画像上の像高(射影点の光軸からの距離) r pixelを用いて一般に表される。代表的なものは以下の二つである。

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

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

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

しかしながら、現実の魚眼レンズは、式(1)、(2)などの理想的な射影方式に厳密には従わない。そこで本論文では、Scaramuzza

* 原稿受付 平成26年5月12日

掲載決定 平成26年10月14日

** 中央大学大学院(現、日産車体(株))

*** 学生会員 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)

†† 中央大学(東京都文京区春日1-13-27)

††† 正会員 中央大学(東京都文京区春日1-13-27)

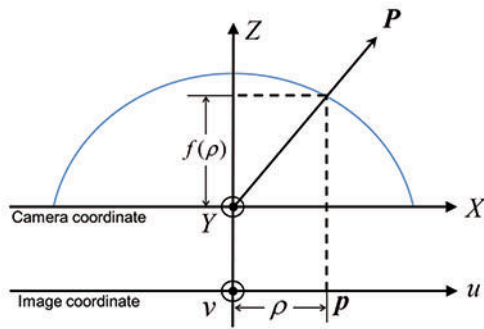


Fig.1 Fish-eye camera model

ら⁴⁾が提案している汎用的なカメラモデルを用いる。カメラモデルの概略を図1に示す。ある点のカメラ座標系における3次元位置 $P = [X \ Y \ Z]^T$ と画像座標 $p = [u \ v]^T$ 、画像中心 $p_0 = [u_0 \ v_0]^T$ の対応関係は次式のように表される。

$$P = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ f(\rho) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\approx$ は同次座標として等しいことを表す。 $\rho = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2}$ は画像座標 $p = [u \ v]^T$ の画像中心 $p_0 = [u_0 \ v_0]^T$ からの距離である。また、 $f(\rho)$ は ρ の多項式であり、次式のように表される。

$$f(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4 + \dots \quad (4)$$

本論文では、4次の項までの係数 a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 をカメラ内部パラメータとする。画像中心 $p_0 = [u_0 \ v_0]^T$ を含め各カメラの内部パラメータ I_i は

$$I_i = [a_{0i} \ a_{1i} \ a_{2i} \ a_{3i} \ a_{4i} \ u_{0i} \ v_{0i}]^T \quad (5)$$

となる。 i はカメラ番号である。

3. 魚眼カメラの外部パラメータ推定手法

本章では、立方体もしくは正方形の校正用のマーカーを用いて複数台の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。本論文では、内部パラメータを既知とした4台の魚眼カメラを校正対象とする。図2に示すように大きさが既知のマーカーを各カメラの共通する視野領域内に配置する。例えば、Camera1とCamera4の両方の画像にマーカーAが投影される。このような校正環境において、PnP問題を解くことにより、カメラの外部パラメータを推定する。外部パラメータは、ワールド座標系における各カメラの位置姿勢を表す。本研究では各カメラについて、図3のようにカメラの光軸をY軸に一致させ、ワールド座標系におけるカメラのピッチ角を α_{cam_i} 、ロール角を β_{cam_i} 、ヨー角を γ_{cam_i} 、カメラの位置を $[X_{cam_i} \ Y_{cam_i} \ Z_{cam_i}]^T$ とし、外部パラメータ E_i を次のように定義する。

$$E_i = [X_{cam_i} \ Y_{cam_i} \ Z_{cam_i} \ \alpha_{cam_i} \ \beta_{cam_i} \ \gamma_{cam_i}]^T \quad (6)$$

本論文ではマーカーの配置が既知の場合と未知の場合での外部パラメータ推定の精度比較を行う。マーカーの配置が未知の場合、まず各マーカーの位置関係を求め、マーカーの配置を知る

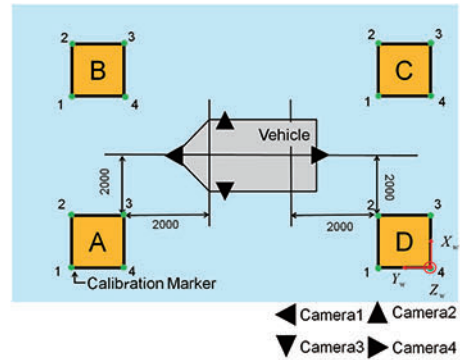


Fig.2 Calibration environment

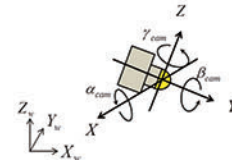


Fig.3 Camera coordinate system

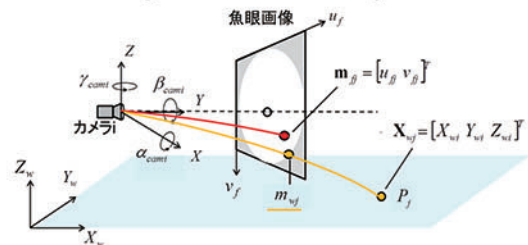


Fig.4 Reprojection on fish-eye image

必要がある。以下、校正に用いるマーカーの配置が既知である場合と未知である場合の2通りの外部パラメータ推定手法について述べる。

3.1 マーカーの配置が既知の場合

マーカーの配置が既知の場合、図2の1つのカメラに対し以下の流れで外部パラメータを推定する。下記の j は1枚の魚眼画像に投影される頂点の番号であり、その個数は各ターゲットの頂点の個数の2倍となる。

1. 2つのマーカーが投影された魚眼画像を取得する。
2. 魚眼画像座標系におけるマーカー頂点座標 $m_{fj} = [u_j \ v_j]^T$ を取得し、これを入力点とする。
3. ワールド座標系におけるマーカーの頂点座標 $X_{wj} = [X_{wj} \ Y_{wj} \ Z_{wj}]^T$ を魚眼画像座標系に再投影し、再投影点 $m_{wj} = [u_{wj} \ v_{wj}]^T$ を取得する。
4. m_{fj} と m_{wj} との再投影誤差の2乗和 D が最小となる外部パラメータ E_i を推定する。

上記の流れを車両に搭載された各カメラ i ($i = 1, 2, 3, 4$) に対して独立に行う。再投影誤差 D の具体的な算出方法について述べる。図4に示すように、再投影点 m_{wj} はカメラの内部・外部パラメータ I_i 、 E_i を用いて次式で表せる。

$$m_{wj} = \begin{bmatrix} u_{wj} \\ v_{wj} \end{bmatrix} = \frac{\rho}{\sqrt{X_{cj}^2 + Y_{cj}^2}} \begin{bmatrix} X_{cj} \\ Y_{cj} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ρ は式(4)より

$$f(\rho) = a_0 + a_1\rho + a_2\rho^2 + a_3\rho^3 + a_4\rho^4 \quad (8)$$

の ρ についての 4 次方程式の実数解を用いる。 $f(\rho)$ は図 1 と式 (3) より $f(\rho) = \frac{Z_{cj}}{\sqrt{X_{cj}^2 + Y_{cj}^2}} \rho$ で与えられる。 $\mathbf{X}_{cj} = [X_{cj} \ Y_{cj} \ Z_{cj}]^T$ は観測点 $\mathbf{P}_j$ のワールド座標系における位置 $\mathbf{X}_{wj}$ をカメラ座標系に変換したものであり、同次座標を用いて

$$\tilde{\mathbf{X}}_{cj} = M \tilde{\mathbf{X}}_{wj} \quad (9)$$

$$M = \begin{bmatrix} R & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix}$$

と表せる。 $\tilde{\mathbf{X}} = [\mathbf{X}^T \ 1]^T$ である。 R はロール角 β_{cami} 、ピッチ角 α_{cami} 、ヨー角 γ_{cami} の順番で回転させた 3×3 の回転行列、 $\mathbf{t}$ は 3 次元の並進ベクトルである。 R と $\mathbf{t}$ はカメラの外部パラメータ $\mathbf{E}_i$ から求まる。このとき、魚眼画像座標系に再投影した点 $\mathbf{m}_{wj} = [u_{wj} \ v_{wj}]^T$ は $\mathbf{E}_i$ 、 $\mathbf{X}_{wj}$ の関数で表すことができる。この再投影点の位置 $\mathbf{m}_{wj}$ と元の観測点の投影位置 $\mathbf{m}_{fj}$ の差の二乗和

$$D = \sum_{j=1}^N \|\mathbf{m}_{fj} - \mathbf{m}_{wj}(\mathbf{E}_i, \mathbf{X}_{wj})\|^2 \quad (10)$$

が最小となるように外部パラメータ $\mathbf{E}_i$ を推定する。 N は一枚の魚眼画像に投影される 2 つのマーカーの頂点の個数である。パラメータ推定には修正 Powell 法¹⁰⁾を用いる。

3.2 マーカーの配置が未知の場合

マーカーの配置が未知の場合、以下に示す流れで推定を行う。

1. 各マーカーに設定されたローカル座標系におけるカメラの位置姿勢を 3.1 節と同様に入力点と再投影点の誤差の 2 乗和が最小となるように推定する。
2. ある 1 つの任意のローカル座標系をワールド座標系にする。その他のマーカーの頂点座標を、推定した各マーカーに対するカメラの位置姿勢を介してワールド座標系に座標変換する。詳しい計算は下記に示す。
3. すべてのマーカーのワールド座標系における位置を求めた後に 3.1 節と同様の処理を行い、ワールド座標系におけるカメラの位置姿勢、つまり外部パラメータ $\mathbf{E}_i$ を求める。

上記の箇条書き 2 でのワールド座標系におけるマーカーの 3 次元位置算出方法について具体的に述べる。 k をマーカー名 A, B, C, D とし、各マーカーのローカル座標系における 3 次元位置を $\mathbf{X}_k = [X_k \ Y_k \ Z_k]^T$ 、ワールド座標系におけるマーカーの 3 次元位置を $\mathbf{X}_{wk} = [X_{wk} \ Y_{wk} \ Z_{wk}]^T$ とする。ローカル座標系からワールド座標系への変換は図 5 に示すように、各マーカーに対するカメラの位置姿勢 $Rt_{(i,k)}$ を用いて

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{X}}_{wA} &= M_A \tilde{\mathbf{X}}_A \\ \tilde{\mathbf{X}}_{wB} &= M_B \tilde{\mathbf{X}}_B \\ \tilde{\mathbf{X}}_{wC} &= M_C \tilde{\mathbf{X}}_C \\ \tilde{\mathbf{X}}_{wD} &= \tilde{\mathbf{X}}_D \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} M_A &= Rt_{(3,D)}^{-1} Rt_{(3,A)} \\ M_B &= M_C Rt_{(2,C)}^{-1} Rt_{(2,B)} \\ M_C &= Rt_{(4,D)}^{-1} Rt_{(4,C)} \end{aligned} \quad (12)$$

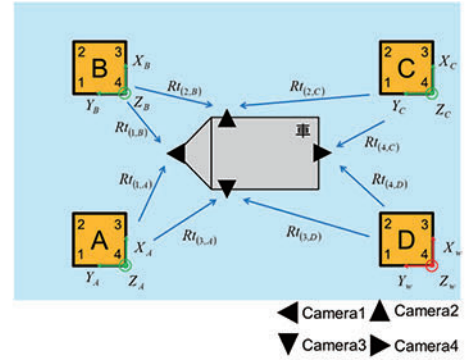


Fig.5 Pose estimation when positions of markers are unknown

と表せる。 $Rt_{(i,k)}$ は式 (9) の同次変換行列 M と同様に与えられる。本論文ではワールド座標系の原点を図 5 のマーカー D の 4 に配置した。

4. シミュレーション実験

3 章で示した外部パラメータ推定手法の精度評価のために、シミュレーション実験を行った。本実験では校正用のマーカーに立方体を用いて、マーカーの配置が既知・未知の場合の外部パラメータの推定精度を比較し、外部パラメータの推定精度に影響する要因を検討する。また、マーカーに正方形を用いて外部パラメータの推定を行い、マーカーの形状の違いによる推定精度の比較を行う。

4.1 シミュレーション実験条件

シミュレーション実験での実験条件を以下に示す。シミュレーションデータを作成する際の各カメラの外部パラメータ $\mathbf{E}_i$ を表 1 に示す。これは次章の実車実験で用いる値に合わせたものである。また、シミュレーション実験に用いる魚眼カメラモデルには 2 章のものではなく文献 9) で用いている以下のモデルを用いた。

$$\rho = k_1 \theta + k_3 \theta^3 + k_5 \theta^5 \quad (13)$$

奥津らが提案した球体を用いた校正手法¹¹⁾により実車実験の Camera1 の内部パラメータを求め、シミュレーションに用いた。これを表 2 に示す。なお、本シミュレーションでは、内部パラメータは真の値が得られると仮定し誤差を与えない。シミュレーションで用いるカメラが実車実験のカメラと同一であることと合わせ、カメラモデルが異なっていることは影響ない。校正用マーカーは実車実験に合わせ、1 辺が 1200mm の立方体であり、頂点の 8 点を特徴点とした。図 2 に示すようにマーカーを配置したと想定してシミュレーションデータを作成した。Camera1 における魚眼シミュレーション画像を図 6 に示す。入力画像のサイズは 1328×1048 pixel である。実験方法を以下に示す。魚眼画像に投影されたマーカーの頂点を入力点とし、入力点に対して $\sigma = 0, 0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 3.0$ pixel のガウシアンノイズを与え、3 章の手法により各カメラの外部パラメータ $\mathbf{E}_i$ を推定した。それぞれのノイズに対して 100 回試行し外部パラメータの真値と推定値との差の各要素の絶対値平均と標準偏差を算出した。

4.2 シミュレーション実験結果

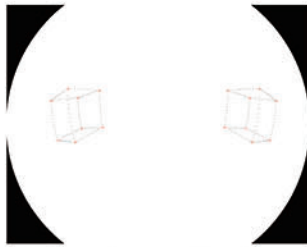
マーカーの配置が既知とした実験結果を図 7 に、未知とした結果を図 8 に示す。横軸は入力点に与えたガウシアンノイ

Table1 Extrinsic camera parameters E_i

Camera	X_{cam} mm	Y_{cam} mm	Z_{cam} mm	α_{cam} deg	β_{cam} deg	γ_{cam} deg
1	3500	7250	650	-20	0	0
2	2500	5800	800	-20	0	-90
3	4500	5800	800	-20	0	90
4	3500	2500	670	-20	0	180

Table2 Intrinsic camera parameters I_1

k_1	k_3	k_5	c_u	c_v
338.518	24.650	-1.364	12.134	-52.092

**Fig.6** Fish-eye image with cube markers

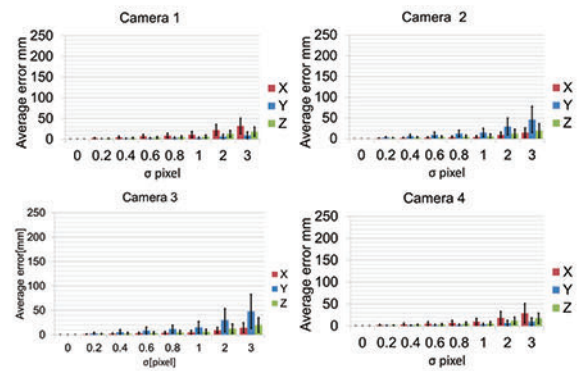
ズの σ pixel, 縦軸は位置の平均誤差 mm, 姿勢の平均誤差 deg である。エラーバーは標準偏差を示す。これらの結果から位置誤差, 角度誤差は入力点に与えた誤差の増加に伴い, ほぼ比例する傾向がみられた。マーカ配置が既知の場合, σ が 1 pixel 以下では, 位置に対して 10 mm 以下の誤差, 角度に対して 0.5 deg 以下の誤差であった。マーカの配置が未知の場合, σ が 1 pixel までの位置誤差は 50 mm 以下, 角度誤差は Camera1 のロール角 β_{cam1} を除いて, 1 deg 以下である。マーカの配置が既知と未知の結果を比較すると, 未知の場合の推定誤差は約 5 倍になり, 大きな誤差となった。この要因の 1 つとして, ワールド座標系におけるマーカの位置を推定する際に, 入力点に与えた誤差がワールド座標系におけるマーカの位置推定に伝播していることが考えられ, この改善を行うことで誤差は小さくなると期待できる。以上のことより, マーカの配置が既知であればある程度の精度は出るが, 未知の場合は対策が必要であると考えられる。一方で, 大きな誤差になったことから, 精度が求められる場合にはマーカの配置が未知である校正環境において本手法を適用するのは困難であることも考えられる。

4.3 マーカの形状の違いによる推定精度の評価

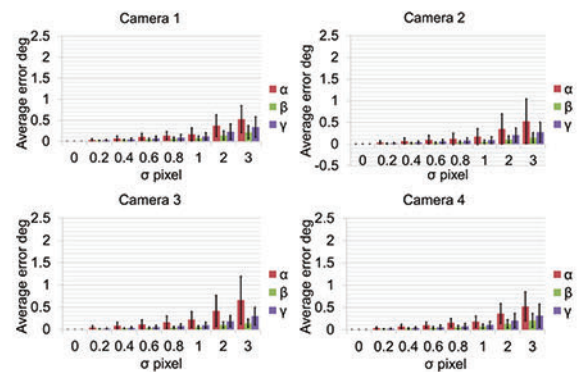
マーカの形状の違いによる推定精度の評価を行うため, 4.1 節の実験条件でマーカを以下の 2 つに変えてシミュレーション実験を行った。

- マーカ A: 各頂点を特徴点とした特徴点数が 4 点の正方形
- マーカ B: 各頂点と辺の中点を特徴点とした特徴点数が 8 点の正方形

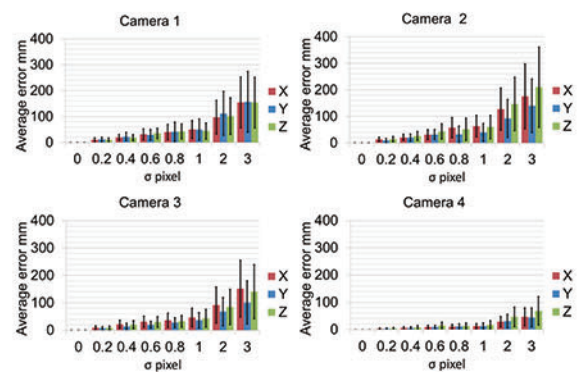
どちらの実験条件もマーカの配置は既知とした。Camera1 における魚眼シミュレーション画像を図 9 に示す。マーカ A を用いた実験結果を図 10 に, マーカ B を用いた実験結果を図 11 に示す。正方形の特徴点数を 4 点から 8 点にすると 20 % 程度誤差が低減されることがわかる。よって, 特徴点を増やすことで推定精度の向上を期待できる。また, 立方体の実験結



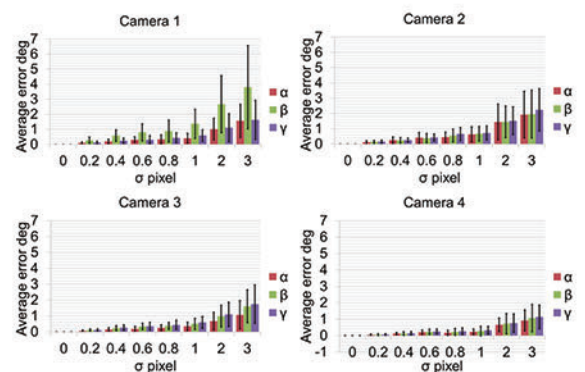
(a) Average error of position



(b) Average error of pose

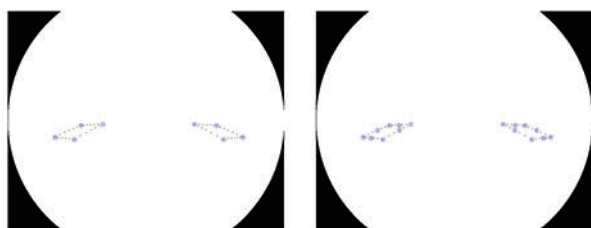
Fig.7 Simulation results when marker's position are known

(a) Average error of position



(b) Average error of pose

Fig.8 Simulation results when marker's position are unknown



(a) Marker A
Fig.9 Fish-eye images with square markers

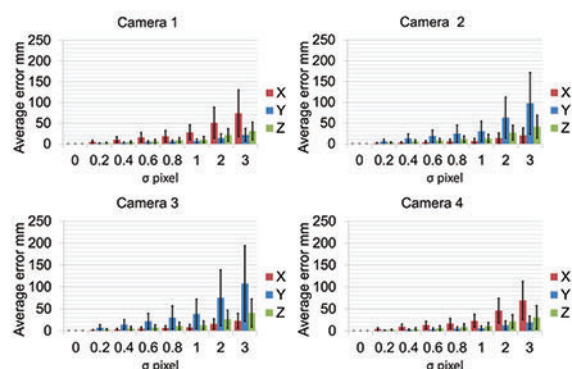
Table3 Intrinsic camera parameters I_i

Camera	a_0	a_1	$a_2(\times 10^{-4})$	$a_3(\times 10^{-7})$	$a_4(\times 10^{-9})$	u_0	v_0
1	-391.58	0.00	9.57	-6.12	1.14	689.61	569.30
2	-392.53	0.00	9.59	-6.14	1.14	685.09	556.87
3	-392.47	0.00	9.82	-6.78	1.20	677.74	554.75
4	-392.23	0.00	9.50	-6.92	1.12	686.47	577.17

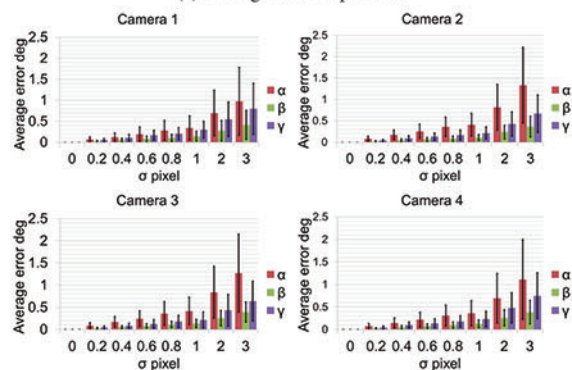
果図7と入力点が8点の正方形の実験結果図11と比較すると、特徴点数が同一にもかかわらず、正方形よりも立方体の方が、平均誤差が約1/2倍と小さくなっている。これは正方形の特徴点が画像全体に分布しているためだと考えられる。よって、マーカーの形状は平面である正方形よりも立体である立方体が適していると考えられる。

5. 実 車 実 験

本実験では、自動車に搭載されている4台の魚眼カメラと4.1節と同サイズの立方体を用いて、実環境におけるマーカーの配置が既知・未知の場合の外部パラメータの推定を行った。魚眼カメラの内部パラメータ I_i は Matlab で実装されている Scaramuzza らが提案した内部パラメータ推定手法⁴⁾を用いて推定した。推定したカメラの内部パラメータを表3に示す。マーカーにはパイプとジョイントから作成した立方体マーカーを用いた。魚眼画像に投影された立方体マーカーを図12に示す。また、実験に用いた入力画像の例を図13に示す。立方体の頂点はサブピクセル単位で手動により入力した。また、外部パラメータ推定における初期値はすべて0とした。本実験の評価には、推定した外部パラメータの世界座標系の原点を Camera1 の座標値で Z の値を0にした点として、Camera1 とその他のカメラとの相対的なカメラの位置姿勢を用いた。本実験での真値を表4に示す。マーカーの配置が既知の場合の推定誤差を表5に、未知の場合の推定誤差を表6に示す。表5より位置誤差は100mm以下、姿勢誤差は1deg以下となった。また、表6より、未知の時の位置誤差は既知の時に比べて約4倍程度大きくなった。角度誤差に関しては、1.5deg以下となり、既知の時と比べると約1.5倍の誤差となった。また、シミュレーション実験の結果である図7、図8と比較すると、入力点の誤差、すなわち魚眼画像に投影されたマーカーの頂点とその頂点を手動により入力した際のずれは、およそ3pixel程度に相当し、大きな誤差となっている。3pixelは入力点の誤差としては大きすぎることから、他の推定誤差要因があると考えられ、そのうちの一つにカメラの内部パラメータの誤差の影響が挙げられる。今後は厳密な魚眼カメラモデルの導入、より高精度な内部パラメータ推定手法の利用などが必要であると考えられる。

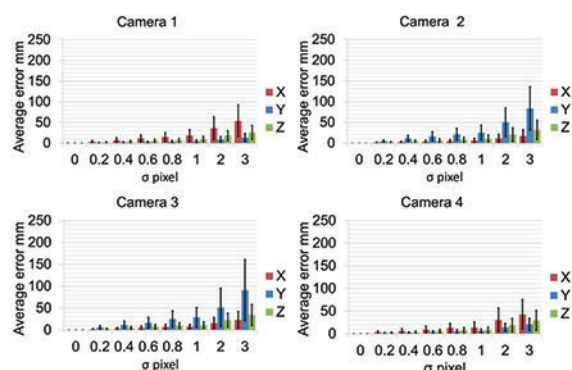


(a) Average error of position

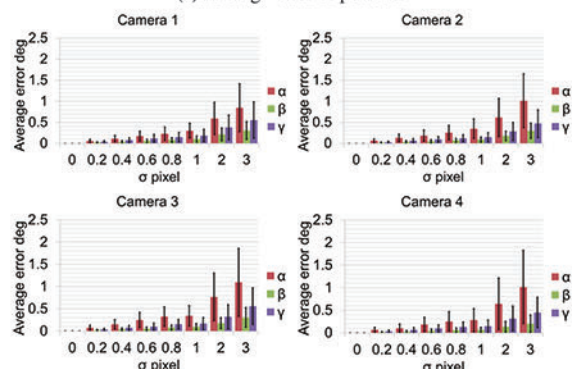


(b) Average error of pose

Fig.10 Simulation results when marker's positions are known with marker A



(a) Average error of position



(b) Average error of pose

Fig.11 Simulation results when marker's positions are known with marker B

6. 結 論

複数魚眼カメラの外部パラメータを推定する手法に魚眼画像から直接カメラの外部パラメータを推定する手法を適用し、シミュレーションによる精度評価と本手法に適するマーカーの形状の検討を行った。また、その結果を踏まえ立方体マーカーを用いて実車実験を行い、提案手法により実際の環境でも外部パラメータを得ることができることと内部パラメータの誤差が外部パラメータ推定に影響を与えられられることを示した。さらに、シミュレーション実験よりマーカーの配置が未知の時の推定誤差は既知の時と比べると5倍程度、実車実験では4倍程度と大きな誤差になったことより、マーカーの配置が未知の場合には対策が必要であることを示した。今後は、最適化を行う際の評価関数の改良やワールド座標系におけるマーカーの位置推定の際に全マーカーの同時最適化により、マーカーの配置が未知の場合での推定精度向上を目指す。また、実車実験により明らかになった課題の改善に取り組む。さらに、本手法により求めた外部パラメータを全周囲俯瞰画像生成などの実応用に用いることにより、本手法の有用性を検討する。

参 考 文 献

- 1) Oizumi, K.: Development of "All-Around View" System, SAE Technical Paper Serise, (2003).
- 2) 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**, 7, (2007) 17.
- 3) Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **22**, 10, (2000) 1330.
- 4) 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), (2006) 5695.
- 5) 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, **75**, 2, (2009) 251.
- 6) 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.
- 7) 岡本寛也, Abdelaziz Khiat, 下村倫子, 梅田和昇: 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, 第19回画像センシングシンポジウム予稿集, (2013) IS2-14.
- 8) 出口光一郎: カメラキャリブレーション手法の最近の動向, 情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), **1993**, 25, (1993) 1.
- 9) 岡本寛也, Abdelaziz Khiat, 下村倫子, 増山岳人, 梅田和昇: 校正マーカーを用いた複数魚眼カメラの外部パラメータ推定のシミュレーションによる精度評価, ビジョン技術の実利用ワークショップ講演文集, (2013) IS1-D5.
- 10) Powell, M.J.D.: An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives, Computer Journal, **7**, (1964) 155.
- 11) 奥津良太, 寺林賢司, 梅田和昇: 球体を用いた魚眼カメラの内部パラメータ校正, 電子情報通信学会論文誌, **93**, 12, (2010) 2645.

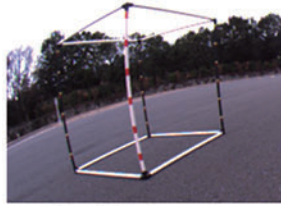


Fig.12 Cube marker

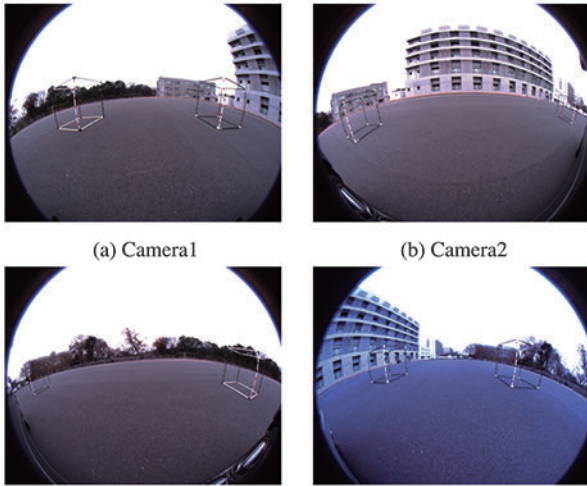


Fig.13 Samples of input images

Table4 Ground truth of extrinsic parameters $E_{i,gt}$

Camera	$X_{cam}mm$	$Y_{cam}mm$	$Z_{cam}mm$	$\alpha_{cam}deg$	$\beta_{cam}deg$	$\gamma_{cam}deg$
1	0.0	0.0	650.0	-19.1	1.1	-0.2
2	1060.0	-1355.0	800.0	-21.2	-90.0	-2.8
3	-1055.0	-1342.0	800.0	-19.8	90.2	-2.1
4	-510.0	-5060.0	650.0	-20.8	179.1	0.3

Table5 Error of extrinsic parameters $E_{i,error}$ when markers's positions are known

Camera	$X_{cam}mm$	$Y_{cam}mm$	$Z_{cam}mm$	$\alpha_{cam}deg$	$\beta_{cam}deg$	$\gamma_{cam}deg$
1	0	0	-0.4	0.6	-0.2	-1
2	-62.8	-77.3	4.4	0.5	-0.3	0.2
3	13.2	-76.3	19.1	-0.1	0.0	0.6
4	-32.6	97.7	-1.6	0.4	0.0	0.9

Table6 Error of extrinsic parameters $E_{i,error}$ when markers's positions are unknown

Camera	$X_{cam}mm$	$Y_{cam}mm$	$Z_{cam}mm$	$\alpha_{cam}deg$	$\beta_{cam}deg$	$\gamma_{cam}deg$
1	0.0	0.0	18.0	-0.1	1.3	-1.4
2	-121.0	-148.2	59.4	0.6	-0.1	1.1
3	82.1	-164.2	-22.1	-0.1	-0.5	-1.2
4	-30.0	-132.7	10.0	0.4	-0.3	0.7