

基礎論文

全方位型マルチカメラシステムを用いた高解像度な 全天球パノラマ動画の生成とテレプレゼンスへの応用

池田 聖^{*1}, 佐藤 智和^{*1}, 横矢 直和^{*1}

Generation of a High-resolution Spherical Movie

Using an Omnidirectional Multi-camera System and Its Application to Telepresence

Sei IKEDA^{*1}, Tomokazu SATO^{*1} and Naokazu YOKOYA^{*1}

Abstract – In the field of mixed reality, virtualization of real outdoor scenes is widely investigated for a number of applications such as telepresence and walk-through systems. An omnidirectional multi-camera system is more useful for virtualizing outdoor scenes than a single camera system, because the multi-camera system can easily capture high-resolution omnidirectional images. However, the exact calibration of the system is necessary to virtualize the real world accurately. In this paper, we describe a method for generating a high-resolution panoramic movie by calibrating an omnidirectional multi-camera system geometrically and photometrically. In experiments, a spherical panoramic video has been successfully computed to show the validity of the proposed calibration method. Finally, we show a prototype of telepresence system using an immersive display.

Keywords : Omnidirectional Multi-camera System, Camera Calibration, Panoramic Image Generation, Telepresence

1 はじめに

全方位ビデオ映像を用いることで遠隔地の様子を利用者に提示し、自由な見回しを可能とするテレプレゼンスシステム [1] は、エンターテインメントや医療、教育などの様々な分野で応用が期待されている。このような全方位ビデオ映像を撮影するための全方位画像センサとして、既に広く普及している通常のカメラにアタッチメントを取りつけることで、比較的容易に全方位画像を獲得できる曲面ミラー [2, 3] や広角レンズ [4, 5] を用いる方式が、これまで広く用いられてきた。しかし、これらの方式では全方位の画像を1台のカメラで撮影するために、解像度や視野角の不足、視線方向による解像度の不均等が問題となる。

これに対して、複数のカメラを外向きに配置することで全方向を撮影する全方位型マルチカメラシステム [6, 7, 8, 9] は、システムが複雑となる反面、高い解像度の画像が取得でき、また視線方向による解像度の偏りが少ないという特徴を持つ。このような全方位型マルチカメラシステムから得られる画像を用いて、臨場感の高いテレプレゼンスを実現するためには、高い精度でカメラ間の幾何学的及び光学的なキャリブレーションを行い、視覚的に違和感の少ない高解像度なパノラマ画像を生成する必要がある。従来の全方位型マルチカメラシステムのキャリブレーション手法には、カメ

ラシステムに固有の設計パラメータを使用することを前提としたもの [10, 11, 12] が多く、一般的全方位型マルチカメラシステムに適用し正確なキャリブレーションを行うことは困難である。また、没入型の大型スクリーンに投影された繰り返しパターンを使用する手法 [10, 11] は、各カメラに対して奥行き方向に広くマーカを配置することが困難であるため、キャリブレーション結果が画像上の量子化誤差やマーカ位置の検出誤差に対して敏感になるという問題がある [13]。一方、市販のマルチカメラシステムの多くには、専用のパノラマ画像生成ソフトが付属しているが、キャリブレーション手法の詳細は公開されておらず精度が不明な場合がある [8]。

本論文では、臨場感の高いテレプレゼンスを実現するために、一般的なカメラモデルを基に全方位型マルチカメラシステムの高精度なキャリブレーションを実現し、高解像度なパノラマ動画を生成する手法を提案する。また、実際に試作したテレプレゼンスシステムへの応用例を示す。提案手法では、まず、全方位型マルチカメラシステムの幾何学的および光学的なキャリブレーションを行い、次にキャリブレーション結果を基にして全天球パノラマ動画を生成する。システムの幾何学的なキャリブレーションでは、設計パラメータを用いず、物体表面の三次元位置を計測可能なレーザ計測器トータルステーションとキャリブレーションボードを使用して各カメラに対して空間的に広くマー

^{*1} 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

^{*1} Nara Institute of Science and Technology

力を配置することでキャリブレーション精度の向上を図る。また、光学的なキャリブレーションでは各カメラの明度低下現象とカメラ間の色調を補正する。次に、撮影対象が十分に遠方にあることを仮定して、上記のキャリブレーションの結果に基づいた画像のつなぎ合わせを行う。これにより、違和感の少ない高解像度な全天球パノラマ動画像を生成する。

以下2章では、全方位型マルチカメラシステムの幾何学的及び光学的キャリブレーションについて述べる[14]。3章では、キャリブレーション結果に基づいた全天球パノラマ画像の生成方法について述べ、カメラ間の視差の影響について考察する。4章では、実際にLadybugのキャリブレーションを行い、パノラマ画像を作成する。また、パノラマ画像の幾何学的なつながり具合について定量的な評価を行う。5章では、高解像度な全天球パノラマ動画像の応用例としてテレプレゼンスシステムの試作結果を示し、提案手法により生成したパノラマ動画像によって臨場感の高いテレプレゼンスが実現できることを示す。最後に、6章で本論文をまとめる。

2 全方位型マルチカメラシステムの キャリブレーション

本研究では、全方位型マルチカメラシステムとして、上方を含む6台のカメラによって全方位の撮影が可能なPoint Grey Research社製のLadybug[8](図1)を用いる。Ladybugは、図1(左)に示すような水平方向に5個、上方向に1個のCCDカメラを配置した小型カメラヘッドと、図1(右)に示すHDDアレイによる蓄積ユニットから成り、全方向の約75%以上を最大20分の動画像として15fpsで撮影できるシステムである。

全方位型マルチカメラシステムのキャリブレーションは、幾何学的キャリブレーション、光学的キャリブレーションの順に行う。幾何学的キャリブレーションでは、まず入力画像の歪み補正などに用いる内部パラメータの推定を行い、次に各カメラの外部パラメータとしてカメラの位置および姿勢を推定する。光学的キャリブレーションでは、まず明度低下現象の補正に使用するパラメータの推定を行い、次にカメラ間の色調補正に使用するパラメータを推定する。以下、幾何学的キャリブレーションおよび光学的キャリブレーションについて詳述する。

2.1 幾何学的キャリブレーション

幾何学的キャリブレーションでは各カメラの幾何学的なカメラパラメータである内部パラメータ(焦点距離、レンズ歪み、歪み中心、アスペクト比)と外部パラメータ(カメラの位置、姿勢)の推定を行なう。外部パラメータに関してはカメラ間の位置及び姿勢の関係を得るために全てのカメラについて統一した座標系での

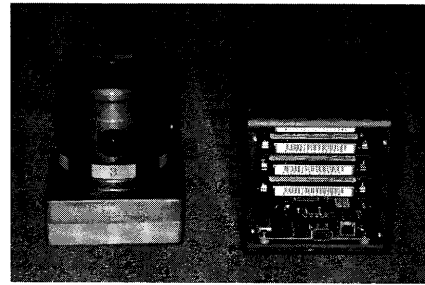


図1 Ladybugのカメラヘッド(左)と蓄積ユニット(右)

Fig.1 Camera head (left) and storage unit (right) of Ladybug.

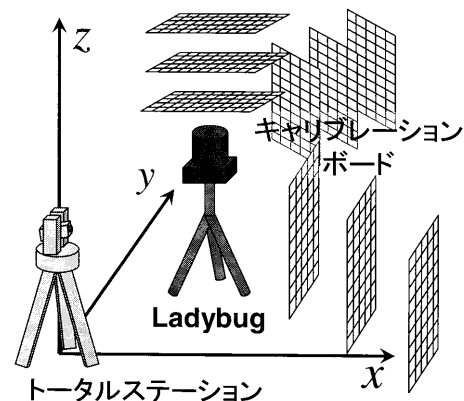


図2 キャリブレーションボードの配置

Fig.2 Arrangement of calibration board.

推定を行う。

提案手法では、これらを正確に推定するために、システムの全方向に三次元位置関係が既知のマーカを多数配置する。まず、マーカの配置方法について述べる。本手法では、マーカとして図2に示すようなキャリブレーションボードに印刷された格子模様の交点を用いる。マーカの三次元位置は、キャリブレーションボードの3隅の格子点をトータルステーションで計測し、線形補間によって求める。キャリブレーションボードは図2に示すように、各カメラに対して奥行き方向に移動させ、その都度三次元位置の計測と、キャリブレーションボードの撮影を行なう。これにより、多数のマーカの空間的な配置が容易に実現できる。全てのカメラでマーカボードを撮影し終わるまで、トータルステーションによって張られる世界座標系を統一することで、システムの全方向にマーカを同時に配置するのと同等のデータを得ることができる。また、画像上での格子点の位置は、二値化により検出された格子線領域に二つの直線を当てはめ、それらの交点を算出することで求める。これによりサブピクセルの精度で格子点の画像上の座標を検出し、キャリブレーション精度の向上を図る。

次に、各パラメータの推定方法について述べる。内部パラメータの初期値はあらかじめ各カメラについて Tsai の手法 [15] を用いて推定しておく。ただし、歪み係数については 3 次係数 κ_3 まで考慮し精度向上を図る。各カメラの外部パラメータは、佐藤らの方法 [16] により、線形演算と非線形最適化により画像上の投影誤差を最小化することで求める。本手法では各カメラの外部パラメータを、世界座標系におけるカメラ c ($c = 0, 1, \dots$) の位置 \mathbf{T}_c と姿勢 \mathbf{R}_c を用いて、世界座標系からカメラ座標系への変換行列 \mathbf{M}_c として以下のように表わす。

$$\mathbf{M}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_c & \mathbf{T}_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

本手法では、 \mathbf{M}_c を求めるために、マーカ m ($m = 1, 2, \dots$) の三次元位置 \mathbf{x}_m とカメラ c の入力画像上での位置 \mathbf{u}_m とを対応づけ、線形的な手法 [17] を用いて世界座標系からカメラ座標系への変換行列 \mathbf{M}'_c を計算する。しかし \mathbf{M}'_c の自由度は 12 となり \mathbf{R}_c が正規直交基底を成さない。そこで、真のカメラ位置が推定された光軸上に存在すると仮定して、線形演算により 6 自由度に補正された変換行列 \mathbf{M}_c を得る。最後に、マーカの三次元位置を画像上に投影した座標 \mathbf{v}_m とマーカの入力画像上での位置 \mathbf{u}_m との二乗距離 (以降、再投影誤差) の和で表現される評価関数

$$E_c = \sum_m (\mathbf{u}_m - \mathbf{v}_m)^2 \quad (2)$$

を勾配法によって最小化することで、カメラの内部及び外部パラメータを決定する。

2.2 光学的キャリブレーション

光学的なキャリブレーションでは、明度低下現象の補正とカメラ間の色調補正を行う。一般的な全方位型マルチカメラシステムでは、それぞれのカメラで広角レンズによって広い視野の画像を取得するため、画像の周辺部分が暗くなる明度低下現象が生じる。明度低下現象として、広角レンズ特有の $\cos^4 \theta$ 現象 [18] と望遠レンズに特有の口径蝕現象 [19] が知られているが、広角レンズを用いたレンズ系では前者の影響が支配的であるため、ここでは $\cos^4 \theta$ 現象のみを考慮する。本研究ではレンズ径の実測値 l と幾何学的キャリブレーションで求めた焦点距離 f を使用し、以下の式を用いることで $\cos^4 \theta$ 現象を補正する [18]。ただし、 I, I' は明度低下現象補正前後の画素の輝度値、 θ はカメラの光軸に対する入射光の角度である。

$$I' = \frac{\pi l^2 \cos^4 \theta}{f^2} I \quad (3)$$

次に、カメラ間の色調の補正手法について述べる。一般に撮像面上の放射照度 J は物体表面の放射輝度 L

に対して線形的な関係 $J = aL + b$ を持つとされている。これに基づけば、異なるカメラ c と c' の撮像面上における放射輝度 I_c と $I_{c'}$ の間にも、 $I_{c'} = a_c I_c + b_c$ の線形的な関係があると考えられる。本手法では、上式で示す輝度モデルを仮定し、RGB 各チャンネルに対して輝度補正を行うことで色調を補正する。輝度補正を行うために、照明条件を固定した同じシーンを撮影することで各カメラ c の変換係数 a_c, b_c を推定する。変換係数は、カメラ c の画像と基準カメラ c_0 の画像の輝度 i に関する正規化ヒストグラム $h_c(i), h_{c_0}(i)$ を一致させるように決定する。すなわち、評価関数:

$$e(a_c, b_c) = \sum_i \left\{ h_{c'}(i) - \frac{1}{a_c} h_c \left(\frac{i - b_c}{a_c} \right) \right\}^2 \quad (4)$$

を定義し、これを最小化することで各カメラの a_c, b_c を推定しカメラ間の輝度を補正する。

3 全天球パノラマ画像の作成

本章では、前述の手法によって得られるキャリブレーション結果を基に、入力画像から球面透視投影画像としてパノラマ画像を作成する方法について述べる。また、カメラ間の視差 (投影中心のずれ) の影響について考察する。

3.1 パノラマ画像の作成方法

図 3 にパノラマ画像生成手順を示す。まず前章で述べた明度低下現象の補正およびカメラ間の色調補正を行う。次に、仮想的な球面に対して幾何学的なキャリブレーション結果を基に補正された入力画像を投影する。最後に、球面上に投影された画像を正距円筒図法により平面に展開し、パノラマ画像を生成する。以下では、仮想的な球面への画像の投影手法について述べる。

一般に、カメラを放射状に配置するマルチカメラシステムでは、各カメラの投影中心は一致せず、図 4 に示すように視差が発生するために厳密な一点透視投影に基づく継ぎ目のないパノラマ画像を作ることは不可能である。しかし、撮影対象までの距離がカメラの投影中心間の距離に比べて十分大きい場合は、視差の影響が相対的に小さくなるため、各カメラの投影中心が一致していると見なすことができる。ここでは撮影対象が十分遠方に存在するものと仮定し、投影面である仮想的な球面 S の半径を十分に大きく設定する。球面の中心は全てのカメラの投影中心の重心位置 G に設定する。このような仮定の下で、各画像上の全て画素を球面 S に投影することでパノラマ画像を生成する。ただし、球面 S 上の点 s に対応する入力画像が複数存在する場合、複数の画像が滑らかにつながるように画像間のブレンド処理を行う。点 s のカメラ c に対応する画像面上への投影位置 u_c での輝度値を $I_c(u_c)$ とし、その点に最も近い入力画像の端面上の点までの距離を

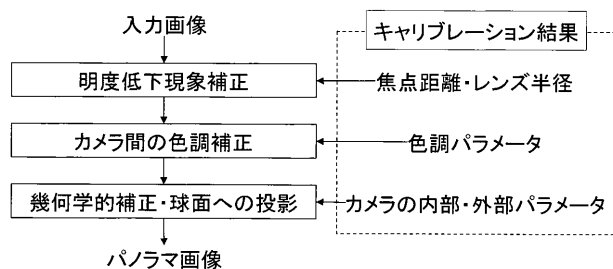


図3 パノラマ画像の生成手順

Fig.3 Flow diagram of generating a panoramic image.

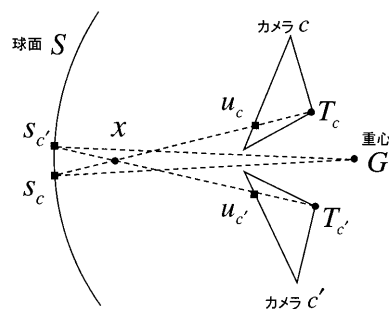


図4 視差の影響

Fig.4 Effect of disparity.

γ_c とすると、点 s の輝度値 $I_S(s)$ は、点 s からの投影が可能なカメラの集合を $C(s)$ として以下の式で表現される。

$$I_S(s) = \frac{\sum_{c \in C(s)} \gamma_c I_c(u_c)}{\sum_{c \in C(s)} \gamma_c} \quad (5)$$

3.2 視差の影響

本節では、カメラ間の視差の影響を調べるために、視差の影響がパノラマ画像上で1画素以内に収まる対象物までの距離について考える。図4に示すように撮影対象 x が2つのカメラ c, c' 上の点 $u_c, u_{c'}$ に撮影されたとき前述の手法では、球面 S 上の $s_c, s_{c'}$ に投影され、2重にずれた画像が生成される。球面 S の円周長が N 画素で構成されているとすると、 $\angle s_c G s_{c'} < \frac{2\pi}{N}$ であれば、視差の影響は1画素以内に収まる。球面 S を無限遠に設定すれば $\angle s_c G s_{c'} \sim \angle s_c x s_{c'}$ となるので、 $\angle T_c x T_{c'} < \frac{2\pi}{N}$ という条件を満たす範囲に撮影対象 x が存在すればよい。

ここで2台のカメラの投影中心間の距離を d 、カメラ間のベースラインから撮影対象までの距離 λ とし、各カメラから撮影対象 x までの距離が等しい場合に限定すると、視差の影響が1画素以下となる撮影対象までの距離 λ は以下の式で表現できる。

$$\lambda > \frac{d}{2 \tan \frac{\pi}{N}} \quad (6)$$

例えば、本研究で用いた Ladybug の場合、隣り合うカメラの投影中心間の距離を 40mm、球面へ投影された画像の円周長を 3840 画素と設定すれば、視差の影響が1画素以内に収まる距離 λ は、約 24m である。

4 実験

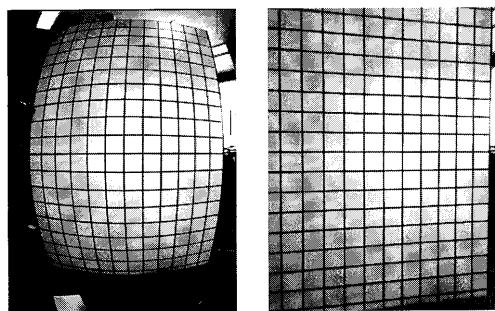
提案手法を用いて実際に Ladybug のキャリブレーションを行い、パノラマ動画像を作成した。本章では、個々のキャリブレーション結果の確認、パノラマ動画像の作成、テレプレゼンスシステムの試作、定量的な評価実験について順に述べる。

4.1 Ladybug のキャリブレーション

Ladybug の幾何学的なキャリブレーションでは、Ladybug を三脚に固定し、キャリブレーションボードをカメラの奥行き方向に約 50cm 間隔で移動させ、各カメラごとに6回撮影した。これにより各カメラに対して合計平均約 800 個のマーカの三次元位置と画像上の位置を取得した。マーカの三次元位置は、先に2章で述べたように、キャリブレーションボードの3隅の格子点を LEICA 社製のトータルステーション TCR1105XR で計測することにより算出した。また、色調補正におけるカメラ間の輝度変換係数 a_c, b_c の推定に使用する画像は、各カメラの画角内に写るシーンが同じになるように、カメラシステムを回転させカメラごとに取得した。その際に、鏡面反射光を含まないシーンを用いることで、各カメラの撮影位置の微妙なずれによる照明条件の変化を最小限に抑えた。

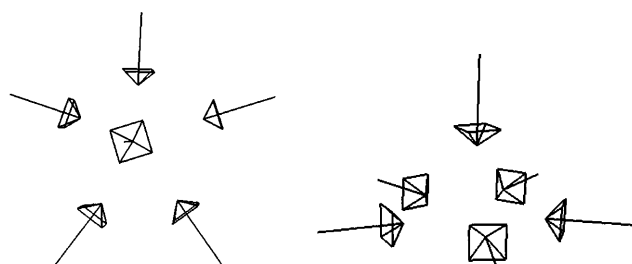
まず、推定した内部パラメータを用いた入力画像の歪み補正結果を図5に示す。同図より格子模様が直線に戻っていることから、おおむね正しく内部パラメータが推定されていることが確認できる。次に、推定した外部パラメータを用いて描画した各カメラの位置および姿勢の関係を図6に示す。四角錐の頂点はカメラの投影中心を、頂点から出る直線はカメラの光軸を、四角錐の底面はカメラの光軸周りの回転を表す。また、表1に、2.1節で述べたカメラパラメータ推定における評価関数である平均再投影誤差の平方根を示す。同表では、カメラ5が上向きカメラを、それ以外は水平方向のカメラを表している。表1に示した各カメラの平均再投影誤差が小さいことから、おおむね正しく外部パラメータが推定されていることが確認できる。

次に、図7に明度低下現象の補正結果を示す。同図(a), (b)の比較により、補正前の画像では周辺部分の輝度値が全体的に低下しているのに対して、補正後の画像ではそれらがある程度補正されていることが確認できる。図8は、色調補正前後でブレンド処理なしにパノラマ画像を生成し、画像のつなぎ目部分を比較したものである。同図から色調補正前に比べて補正後の



(a) input image (b) corrected image

図5 レンズ歪み補正
Fig. 5 Lens distortion correction.



(a) top view (b) front view

図6 各カメラの位置および姿勢の推定結果
Fig. 6 Estimated position and orientation of each camera.

表1 各カメラの平均再投影誤差 [pixel]
Table 1 Average reprojection error [pixel]

カメラ番号	0	1	2
平均再投影誤差	1.83	3.83	4.81
カメラ番号	3	4	5
平均再投影誤差	3.31	2.99	3.31

パノラマ画像では、画像の境界が目立たなくなっていることが確認できる。

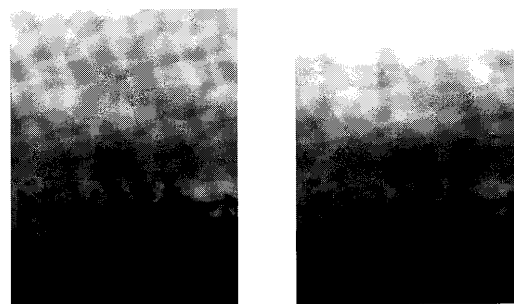
4.2 全天球パノラマ動画の生成

前節で述べたキャリブレーション結果を用いて3.1節の手法によってパノラマ動画を生成した。入力動画は、図9のようにLadybugをジェットコースターに固定し、走行しながら撮影することにより得た。各カメラの入力画像(解像度: 768×1024)の1フレームを図10に示す。また、これらの入力画像から作成したパノラマ動画(解像度: 3840×1920)の1フレームを図11に示す。パノラマ画像は、極座標を用いて画像を平面に展開しており、図11の下部の黒い部分は、入力画像の存在しない部分である。図11から、ジェットコースターの車両や人物の頭などカメラに接近した物体を除いては、生成したパノラマ画像上での入力画像間の境界は目立たず、幾何学的にも光学的にもおおむね正しくキャリブレーションが行えていることが分かる。



(a) input image (b) corrected image

図7 明度低下現象補正
Fig. 7 Limb darkening correction.



(a) non-corrected image (b) corrected image

図8 色調補正
Fig. 8 Color adjustment.

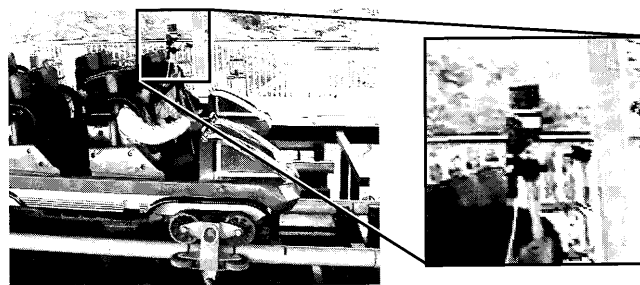


図9 Ladybugによる屋外の撮影
Fig. 9 Ladybug mounted on a roller-coaster.

また、図12に示すように、ブレンドなしのパノラマ画像を前節と同様の手法で作成し、その一部分についてブレンド処理を行ったパノラマ画像と画像のつなぎ目の比較を行った。同図(a)から、ブレンドなしのパノラマ画像では、カメラに接近した物体や、太陽光が直射した場合の撮影素子の輝度値の飽和によって画像間のつなぎ目が比較的容易に確認できる。一方、同図(b)のブレンド処理を行ったパノラマ画像上では、太陽光が直射した場合でも画像間のつなぎ目の変化は連続的であり、カメラに接近した物体を除いて殆んど画像間のつなぎ目を知覚することは出来なかった。

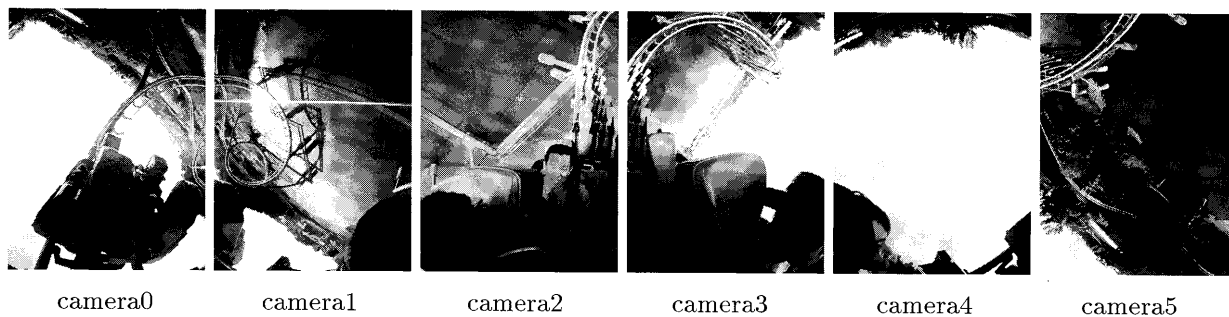


図 10 入力画像
Fig. 10 Input camera images.

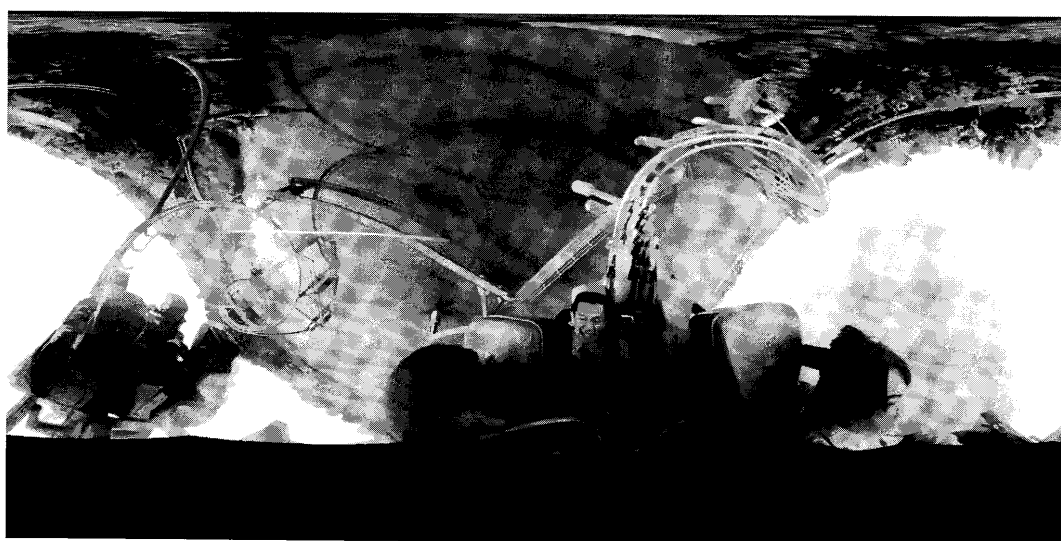
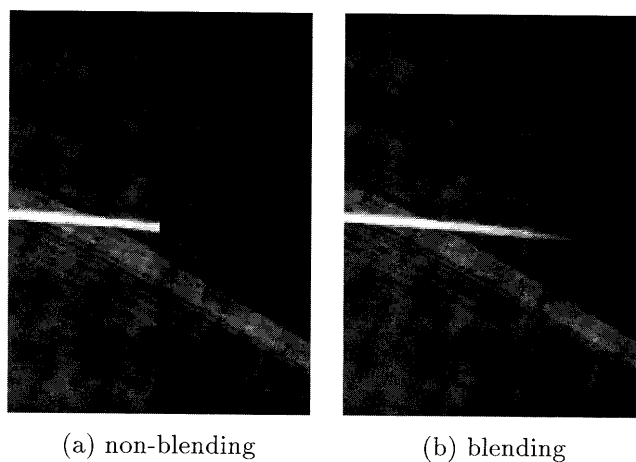


図 11 全天球動画の 1 フレーム
Fig. 11 Sampled frame of panoramic movie.



(a) non-blending (b) blending

図 12 ブレンド処理によるスムージングの効果
Fig. 12 Smoothing effect by blending.

4.3 定量的な評価

異なるカメラにより得られる画像中の対応点が、パノラマ画像を生成した際にどの程度ずれて球面に投影されるかを定量的に評価した。図 13 に示すように Ladybug では隣り合うカメラにより得られる画像には共通領域が存在する。この領域内に円形マーカを写し、画像上でマーカの重心位置をサブピクセルの精度で算出する。本実験ではこのマーカの重心位置を u_c, u_c' とおき、3.2 節で述べた図 4 での角 $\angle s_c G s_c'$ の角度を誤差値 ϵ として評価した。ただし、3.2 節で述べたように視差の影響が 1 画素以下となる対象物体までの距離は約 24m となるため、マーカはシステムから約 30m 離して配置し、各カメラにつき 100 点以上計測した。

表 2 に各カメラ間の画像のつなぎ合わせにおける誤差 ϵ の最大値と平均値を示す。実験から誤差 ϵ は平均 0.0061rad であった。これは入力画面上では約 3 画素に相当し、表 1 に示すように幾何学的キャリブレーションにおける平均再投影誤差と同程度であることから、パノラマ画像生成における誤差要因は各カメラの位置及び姿勢の推定誤差によるものが大きいと考えられる。

5 テレプレゼンスシステムの試作

生成した高解像度パノラマ動画の応用例として、図 14 に示す全方位の見回しが可能な画像蓄積型テレプレゼンスシステムを試作した。試作したシステムは表 3 に示すように、全天球視野の半分程度を一度に表示可能な球面ディスプレイ、コントローラ、PC の 3 つの装置により構成されている。球面ディスプレイの解像度が 1024×768 であるため、パノラマ動画は、 2048×1024 の解像度に縮小し、JPEG 形式で PC に蓄積してある。図 14 に示すように、利用者はコントローラを用いてインタラクティブに全方向の見回しや再生速度の変更、表示シーン切り替えを行うことができる。本システムでは Ladybug の撮影時のフレームレートである 15fps での描画が可能であった。

試作したテレプレゼンスシステムは解像度、視野角、対話性の面において臨場感の高いシステムとなったが、球面ディスプレイの解像度の制限のため入力画像の解像度を十分に生かしたものではない。より解像度の高いディスプレイを利用することで、さらに臨場感の高いシステムの構築が可能である。

6 まとめ

本論文では、全方位型マルチカメラシステムに対して、カメラ間の幾何学的及び光学的なキャリブレーションを行い、その結果を基にして全天球パノラマ動画を生成する手法を提案した。幾何学的キャリブレーションではキャリブレーションボードとトータルステー

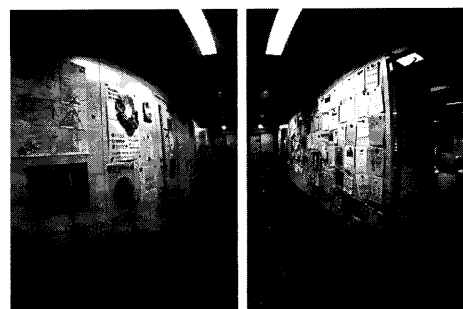


図 13 隣り合うカメラの画像の共通領域

Fig. 13 Common regions in adjacent camera images.

表 2 画像生成に関する誤差 $\epsilon \times 10^{-2}$ [rad]

Table 2 Error ϵ of a generated panoramic image [rad].

カメラ番号対	0-1	1-2	2-3	3-4	4-0
マーカ数	233	288	233	244	238
最大	1.04	0.89	1.24	1.99	1.24
平均	0.62	0.51	0.65	1.36	0.37
カメラ番号対	5-0	5-1	5-2	5-3	5-4
マーカ数	185	170	169	220	194
最大	0.78	0.51	1.10	1.06	0.74
平均	0.33	0.28	0.81	0.79	0.20

ションを用いて、システムの全方向に多数のマーカを空間的に広く配置することで、設計パラメータを使用せずにカメラパラメータの推定を行った。本論文では Ladybug という特定のカメラシステムへの適用について述べたが、提案したキャリブレーション手法は、放射状にカメラを配置した全方位型マルチカメラシステム全般に適用可能である。

また、実際に全方向の見回しが可能なテレプレゼンスシステムを試作し、本研究で生成したパノラマ画像が違和感なくテレプレゼンスに利用可能であることを確認した。さらに、パノラマ画像生成における画像のつなぎ合わせ精度を定量的に評価した結果、入力画面上で平均約 3 画素程度のずれであることが分かった。今回試作したテレプレゼンスシステムでは、提示可能な映像は撮影時のカメラの移動軌跡上のもののみであるが、今後は、自由に視点を移動できるようなウォークスルー環境構築への展開を検討する。

謝辞

データの取得に協力して頂いた近鉄興業 (株) あやめ池遊園地に感謝いたします。

参考文献

- [1] Special Issue on Immersive Telepresence, IEEE Multimedia, Vol. 4, No. 1, 1997.
- [2] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦: “移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚系 HyperOmni

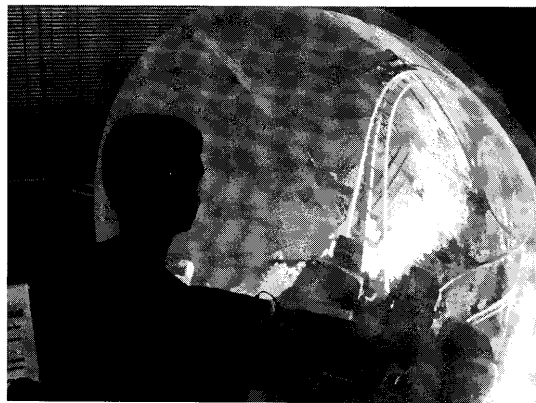


図 14 テレプレゼンスシステムの外観
Fig. 14 Appearance of telepresence system.

表 3 テレプレゼンスシステムの機器構成
Table 3 Components of telepresence system.

球面ディスプレイ	Elumens VisionStation
コントローラ	Microsoft SideWinder Game Pad Pro
PC	CPU: Intel Pentium4 1.7GHz, メモリ: 1GB
グラフィクスカード	Nvidia GeForce4

Vision の提案”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-D-II, No. 5, pp. 698-707, 1996.

- [3] Y. Yagi, Y. Nishizawa and M. Yachida: “Estimating Location and Avoiding Collision Against Unknown Obstacle for the Mobile Robot Using Omnidirectional Image Sensor COPIS”, Proc. Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS-91), Vol. 2, pp. 909-914, 1991.
- [4] Z. L. Cao, S. J. Oh and E. L. Hall: “Dynamic Omnidirectional Vision for Mobile Robots”, Jour. Robotic Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 5-17, 1986.
- [5] “Movingeye”, Movingeye Inc.: <http://www.movingeye.co.jp/>
- [6] 川西隆仁, 山澤一誠, 岩佐英彦, 竹村治雄, 横矢直和: “六角錐ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサによる高解像度ステレオパノラマ画像の作成”, 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU97-118, 1997.
- [7] H. Tanahashi, K. Yamamoto, C. Wang, and Y. Niwa: “Development of a Stereo Omnidirectional Imaging System (SOS)”, Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON-2000), pp.289-294, 2000.
- [8] “Ladybug”, Point Grey Research Inc.: <http://www.ptgrey.com/>
- [9] “FLYCAM”, 富士ゼロックス株式会社: <http://www.ubiquitous-media.com/flycam.html>
- [10] 戎野聡一, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和: “全方位ステレオ画像センサによる実環境の仮想環境への取り込み”, 電子情報通信学会 技術研究報告, MVE99-82, 1999.
- [11] 棚橋英樹, 佐藤淳, 王彩華, 丹羽義典, 山本和彦: “全方向ステレオシステム (SOS) のキャリブレーション手法”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 4, pp. 603-610, 2002.
- [12] 堀切和典, 小笠原康裕, Don Kimber, Jonathan Foote: “Smart Media Space: ネットワークを用いた知識の創造と共有のための場”, 富士ゼロックステクニカルレポート, No. 13, pp. 13-19, 2000.

- [13] 佐藤智和, “複数の動画像を用いたカメラパラメータ推定に基づく屋外環境の三次元モデル化に関する研究”, 奈良先端科学技術大学院大学 博士論文, NAIST-IS-DT0161018, 2003.
- [14] S. Ikeda, T. Sato, and N. Yokoya: “High-resolution panoramic movie generation from video streams acquired by an omnidirectional multi-camera system”, Proc. IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System (MFI2003), pp. 155-160, 2003.
- [15] R. Y. Tsai, “A Versatile Camera Calibration Technique for High-accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses”, IEEE Jour. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344, 1987.
- [16] T. Sato, M. Kanbara, N. Yokoya, H. Takemura, “Dense 3D Reconstruction of an Outdoor Scene by Hundreds-Baseline Stereo Using a Hand-Held Video Camera”, Int. Journal of Computer Vision, Vol. 47, Nos. 1-3, pp.119-129, 2002.
- [17] 出口光一郎, “射影幾何学による PnP カメラ補正問題の統一的解法”, 情報処理学会 コンピュータビジョン'90 ビジョンと環境理解シンポジウム論文集, Vol. 90, pp. 41-50, 1990.
- [18] B. K. P. Horn, Robot Vision, Mit Press, 1986.
- [19] 天野晃, 浅田尚紀, 馬場雅志: “ズームレンズの光学的歪みの解析と補正 -可変円筒モデルを用いた口径蝕現象の解析と画像周辺部明度低下の補正-, ” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-D-II, No. 6, pp.159-166, 1997.

(2003年9月1日受付)

[著者紹介]

池田 聖



2001年広島大・理・物理卒。2003年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。現在、同大博士後期課程に在学中。電子情報通信学会, IEEE 各会員。

佐藤 智和



1999年阪府大・工・情報工卒。2003年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。現在、同大情報科学研究科助手。コンピュータビジョンの研究に従事。2001年電子情報通信学会 学術奨励賞受賞。博士(工), 電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。

横矢 直和 (正会員)



1974年阪大・基礎工・情報工卒。1979年同大大学院博士後期課程修了。同年電子技術総合技術研究所入所。以来、画像処理ソフトウェア, 画像データベース, コンピュータビジョンの研究に従事。1986~87年マツギル大・知能機械研究センター客員教授。1992年奈良先端科学技術大学院大学・情報科学センター教授。現在同大情報科学研究科教授。1990年情報処理学会論文賞受賞。工博。電子情報通信学会, 情報処理学会, 人工知能学会, 日本認知科学会, 映像情報メディア学会, IEEE 各会員。