

球面画像獲得のための魚眼カメラの校正

中野 誠士[†] 李 仕剛[†] 千葉 則茂[†]

Calibration of Fish-Eye Camera for Acquisition of Spherical Image

Masao NAKANO[†], Shigang LI[†], and Norishige CHIBA[†]

あらまし 本論文では、魚眼カメラ（半球以上の視野をもつ魚眼コンバージョンレンズを取り付けたカメラを本論文では魚眼カメラと呼ぶ）を用いて撮影した前後2方向の画像を接合して全天周球面画像を獲得するための、撮影シーン内の直線のもつ消失点の性質を利用した魚眼カメラのノンメトリックな校正手法を提案する。本手法ではまず、消失点の幾何的性質を利用して魚眼カメラの内部パラメータである画像上での光軸点位置と焦点距離の初期推定を行い、次に、2方向の撮影画像をそれぞれ球面上にマッピングして得られる二つの半球画像をパラメータの真値を用いて接合すると一つの球面画像になるという拘束条件を利用して、前後の撮影画像が重複部分の画像相関に基づくパラメータの微調整を行う。静止シーンの実画像による実験により本手法の有効性を示すとともに、本提案手法を利用して、全天周画像を実時間撮影できるシステムを構築した。

キーワード 全天周球面画像, 魚眼カメラ, カメラ校正, 没入型複合現実感

1. ま え が き

没入型複合現実感やウォークスルー可能な景観シミュレーションなどにおいては全天周の球面画像が有用である[1]~[3]。広い視野をもつ画像の獲得に関しては、多くの研究が行われている。

通常の狭い視野をもつカメラを用いて広域視野の画像を獲得する方法としてはカメラを回転して順次撮影した複数の画像をつなぎ合わせるイメージモザイクと呼ばれる手法がある[1], [2]。しかし、この手法で全天周球面画像を獲得する場合、全天周をカバーするために必要な画像数が多いと、それらの撮影画像から全天周画像を復元するための処理時間が長くなる。また、この手法では動的に変化する環境に対応できないため、インタラクティブな複合現実環境の構築には向いていない。

実時間応用においては、ミラーを利用した全方位視覚センサが広く使われている[4]~[7]。しかしこの装置では原理上画像にカメラ自身が写り込んでしまうため、全天周画像を獲得するのが難しい。

互いに視野を補い合う複数のカメラから構成された

カメラクラスタを用いる方法[8], [9]は動的な環境に対応できるが、カメラ台数が多くなると装置全体が複雑になり、処理時間が長くなる問題があるため、実時間処理タスクには、できるだけ少ないカメラで全天周視野を獲得する必要がある。

これに対して、撮影に半球以上の視野をもつ魚眼カメラを用いる方法ならば撮影方向は2方向だけで済む。前後2方向の画像から全天周画像を生成するIPIX社の製品[10], [11]が発売されているが、カメラの校正法を示しているものではないため、一般的な魚眼カメラの校正には利用できない。

カメラの校正に関する研究は多くなされているが、そのほとんどは平面画像をモデルとした手法である[12], [13]。Xiongら[14]は本研究と同じ等距離射影方式の魚眼レンズを用いたが、光学中心と焦点距離が視野の境界から大まかに推定されており、結果として真値に近いパラメータ初期値が得られないため、重なる画像の相関から魚眼カメラのパラメータを推定する際に人間が介入して初期値を変えながら繰返し探索を行わなければならない。また、Kannalaら[15]は校正用平面上に配した円形パターンの中心を特徴点として用いた魚眼レンズのメトリックな校正法を提案した。しかし、魚眼画像上では画像隅に向かうにつれて円形パターンは急激に小さくなるため、その中心を正確に

[†] 岩手大学大学院工学研究科, 盛岡市
Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka-shi, 020-8551 Japan

検出することは容易ではない。

そこで本論文は、半球以上の視野をもつ魚眼レンズは図 1 に示すような平行直線群の消失点（それらの直線が空間上の無限遠点で交わる点 [16], [17]）を直接視野内に観測可能であることを利用し、全天周画像を獲得するために前後 2 方向の撮影画像を接合するための、観測シーン内の平行直線をもつ消失点の幾何的な性質を利用した魚眼レンズのノンメトリックな校正法を提案する。校正のためのパターンとして用いる直線群の魚眼画像への投影曲線は画像内において検出しやすいという利点がある。本手法では、平行直線のもつ消失点对を結ぶ直線がレンズの光軸点を通る性質を利用して、他の魚眼カメラ内部パラメータと独立して、光軸点位置を算出することが可能である。更に、放射方向歪曲収差 (radial distortion) を考慮しない場合、消失点对が球面上になす角度が 180 度である性質 (図 1 参照) から魚眼カメラの焦点距離を簡単に算出することができる。本論文では、我々はまず、上記の性質を利用して、単体の魚眼カメラの光軸点位置と焦点距離を推定する。魚眼レンズに対して、消失点の性質を利用したこのような校正法はこれまで提案されていない。次に、前後 2 方向の撮影画像をそれぞれ球

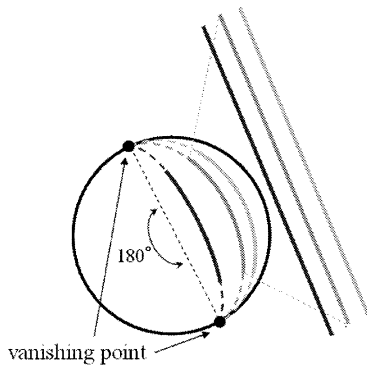


図 1 平行直線の消失点

Fig. 1 A pair of vanishing points of parallel lines.

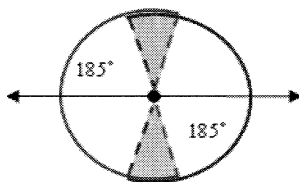


図 2 二つの半球画像がもつ重複領域

Fig. 2 Overlapped region of a pair of half spherical images with wider field of view than a hemisphere.

面上にマッピングして得られる二つの半球画像をパラメータの真値を用いて接合すると一つの球面画像になるという拘束条件を利用して、前後の撮影画像がもつ重複部分領域 (図 2) の画像相関に基づくパラメータの精度改善を行う。本論文では、放射方向歪曲収差を考慮していないが、後の実験結果が示すように、全天周画像を生成する際に画像のつなぎ合せを行う局所的処理にはほとんど影響しない。

以下、2. では本手法で用いる魚眼レンズの射影モデルと球面画像について、3. では提案する消失点を利用した魚眼カメラの校正手法について、4. では画像相関に基づくパラメータの調整について述べる。5. で実験結果を示す。

2. 球面画像と魚眼レンズの射影モデル

本研究における球面画像は、撮影地点を中心とする半径 1 の単位球面スクリーン上に周囲の環境を投影して得られる全天周画像である。図 3 のように、球の中心点 O を原点とする三次元座標における点

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

が球面上の点 \mathbf{p} に投影するとき、光線 PO の天頂角を θ 、方位角を ϕ とすると、

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{\rho} \mathbf{P} \quad (2)$$

である。ここで

$$\rho = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3)$$

である。本研究では像高 r_i が入射角 θ に比例する等距離射影方式 [18] (図 4 参照) の魚眼レンズを用いており、その射影式は

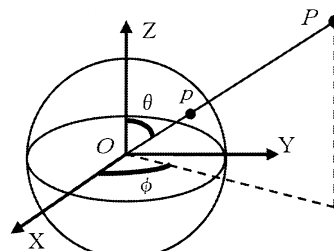


図 3 球面座標系

Fig. 3 3D coordinate system of sperical image.

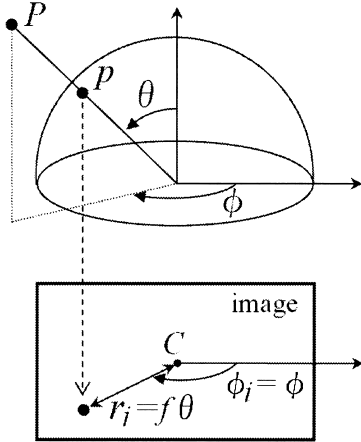


図4 等距離射影方式
Fig.4 Equidistance projection.

$$\begin{bmatrix} r_i \\ \phi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

である．ここで f はレンズの焦点距離， r_i は撮影画像中の光軸点の位置 (Optical Center) C からの距離である．

式 (2) と式 (4) から，魚眼カメラでの撮影画像上での位置 (r_i, ϕ_i) と，球面画像上の位置 p との対応は次式として得られる．

$$p = \left[\sin \frac{r_i}{f} \cos \phi_i \quad \sin \frac{r_i}{f} \sin \phi_i \quad \cos \frac{r_i}{f} \right]^T \quad (5)$$

3. 魚眼カメラの初期校正

本手法では，半球以上の視野をもつ魚眼カメラが実空間上で平行な直線群のもつ消失点对を撮影画像上にとらえることが可能であることを利用し，この消失点对のもつ幾何的性質を利用した校正を行うことにより，魚眼カメラの内部パラメータの初期推定値を獲得する．

3.1 消失点の検出

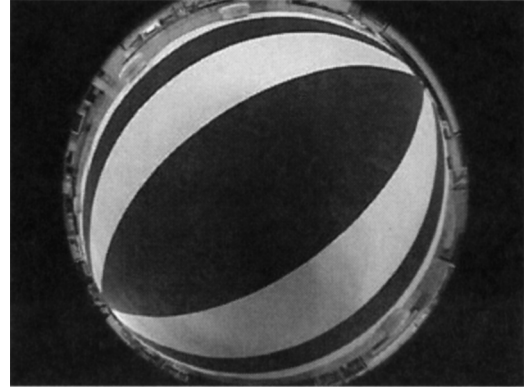
消失点の検出処理は以下のような流れとなる．

(1) パターン撮影 平行な直線群のもつ消失点对を撮影画像に映し込むために，魚眼カメラで図 5 (a) に示すような平行直線パターンを魚眼カメラで撮影する．図 5 (b) に示すように，実空間上での直線は撮影画像上には曲線として現れる．

(2) 曲線パラメータの獲得 消失点は実空間において平行な直線が無限遠で交わる点であるから，撮画像上での消失点の位置は，画像上に現れた曲線群の



(a)Parallel line pattern



(b)Fisheye image of parallel line pattern

図5 魚眼カメラの校正に用いる平行直線パターン
Fig.5 Parallel line pattern for calibrating fish-eye camera.

交点として算出できる．この交点算出に必要な曲線パラメータを獲得するために撮影画像上でのエッジ検出，エッジ追跡によって得られた各曲線を構成するエッジ点群 (図 6 (a)) を用いて，画像上の曲線を円錐曲線

$$a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4x + a_5y + a_6 = 0 \quad (6)$$

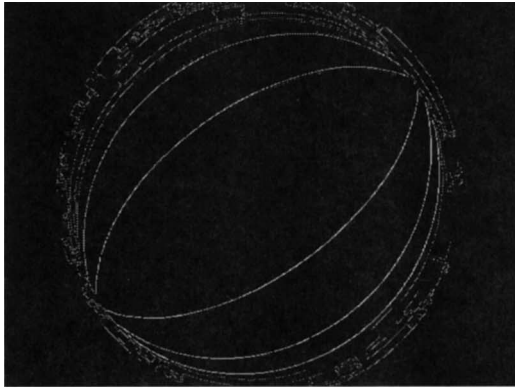
としたフィッティングを行う．フィッティングは誤差評価関数

$$\sum_i (a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4x + a_5y + a_6)^2 \quad (7)$$

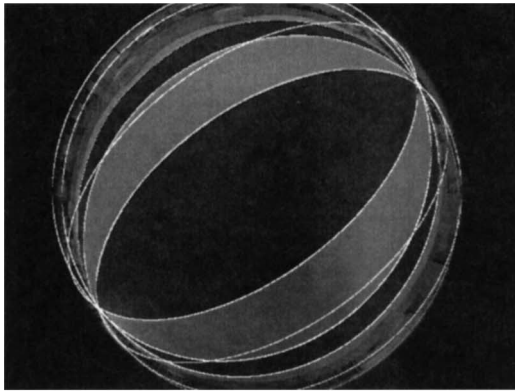
を，正規化のための条件 $a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2 = 1$ のもとで最小化することで行う．曲線フィッティングの結果を図 6 (b) に示す．

(3) 消失点位置の算出 消失点位置 $p_v = (x_v, y_v)$ は，理想的には推定された n 本の曲線のもつ共通交点であるが，実際には誤差等の影響のために全曲線が完全に同一の点を通らない．そこで消失点位置は誤差評価関数を

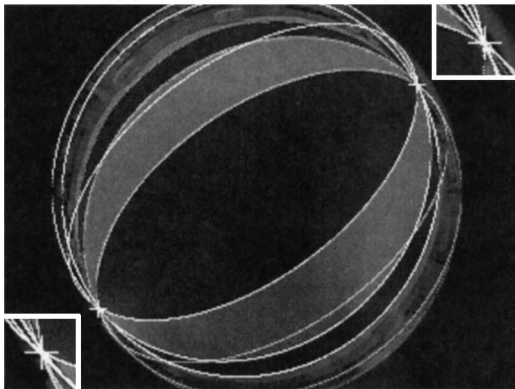
$$\sum_{j=1}^n (a_{1j}x_v^2 + a_{2j}x_vy_v + a_{3j}y_v^2 + a_{4j}x_v + a_{5j}y_v + a_{6j})^2 \quad (8)$$



(a) Detecting edges of line pattern



(b) Fitting conic curves to edges



(c) Estimating vanishing points

図 6 消失点位置の推定

Fig. 6 Estimating a pair of vanishing points on a captured pattern.

とする最小二乗法によって求める．消失点位置の算出結果を図 6 (c) に示す．

3.2 消失点を用いた内部パラメータの推定

本手法では，内部パラメータとして撮影画像上での光軸点位置 C と焦点距離 f を取り扱う．

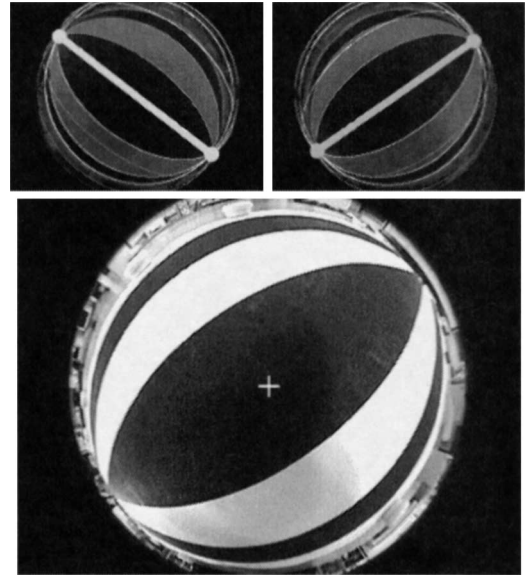


図 7 2 枚の画像の消失点からの光軸点位置推定結果．推定された光軸点の位置を + マークで示す．

Fig. 7 Optical center “+” estimated by using vanishing points on two images.

平行直線群のもつ消失点对は画像上では光軸点を介して正反対の方向に位置しているので，得られた消失点对を結ぶ線分は光軸点を通る．このことから，光軸点の位置は，図 7 に示すように直線パターンをおおよそ垂直な 2 方向について撮影し，それぞれの画像で求めた消失点对を結ぶ 2 線分の交点として算出することができる．

また，カメラの焦点距離 f は，式 (4) より，消失点間の距離 r_π から

$$f = r_\pi / \pi \tag{9}$$

として算出することができる．

3.3 外部パラメータの初期値

本手法では，画像対を同一地点から撮影しているため，外部パラメータとしては前後の画像撮影時のカメラの相対的な回転姿勢のみを考慮する．本論文では回転姿勢を 3 軸周りの回転角 r_x, r_y, r_z を用いて表す．2 方向を撮影したカメラが水平方向に 180 度反対方向を向いた理想的な姿勢を $(r_x, r_y, r_z) = (0, 0, 0)$ とし，撮影の際には図 8 に示す回転台を用いてカメラをおおよそ正確に 180 度回転しているため，外部パラメータの初期値には， $(r_x, r_y, r_z) = (0, 0, 0)$ を用いる．

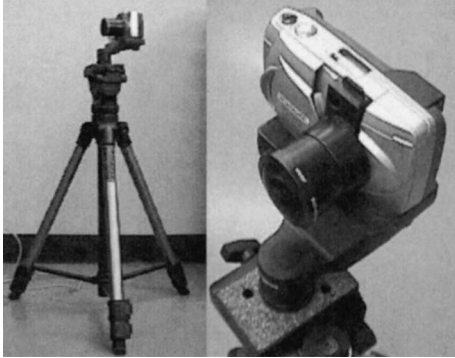


図 8 撮影装置の構成

Fig. 8 Fisheye digital camera on the turn table.

4. 画像相関に基づくパラメータの微調整

本魚眼カメラで撮影した画像は半球以上の視野をカバーしているので、ある方向を撮影した画像と、同一地点から逆方向を撮影した画像から得られる二つの半球画像を正しいパラメータ値を用いて結合すれば全天周の視野をもつ球面画像が得られる。

今、ある地点から左右方向を撮影したとすると、図 2 に示すように、それぞれ 185 度の視野をカバーしている左右の画像間には重複した部分が存在する。魚眼カメラのパラメータのベクトルを $\mathbf{V} = \{C, f, r_x, r_y, r_z\}$ とするとき、重複領域内における左方向撮影画像上の点

$$\mathbf{x}_l = \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \end{bmatrix} \quad (10)$$

に対応する右方向撮影画像上の点を、変換関数 T を用いて

$$\mathbf{x}_r = \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} = T(\mathbf{x}_l, \mathbf{V}) \quad (11)$$

と表すとすると、左画像上での位置 \mathbf{x}_l の画素値 $L_l(\mathbf{x}_l)$ と、それに対応した右画像上での位置 \mathbf{x}_r の画素値 $L_r(\mathbf{x}_r)$ について理想的に

$$L_l(\mathbf{x}_l) = L_r(\mathbf{x}_r) = L_r(T(\mathbf{x}_l, \mathbf{V})) \quad (12)$$

である。すなわち、パラメータの値が真値のとき、重複領域での画像相関が最大となる。そこで、3. で推定したパラメータ値を初期値として、重複領域の正規化画像相関

$$\frac{\sum \{ (L_l(\mathbf{x}_l) - \overline{L}_l) (L_r(T(\mathbf{x}_l, \mathbf{V})) - \overline{L}_r) \}}{\sqrt{\sum (L_l(\mathbf{x}_l) - \overline{L}_l)^2} \sqrt{\sum (L_r(T(\mathbf{x}_l, \mathbf{V})) - \overline{L}_r)^2}} \quad (13)$$

を最大化するパラメータ値の探索を行うことにより、パラメータ推定値の精度を高める微調整を行う。ここで $\overline{L}_l, \overline{L}_r$ は左右の画像における重複領域内の平均画素値である。

5. 実 験

我々は、まず、提案手法の有効性を確かめるため、市販されているデジタルカメラとそれに対応する魚眼レンズと回転台を用いて、静止シーンにおいて撮像した前後 2 方向の画像から全天周の球面画像を合成し、その結果を、用いた魚眼レンズに付属するソフトの結果と比較した。次に、連続撮像を行うためにビデオカメラに魚眼レンズを取り付け、この魚眼ビデオカメラを用いて撮影した前後の画像から全天周の球面画像を合成する実験を行った。最後に、2 台の魚眼ビデオカメラを背中合せに取り付けることで、動的なシーンに対応できる実時間全天周球面画像撮像システムを構築した。

実験結果として示す球面画像は、正二十面体を任意回数再分割して得られる測地ドーム [19] の頂点に六角形画素を配置する方法 [20] によるデータ構造をインプリメントし可視化を行った。実験結果の動画は [21] に掲載されている。

5.1 デジタル魚眼カメラを用いた実験

本実験では、Olympus のデジタルカメラ CAMELIA C-900 ZOOM に、対応する魚眼コンバージョンレンズ Olympus FCON-02 を取り付けることで魚眼カメラを構成した。

まず、3. の手法を用いて実験に用いる魚眼カメラの内部パラメータの初期推定を行った。一般的に、撮影した直線の撮影画像への投影曲線を検出する際に、エッジ画像から自動的に投影曲線をフィッティングするのは難しい。我々は実験のために図 9 に示す専用のソフトを作成し、これを用いて投影曲線に対応するエッジの抽出を手動で行い、他のエッジが直線の投影曲線のエッジとつながっている場合も、手動で指定した範囲内 (図 9 参照) のエッジ点のみをデータとして取得することで投影曲線のエッジだけを切り出し、不正確なエッジ点を排除した。そのようにして取得した部分的なエッジのうち同じ投影曲線に属するものを一

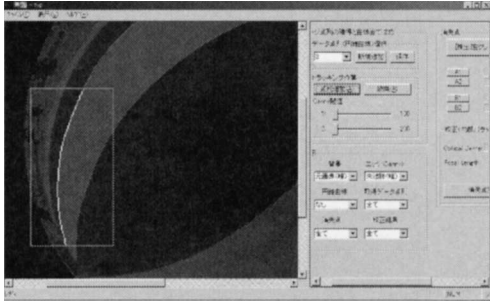


図 9 開発ソフトを用いたエッジ点の獲得
Fig. 9 Acquisition of edge data.

つにつなぎ合わせて消失点の推定に用いた．消失点の推定時に考えられる誤差要因としては，投影曲線に対応するエッジ検出の誤差が挙げられる．撮影画像上の投影曲線が短いほどその影響は大きくなるため，我々は直線パターン撮影の際は，直線が十分な範囲に写り込むようにカメラをパターンに近づけて撮影を行った．

次に，静止シーンにおいてこの魚眼カメラを用いて撮影した 2 方向の撮影画像から球面画像の合成を行った．シーンの撮影においては，同一地点からの 2 方向撮影を行うために図 8 のように魚眼カメラを魚眼レンズに付属の専用の回転台の上に取り付け，この状態で前方を撮影した後，この回転台を用いてほぼ正確に回転軸がレンズ焦点を通るようにカメラを逆方向に回転させ，後方を撮影した．撮影したシーンの画像を図 10 に示す．撮影画像の解像度はともに 640×480 pixel である．

この撮影画像を用いて，4. に示す方法によりパラメータの調整を行う際，実験においては，画像相関を計算する領域として，前後 2 方向の撮影画像内でもとも天頂角 $\theta < 92.5$ 度となる領域を用い，滑降シンプレックス法 [22] により式 (13) の相関関数の最大化を行いパラメータの調整を行った．本実験において相関の計算に用いた領域（最終的なパラメータ時）を図 12 (c) に，パラメータ調整の際の相関関数値の推移を図 11 に示す．

実験の結果として，消失点から推定したパラメータ初期値と最終的に得られたパラメータ値を表 1 (a) に，それらのパラメータ値を用いて作成した球面画像を図 12 (a), (b) に示す．パラメータ初期値を用いて作成した球面画像では，画像のつなぎ目部分にずれや重複が見られるのに対し，最終的なパラメータ値では画像のつなぎ目において視覚的な不一致のない結果が得



図 10 魚眼カメラによる前後 2 方向の撮影画像
Fig. 10 Two fisheye images acquired from the front and back sides.

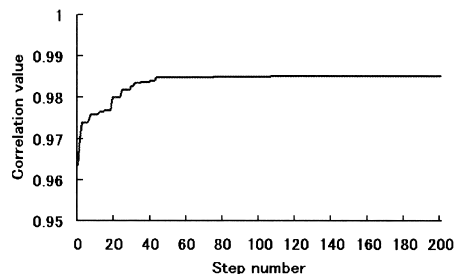


図 11 パラメータ調整の際の相関値の推移
Fig. 11 Convergence of correlation value.

られており，画像相関に基づくパラメータの改善がうまく働いているのが分かる．

また，本手法と同様に 2 方向の魚眼画像から球面画像を合成する製品 IPIX Wizard 2.2J [11] の出力結果との比較を図 12 (d) に示す．IPIX 社のソフトの結果を見ると，画像のつなぎ目の図内 A に示す位置で本来二つある窓枠が一つに統合されてしまっている．また図内 B に示す生垣上部のエッジは大きくずれている．それに対して本手法の結果においてはそれらに対応する位置（図内 A'，B'）においてよりうまく画像を接合できている．

表 1 実験で得られたカメラパラメータ
Table 1 Result of calibration.

(a) 単一デジタル魚眼カメラを用いた実験結果

	初期推定値	最終結果
光軸点位置 C	(307.45,240.90)	(306.14,240.36)
焦点距離 f [pixel]	128.59	128.16
回転姿勢 r_x, r_y, r_z [度]	0,0,0	1.35,-0.99,-0.63

(b) 単一の魚眼ビデオカメラを用いた実験結果

	初期推定値	最終結果
光軸点位置 C	(317.82,237.56)	(316.56,237.69)
焦点距離 f [pixel]	154.16	154.36
回転姿勢 r_x, r_y, r_z [度]	0,0,0	-0.29,0.01,1.01

(c) 実時間全天周撮像試作装置を用いた実験結果

	初期推定値	最終結果
カメラ 1		
光軸点位置 C	(158.91,118.78)	(158.91,118.78)
焦点距離 f [pixel]	77.08	76.31
カメラ 2		
光軸点位置 C	(158.07,118.22)	(158.07,118.22)
焦点距離 f [pixel]	77.55	76.77
回転姿勢 r_x, r_y, r_z [度]	0,0,0	-0.25,-0.75,-0.25

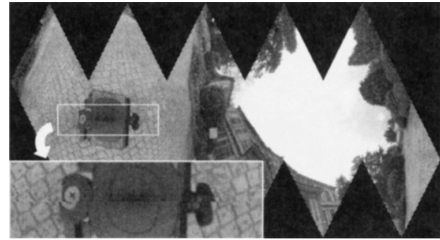
5.2 魚眼ビデオカメラによる実験

5.2.1 単体魚眼ビデオカメラによる実験

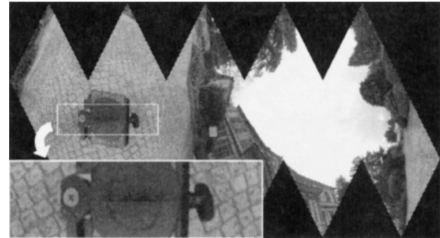
次に、図 13 の実時間撮影装置の作成に使用するための魚眼カメラを SONY の Digital Handycam に魚眼レンズを取り付けることで構成し、5.1 と同様の方法で静止シーンにおける撮影実験を行った。回転台に 5.1 の実験と同じ OLYMPUS 製カメラ専用のものを用いているため、図 14 に示すように、本実験においては回転軸とレンズの焦点の間にはずれがある。このため、図 10 において撮影画像に写り込んでいる回転台の回転軸が、本実験での撮影画像である図 15 (a) には写り込んでいない。本実験の球面画像合成結果画像である図 15 (c) において、カメラに近い床面に反射している蛍光灯が画像のつなぎ目部分において切れてしまっているのは、この撮影環境によって生じた死角により、本来つなぎ合せに用いられるべき回転台付近の領域が撮影画像から欠損していることと、2 方向を撮影したカメラ間の視点のずれによって撮影画像に生じた視差の影響を受けていることが原因であると考えられる。

5.2.2 実時間全天周撮像試作装置による動的シーンにおける球面画像の獲得

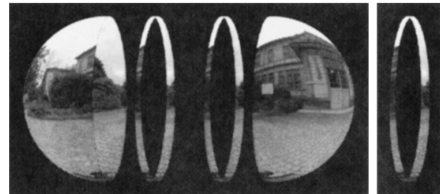
実時間で全天周視野の画像撮影を行うためには、2 方向の半球視野を同時に撮影する必要がある。そこ



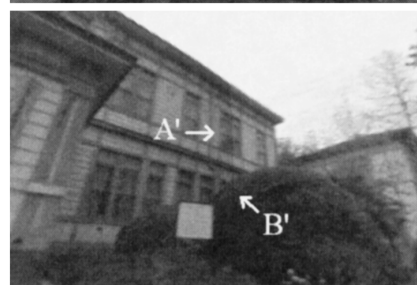
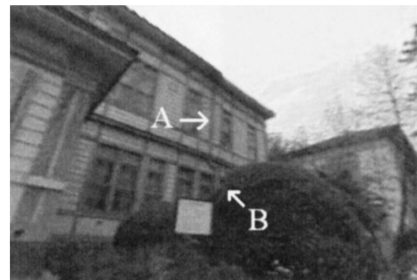
(a) Spherical image acquired by estimated coarse parameters



(b) Spherical image acquired by estimated fine parameters



(c) Left: Region used to calculate correlation. Right: Result of same region



(d) Result of IPIX Wizard 2.2J is shown in upper figure and Result of our method is shown in lower figure.

図 12 実験結果：静的屋外シーン

Fig. 12 Result of experiment in outdoor scene.

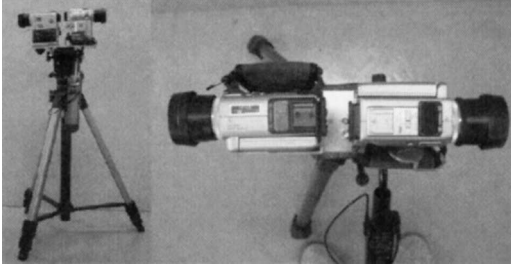


図 13 実時間全天周撮像試作装置
Fig. 13 The prototype of our real-time spherical image capture system.

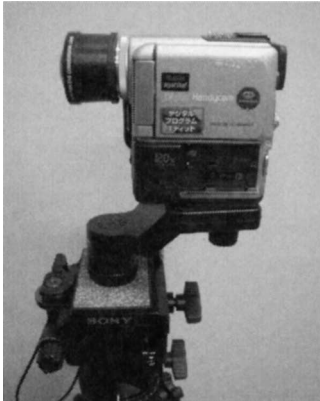


図 14 魚眼ビデオカメラ
Fig. 14 Fisheye video camera on the turn table.

で、2 台の魚眼ビデオカメラを背中合わせに固定した実時間全天周球面画像撮像装置を試作した。装置外観を図 13 に示す。

実験は、車上に試作撮像装置を設置して走行しながら撮影した画像群に本手法を適用することにより球面動画の作成を行った。ただし、本試作装置は 2 台の魚眼カメラの視点が一でないために撮影画像に視差が生じていることを考慮し、4. に示す方法による相関に基づくパラメータ微調整の際には、被写体がカメラに近く視差の影響が大きいと思われる画像下半部を評価対象にはせず、画像上半部のみの画像相関を用いた。結果を表 1 (c)、図 16 に示す。本実験における撮影画像解像度は 320×240 pixel である。

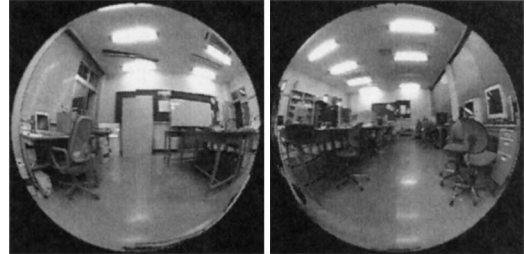
結果画像において、電線など距離の近い撮影対象にずれが生じてしまっているのは、撮影画像間に生じた視差が原因であると考えられる。

6. む す び

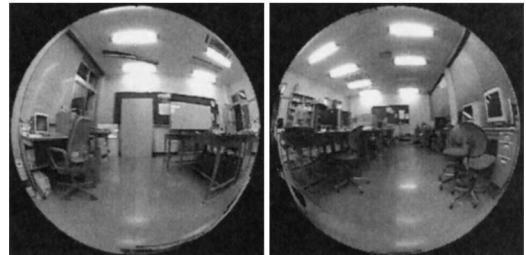
本論文は、消失点の幾何的性質を利用したカメラの



(a) Two fisheye image of opposite view



(b) Spherical image acquired by the coarse parameters



(c) Spherical image acquired by the fine parameters

図 15 実験結果：静的屋内シーン
Fig. 15 Result of the experiment in indoor scene.

パラメータの初期推定と、画像相関によるパラメータの微調整を組み合わせた全天周球面画像獲得のための魚眼カメラのノンメトリックな校正法を提案した。

本手法は 2 方向の撮影画像のみから全天周球面画像を獲得することができるため、インタラクティブな複合現実環境のようなリアルタイムの周囲環境提示を要するタスクに応用できる。

実験に用いた試作装置では共通な視点をもたないため画像間に視差が生じるという問題点があるが、その影響はカメラ間の位置のずれを短縮すれば軽減でき、一定距離以上離れているシーンに対してはほとんど影響しなくなる [8]。今後の課題の一つとして、よりサイズの小さいカメラを使用した装着可能な撮像装置を開発して、インタラクティブな複合現実環境の構築を試みたい。

また、本手法では画像相関の計算に用いる領域が狭いため、領域内の一部が不鮮明であったり明度差が大きいとその影響を受けやすく、撮影対象によってはパラメータの調整をうまく行えない場合がある。そのよ

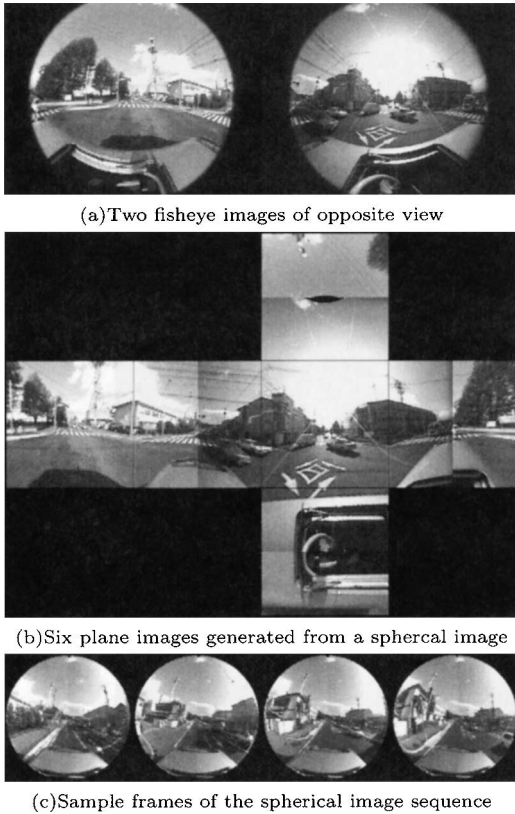


図 16 実時間全天周撮像試作装置を用いた動的なシーンの球面画像作成結果

Fig. 16 Result of the experiment with prototype of our real-time capture system.

うな場合にも対応できる手法の開発が今後の課題として挙げられる。

球面画像合成時における画像間の明度差の補正、校正パターンとして用いる直線の撮影画像への投影曲線の自動検出、今回扱わなかったレンズひずみなどのパラメータを取り扱うことで、半球画像の接合だけでなく、全体のひずみの少ない球面画像を獲得することも今後の課題としたい。

文 献

- [1] S. Coorg and S. Teller, "Spherical mosaics with quaternions and dense correlation," *IJCV*, vol.37, no.3, pp.259–273, 2000.
- [2] A. Kropp, N. Master, and S. Teller, "Acquiring and rendering high-resolution spherical mosaics," *Proc. IEEE Workshop on OmniVision*, pp.47–53, 2000.
- [3] S. Li, F. Ishizawa, and N. Chiba, "Wandering in VR environment by estimating head pose using an omniscam," *Proc. 10th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pp.1126–1132, 2002.
- [4] S.B. Kang, "Catadioptric self-calibration," *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.201–207, 2000.
- [5] S. Nayar, "Catadioptric omnidirectional camera," *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.482–488, 1997.
- [6] Y. Yagi, S. Kawato, and S. Tsuji, "Real-time omnidirectional vision for robot navigation," *Trans. Robot. Autom.*, vol.10, pp.11–22, 1994.
- [7] Y. Yagi, W. Nishizawa, K. Yamazawa, and M. Yachida, "Rolling motion estimation for mobile robot by using omnidirectional image sensor HyperOmniVision," *Proc. Pattern Recognition*, pp.946–950, 1996.
- [8] R. Swaminathan and S.K. Nayer, "Nonmetric calibration of wide-angle lenses and polycameras," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol.22, no.10, pp.1172–1178, 2000.
- [9] 遠藤隆明, 谷川智洋, 広田光一, 広瀬通孝, "超多眼カメラによる全天周画像の再構成," *情処学論*, vol.43m, no.SIG11(CVIM5), pp.43–52, 2002.
- [10] FIT, <http://www.fit-movingeye.co.jp>
- [11] IPIX, <http://www.ipix-jp.ne.jp/index.shtml>
- [12] Brauer-Burchardt and C. Voss, "A new algorithm to correct fish-eye- and strong wide-angle-lens-distortion from single images," *Proc. ICIP*, pp.225–228, 2001.
- [13] F. Ddvernay and O. Faugeras, "Straight lines have to be straight," *Machine Vision and Applications*, vol.13, pp.14–24, 2001.
- [14] Y. Xiong and K. Turkowski, "Creating image-based VR using a self-calibrating fisheye lens," *Proc. CVPR*, pp.237–243, 1997.
- [15] J. Kannala and S. Brandt, "A generic camera calibration method for fish-eye lenses," *Proc. ICPR*, pp.10–13, 2004.
- [16] T. Kanade, "Geometrical aspects of interpreting images as a three-dimensional scene," *Proc. IEEE*, vol.71, no.7, pp.789–802, 1983.
- [17] S. Li, S. Tsuji, and M. Imai, "Determining camera rotation from vanishing points of lines on horizontal planes," *Proc. ICCV*, pp.499–502, 1990.
- [18] 早水良定, "魚眼レンズ, $f\theta$ レンズ等における平行高専束の結像," *光機器の光学*, pp.39–41, 日本オプトメカトロニクス協会, 東京, 1989.
- [19] B.K.P. Horn, *Robot vision*, MIT Press, 1989.
- [20] 木室義彦, 長田 正, "球面六角形画像ピラミッドを用いた球面投影による全方位画像処理," *日本ロボット学会誌*, vol.14, no.6, pp.809–819, 1996.
- [21] <http://cv.lk.cis.iwate-u.ac.jp/~li/webData/FILE.htm>
- [22] J.A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization," *Comput. J.*, vol.7, pp.308–313, 1965.

(平成 16 年 9 月 17 日受付, 17 年 1 月 24 日再受付)



中野 誠士

平 13 岩手大・工・情報工学卒．平 15 同
大大学院工学研究科修士課程了．現在，同
大学院工学研究科博士課程在学中．



李 仕剛

1985 年 7 月中国北京精華大学電機工程
卒．1987 来日．1993 阪大大学院博士課程
了．同年大阪大学基礎工学部助手．広島市
立大学情報科学部助教授を経て，現在，岩
手大学工学部助教授．コンピュータビジョ
ン，ロボットビジョン，映像メディア，複
合現実などの研究に従事．博士（工学）．



千葉 則茂 （正員）

昭 50 岩手大・工・電子卒．昭 50～53（株）
日本ビジネスコンサルタント（現（株）日
立情報システムズ）勤務，昭 59 東北大
大学院博士課程情報工学専攻了（工博）．以
降，東北大学工学部助手，仙台電波高専情
報工学科助教授，岩手大学工学部情報工学
科助教授を経て，平 3 同教授．コンピュータグラフィックスに
関する研究に従事．情報処理学会，IEEE，ACM 等各会員．