

全方位型マルチカメラシステムの キャリブレーションによる高解像度な 全天球パノラマ動画像の生成

この原稿は、日本工業出版(株)HPにて、図・写真をカラー掲載しています。

奈良先端科学技術大学院大学

池田 聖・佐藤 智和・横矢 直和

複数のカメラユニットで構成される全方位画像センサ（全方位型マルチカメラシステム）は、従来の単眼の方式に比べて高い解像度の画像が取得でき、視線方向による解像度の偏りが少なく、視野角が広いという特長をもつが、実際にこれを利用する場合は、精度の高いキャリブレーションの実現が課題となる。本稿では、幾何学的及び光学的な整合性を考慮した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及び、本手法により生成された全天球動画像を用いた高解像度テレプレゼンスシステムについて紹介する。

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曲面ミラー¹⁾や広角レンズ²⁾などのアタッチメントを取りつける方式が、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視野を1台のカメラで獲得するために、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位の視野を獲得する全方位型マルチカメラシステム（Omnidirectional Multi-camera System、以下OMSと略す）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OMS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OMSのキャリブレーション手法^{3) 4)}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が多く、一般のOMS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^{3) 4)}は、各カメラに対して奥行き方向に広くマーク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ク位置の検出誤差に対して敏感になるという問題がある。

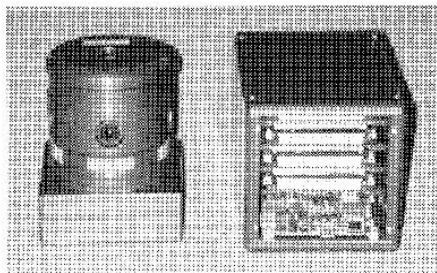
本稿では、以上のような背景を踏まえて、一般的なカメラモデルを基にOMSの高精度なキャリブレーション

を実現し、高解像度なパノラマ動画像を生成する手法⁵⁾について紹介する。また、本手法により生成された動画像を用いたテレプレゼンスシステムの試作例についても紹介する。本手法では、まず、OMS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像を生成する。幾何学的なキャリブレーションでは、物体表面の3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ク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周辺減光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。



OMSのキャリブレーション

本稿では、OMS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Ladybug⁶⁾ (第1図)について扱う。Ladybugは、第1図(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、第1図(右)に示すHDDアレイによる蓄積装置から成り、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。OMS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



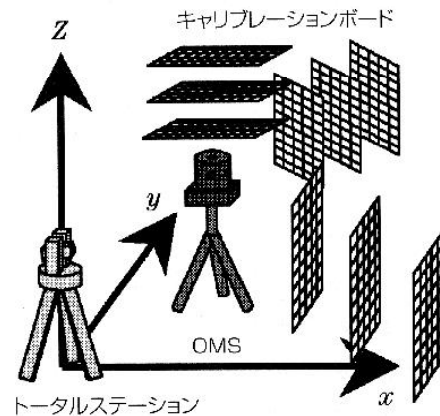
第1図 OMS : Ladybug
カメラ本体(左)と蓄積装置(右)

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、まず周辺減光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。

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推定を行う。



第2図 キャリブレーションボードの配置

本手法では、これらを正確に推定するために、システムの全方向に3次元位置関係が既知のマークを多数配置する。まず、マークの配置方法について述べる。本手法では、マークとして第2図に示すようなキャリブレーションボード上の格子模様の交点を用いる。マークの3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第2図に示すように、各カメラに対して奥行き方向に移動させ、その都度3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、多数のマークの空間的な配置が容易に実現できる。全てのカメラでキャリブレーション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ク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⁷⁾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 k_3 まで考慮し精度向上を図る。佐藤らの手法⁸⁾により、投影誤差を線形演算と非線形最適化により最小化することで、カメラの外部パラメータを決定する。投影誤差 E は、以下に示すようにマークの3次元位置を画像上に投影した座標 v_m とマークの入力画像上での位置 u_m の二乗距離(以降、投影誤差)の和で表現される誤差関数である。

$$E = \sum_m |v_m - u_m|^2$$

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、周辺減光の補正とカメラ間の色調補正を行う。一般的なOMSでは、各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周辺減光が生じる。

周辺減光として、広角レンズ特有の $\cos^4 \theta$ 現象⁹⁾と望遠レンズに特有の口径触現象¹⁰⁾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。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⁹⁾により $\cos^4 \theta$ 現象を補正する。

$$I' = I \cdot \pi l^2 \cos^4 \theta / f^2$$

ただし、 I, I' は周辺減光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。

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 と基準カメラ c_0 の画像の輝度 i に関するヒストグラム $h_c(i)$, $h_{c_0}(i)$ を一致させるように決定する。すなわち、以下の評価関数を定義し、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。

$$e(a_c, b_c) = \sum_i \left| h_c(i) - \frac{1}{a_c} h_{c_0} \left(\frac{i - b_c}{a_c} \right) \right|^2$$

● 全天球パノラマ画像生成

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生成する手法について述べる。

ここでは、まず前章で述べた周辺減光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、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成す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。本稿で扱う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画素以内に収まるような対象までの距離は、約24mである。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の半径を十分に大きく設定する。また、球面の中心は全てのカメラの投影中心の重心位置に設定する。このような仮定の下で、各入力画像上の全ての画素を球面に投影することでパノラマ画像を生成する。ただし、入力画像が重複する場合は、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。

● 実験

前述した手法を用いて実際に全天球パノラマ動画画像を生成した。本章では、個々のキャリブレーション結果の確認、全天球パノラマ動画画像の生成結果、テレプレゼンスシステムの試作について順に述べる。

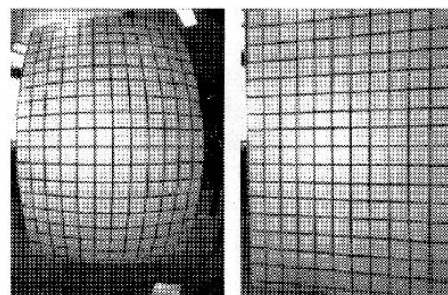
① Ladybugのキャリブレーション

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、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3次元位置と画像上の位置を取得した。マーカの3次元位置は、先に述べたように、キャリブレーションボードの3隅の格子点を

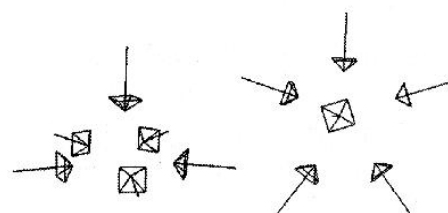
LEICA社製のトータルステーションTCR1105XRで計測することにより算出した。また、色調補正におけるカメラ間の輝度変換係数の推定に使用する画像は、各カメラの画角内に写るシーンが同じになるように、カメラシステムを回転させカメラごとに取得した。その際に、鏡面反射光を含まないシーンを用いることで、各カメラの撮影位置の微妙なずれによる照明条件の変化を最小限に抑えた。

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第3図に示す。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第4図に示す。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。このときの平均投影誤差は平均3.34画素と小さく、おおむね正しく外部パラ



第3図 歪み補正結果
補正前(左)と補正後(右)

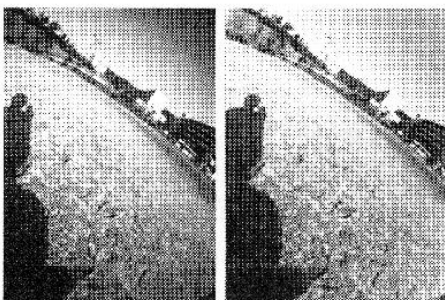


第4図 カメラの位置・姿勢推定結果
正面から(左)及び上から(右)の視点

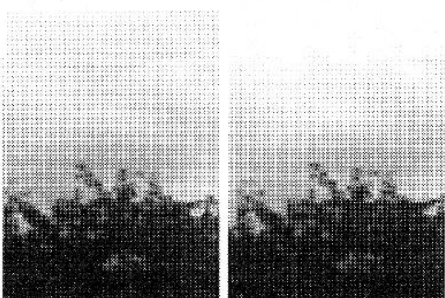
メータが推定されていることが確認できる。

次に、第5図に周辺減光の補正結果を示す。同図の比較により、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。

第6図は、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。



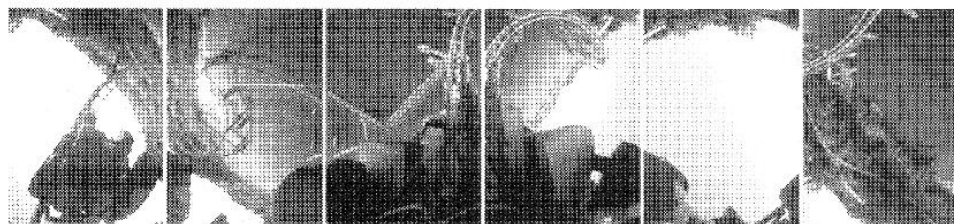
第5図 周辺減光補正結果
補正前(左)と補正後(右)



第6図 色調補正結果
補正前(左)と補正後(右)

②全天球パノラマ動画の生成

キャリブレーション結果を用いてパノラマ動画を生成した。入力動画は、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フレームを第



第7図 入力動画の1フレーム(右端: 上向きカメラ、他: 水平方向カメラ)

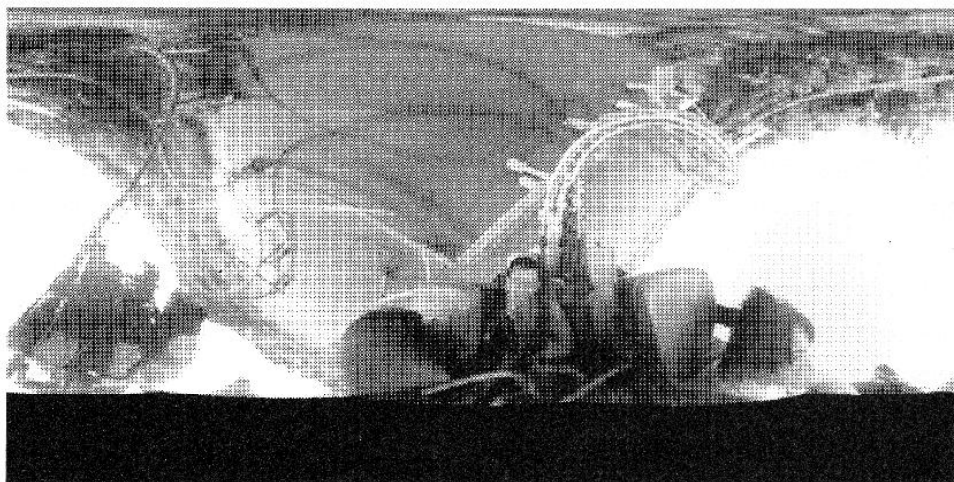
7図に示す。また、これらの入力画像から生成したパノラマ動画(解像度: 3840 × 1920)の1フレームを第8図に示す。パノラマ画像は、極座標を用いて画像を平面に展開しており、同図の下部の黒い部分は、入力画像の存在しない部分である。第8図から、ジェットコースターの車両や人物の頭などカメラに接近した物体を除いては、生成したパノラマ画像上での入力画像間の境界は目立たず、幾何学的にも光学的にもおおむね正しくキャリブレーションが行えていることが分かる。

また、定量的な評価として隣り合う2つのカメラ間で重複して画像が得られる方向に配置した「U」形マークを検出し、マークのずれをパノラマ画像の生成精度として調べた。ただし、Ladybugの場合、キャリブレーションの誤差がなければ、マークのずれが1画素以下となるような距離が約24mであ

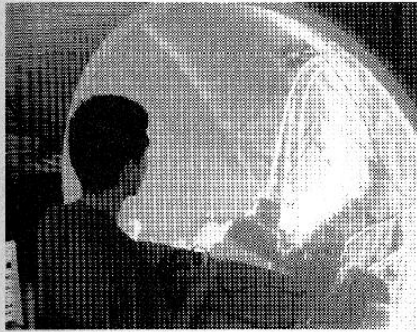
ることから、マークはシステムから約30m離して配置した。実験から誤差は平均3画素であることがわかった。幾何学的キャリブレーションにおける平均投影誤差と同程度であることから、パノラマ画像生成における誤差要因は各カメラの位置及び姿勢の推定誤差によるものが大きいと考えられる。

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、第9図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、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(Elumens VisionStation)、コントローラ(Microsoft SideWinder Game Pad Pro)、PC(CPU: Intel Pentium4 1.7GHz、メモリ 1GB)の3つの装置により構成されている。球面ディ



第8図 全天球パノラマ動画の1フレーム



第9図 テレプレゼンスシステム

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。第9図に示すように、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スピードの変更、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。

参考文献

- 1) 山澤、八木、谷内田：“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 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.
- 2) 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.
- 3) 戎野、山澤、竹村、横矢：“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.
- 4) 棚橋、佐藤、王、丹羽、山本：“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
- 5) 池田、佐藤、横矢：“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”、日本パーソナルリタリティ学会論文誌、vol.8、no.4、pp. 443-450、2003.
- 6) Ladybug. Point Grey Research Inc. : <http://www.ptgrey.com/>
- 7) R. Y. Tsai：“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.
- 8) 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.
- 9) B. K. P. Horn：Robot Vision, Mit Press, 1986.
- 10) 天野、浅田、馬場：“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.
- 11) S.Ikeda, T.Sato, M.Kanbara, and N.Yokoya：“An immersive telepresence system with a

locomotion interface using high-resolution omnidirectional movies”、Proc. 17th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR2004)、vol.IV、pp.396-399、2004.

【筆者紹介】

池田 聖

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 大学院生
〒630-0192 奈良県生駒市高山町
8916-5
TEL：0743-72-5296
FAX：0743-72-5299
E-mail：sci-i@is.naist.jp

佐藤智和

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科
視覚情報メディア講座 助手
〒630-0192 奈良県生駒市高山町
8916-5
TEL：0743-72-5293
FAX：0743-72-5299
E-mail：tomoka-s@is.naist.jp

横矢直和

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科
視覚情報メディア講座 教授
〒630-0192 奈良県生駒市高山町
8916-5
TEL：0743-72-5290
FAX：0743-72-5299
E-mail：yokoya@is.naist.jp

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の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ションを用いて、システムの全方向に多数のマーカー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。本稿では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。現在は、歩行装置を用いたテレプレゼンスシステム¹¹⁾への応用を考えている。

Keyword	キャリブレーション	実世界の物理量とセンサの計測値とを対応付ける操作。一般的なカメラキャリブレーションでは、レンズ歪み係数や焦点距離など、カメラの内部状態を表す内部パラメータとカメラの位置・姿勢を表す外部パラメータを推定する。
	テレプレゼンスシステム	利用者が遠隔地にいるかのような感覚を得ることのできる装置・仕組み。