全方向ステレオシステム(SOS)のキャリブレーション手法

A Calibration Method of Stereo Omnidirectional System (SOS)

棚橋 英樹[†], 佐藤 淳^{††}, 王 彩華[†],
正会員 丹羽 義典[†], 正会員 山本 和彦^{†††}

Hideki Tanahashi[†], Jun Sato^{††}, Caihua Wang[†], Yoshinori Niwa[†] and Kazuhiko Yamamoto^{†††}

Abstract We have developed a system called the Stereo Omnidirectional System (SOS). The stereo units, which are composed of three cameras, in this system are arranged on each plane of regular icosahedrons. This system can acquire all directional color and stereo pair images, in real time. However calibrating this multi-camera system, which acquires images in different directions from the center of the system, is difficult because simultaneously acquiring images of common regions from multiple cameras is not possible. We described a hybrid calibration method in which the translation parameters use the system design parameters and the rotational parameters are obtained from the images. These adjustments are made because of the difficulty in accurately obtaining the translation and rotational parameters from the images so that they can be compared. We also described how the color registration method uses common region images acquired from the system.

キーワード: 全方向ステレオシステム, カメラキャリブレーション, カラー補正, マルチカメラシステム, 3次元画像システム

1. ま え が き

近年, コンピュータにおける画像処理能力の向上により, 複数のカメラから得られる動画像を用いて, 広範囲の環境を同時に取得し, 3次元情報を取得する研究が盛んに行われている. 複数の画像を用いることで, 広範囲の3次元情報や高解像度の画像が取得でき, 広い範囲の監視, 環境の理解や臨場感を持った仮想環境の提示等が可能となる. 我々は, 現在複数の人や複数のコンピュータを含む環境下における, より自然なインタラクションを実現する実環境情報処理の研究を行っており,¹⁾ これを実現するために, 広範囲の環境の高解像度画像や3次元情報が取得できる複数カメラを用いたシステムを提案した⁶⁾.

こうした複数のカメラからの画像を利用するシステムにおいては, すべてのカメラ間の3次元位置・姿勢の

キャリブレーションとカメラ間の色・輝度の補正を正確に行う必要がある. 複数のカメラを用いて広範囲の3次元カラー情報を得ることが可能なシステムは, 大別すると2つに分けることができる.

1つは, 対象とする環境の周囲に複数のカメラを配置し, 環境の外から中心方向の画像を取得するシステムである. 金出ら²⁾は, 51個のカメラを半球ドーム上に配置し, これら画像から3次元モデルの復元を行った. このシステムでは, 対象とする空間に3次元位置が既知のマーカを配置し, 各カメラ毎に得られた画像から独立にカメラのキャリブレーションを行ったが, 各カメラ独立にキャリブレーションを行うため, 各カメラパラメータ間で矛盾が生じる. こうした問題を解決するためにカメラ間のエピポーラ幾何から“射影グリッド空間”を構成し, この空間において3次元形状の復元を提案している³⁾. 文献3)では, 直線上に配列したLEDを用いてカメラ間の相対関係を求めており, 3次元空間座標と2次元画像座標の正確な関係を必要としないが, 空間内の複数箇所でのキャリブレーション画像の取得が必要となる. こうしたシステムでは, 取得できる空間が制限され, システムも大規模なものとなるため容易に移動することは困難である.

もう一方は, 複数のカメラをシステムの中心から外向きに配置し, その周りの環境の画像を取得するシステムである. 川西ら⁴⁾は, 6角錐ミラーと各ミラー面にカ

2001年9月3日受付, 2002年2月4日最終受付, 2002年2月14日採録

[†] (財) ソフトピアジャパン/科学技術振興事業団

(〒503-8569 大垣市加賀野 4-1-7, TEL 0584-77-1139)

^{††} 名古屋工業大学 電気情報工学科

(〒466-8555 名古屋市中昭和区御器所町, TEL 052-735-7138)

^{†††} 岐阜大学 工学部

(〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1, TEL 058-293-2753)

[†] Office of Regional Intensive Research Project, Softopia Japan/JST
(4-1-7 Kagano, Ogaki-shi, Gifu 503-8569 Japan)

^{††} Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology

(Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi 466-8555, Japan)

^{†††} Faculty of Engineering, Gifu University

(Yanagido 1-1, Gifu-shi, Gifu 501-1193, Japan)

メラを配置した全方位カメラを2つ用いてステレオカメラを構成することで、システムを中心とした360度パノラマステレオ画像を取得するシステムを開発した。このシステムでは、各カメラから得られる画像中のミラー領域の位置と大きさを等しくすることで、各カメラの光軸方向の調整と、隣り合う画像の連続性と上下画像のエピポーラ線が一致するように、ミラーと2つの全方位カメラの姿勢の調整を行った。この手法は、カメラの調整が隣り合う画像間や上下のシステム間の相対的な調整であり、それぞれにキャリブレーション誤差が含まれている。この問題を解決するために、センサを囲む大型円筒スクリーンに3次元位置の既知な格子パターンを投影し、それを撮像した画像からキャリブレーションを行う手法を提案した⁹⁾。こうしたシステムは、一度キャリブレーションを行うとシステムの移動が容易であり、移動することで広範囲の空間の情報を得ることが可能であるが、対象の位置がシステムより上方にある場合や下方にある場合など、システムと対象の位置によって死角が生じる。

我々はこうした問題を鑑み、観測点を中心とした広域かつ動的な環境情報の取得を目的とし、空間すべての方向のカラー画像とステレオ画像対を同時刻にリアルタイムで取得可能な全方向ステレオシステムを開発した(図1)。本システムでは、あらかじめキャリブレーションされた20個の3眼ステレオユニットを、正20面体の各面上に配置することで空間を等間隔に分割し、高解像度の3次元カラー情報の取得を可能とした。さらに、ステレオユニットを互いに隣り合うステレオユニットのカメラの視野を遮らないように配置することで、得られる3次元情報の精度を確保しながら、システム全体の大きさの小型化を図った。こうした特徴を利用して、動的環境における複数のイベントの同時抽出⁷⁾、現実環境からの3次元仮想環境の構築⁸⁾や各方向の画像から球面統合画像の生成方法を提案した⁹⁾。各ステレオユニットから得られる画像や3次元情報を統合するために、システム設計時に用いたステレオユニットの参照カメラ(以下ではこれを参照カメラと呼ぶ)の配置パラメータ(以下ではこれを設計パラメータと呼ぶ)を用いてきたが、ステレオユニットの取り付け時の誤差により、実空間上の1本の直線が、統合画像において1本の直線として繋がらない、隣り合う画像間で色が異なる等、参照カメラ間の画像の接続部分や復元した3次元情報の接続部分において不連続が生じていた。こうした不連続を解消し、継ぎ目のない全方向画像の生成を行うためには、システムから得られるカメラの画像を用いて、各参照カメラのより正確な並進・回転パラメータの算出と各カメラ間の相対的な色補正を行う必要がある。

一般に、カメラの並進運動による画像の変化は、回転運動による画像の変化に比べて非常に小さい。これを逆に考えてみると、ある画像中の変化をもとにカメラの並

図1 全方向ステレオシステム (SOS)
A Stereo Omni-directional System(SOS)

進運動と回転運動を求めようとした時に、カメラの回転運動は比較的精度よく求まるが、並進運動を精度良く求めるのは難しいということがわかる。さらに、ステレオユニットの組付けにおいて並進の誤差は小さい。したがって、画像から並進パラメータを推定しても、設計パラメータより精度が向上することは期待できない。

そのため、本論文では画像から精度よく求めることが難しい並進パラメータには、設計パラメータを用い、画像から比較的精度よく求めることが可能な回転パラメータは画像を用いて求めるといったハイブリッドキャリブレーション手法を提案する。この時各カメラの回転、並進パラメータを独立に最適化すると得られる並進パラメータは設計パラメータと異なるものとなる。すなわち、各パラメータを独立に最適化した場合には、並進パラメータを設計パラメータに固定することができない。そこで本論文では、並進パラメータを設計パラメータに固定しながら、その他のすべての運動パラメータを同時に最適化する。またシステムから取得される画像間の共通領域を利用して各カメラ間の色・輝度を補正する手法を併せて提案する。

2. 全方向ステレオシステム (SOS)

本節では、我々が開発した全方向ステレオシステム (Stereo Omnidirectional System: 以下では SOS と呼ぶ)⁶⁾について述べる。

SOS は、システムを中心とした3次元空間内の全方向のカラー画像と距離画像を同一時刻にリアルタイムで取得可能なシステムである。図1(a)に本システムの外観を示す。本システムは、60個のカメラを用いて正20面体の各面上に3個のカメラ対からなるステレオユニット(図1(b))を配置した。これによって、システムを中心としたすべての方向におけるカラー画像と、3次元情報を同一時刻にリアルタイムで取得することが可能となり、

(a) 上カメラ

(b) 参照カメラ

(c) 右カメラ

図 2 ステレオユニットからの画像例
Example images from a stereo unit

同じ特性を持つステレオユニットを正 20 面体の各面上に配置することにより、3 次元空間を均等に分割することが可能である。また、正多面体のうちもっとも空間を均一に細かく分割可能な正 20 面体を用いることにより、高い空間解像度の情報の取得が可能である。

SOS 上の各ステレオユニットには、図 1(b) に示すように、同一平面上に L 字型に 3 個の CMOS カメラが配置されている。中央のカメラは参照カメラであり、このカメラからはステレオ処理だけでなく、テクスチャとして使用するためのカラー画像、右と上の 2 個のカメラからはステレオ処理に使用する白黒画像が取得でき、上下・左右の 2 つのステレオペアを構成する。

ステレオユニット上のこれら 3 つのカメラは、Tsai の手法¹²⁾によりキャリブレーションが行われている¹³⁾。すなわち、各カメラ毎の内部パラメータ（レンズ非線形歪み、焦点距離、カメラ中心、アスペクト比）と 3 個のカメラは中央カメラを中心とした並進・回転のパラメータは得られている。

得られたキャリブレーションデータを用いることにより、各ステレオユニット上のカメラからはレンズ非線形歪みとカメラ間のアライメントずれの影響が除かれた補正画像が出力される。この補正画像の各ピクセルは、正方向ピクセルをなしており、画像中心からの透視投影画像となっている。このキャリブレーション精度は、640*480 の解像度において、最小 2 乗誤差で 0.1~0.3 ピクセルになっている¹⁴⁾。

図 2 に、1 つのステレオユニット上の 3 個のカメラから得られた補正画像の例を示す。図 2(a), (b), (c) はそれぞれ上カメラ、参照カメラ、右カメラから得られた補正画像である。また図 3 は SOS 上の 20 個のステレオユニットの参照カメラから得られる 20 枚のカラー画像の補正画像である。

また、ステレオユニットを互いに隣り合うステレオユ

図 3 全方向カラー画像例
An example of all directional color images

表 1 システム仕様
System specifications

Image Sensor	1/3" CMOS Color Image Sensor
Effective Resolution	640 (H) * 480 (V)
Field of View	96.6 deg (H) * 71.9 deg (V)
Baseline Length	90 (mm)
Sensor Size	Diameter 27 (cm)
Sensor Weight	4.5 (kg)

ニットのカメラの視野を遮らないように配置することにより、得られる 3 次元情報の精度を確保しながら、システム全体の大きさの小型化を図り、近接死角を少なくしつつ、システムから遠く離れた 3 次元情報を精度良く取得可能にした。

表 1 に、本システムの仕様を示す。

3. システムキャリブレーション

前節で述べたように、SOS はステレオユニットごとにキャリブレーションが行われている。本論文では、各ステレオユニット上の 3 個のカメラは、参照カメラを中心とした並進・回転パラメータと各カメラの内部パラメータは正確に求められているとして、ステレオユニット上の参照カメラ間のキャリブレーションを考える。各ステレオユニットから得られる画像情報を統合するためには、各参照カメラの並進 (3 自由度)・回転 (3 自由度) のパラメータのキャリブレーションを正確に行う必要がある。また、各参照カメラから得られるカラー画像は、各カメラの光学特性の違いにより得られる色・輝度が異なっているため、これら画像間の色・輝度を相対的に合わせる必要がある。本節では、SOS 上の各参照カメラの並進・回転パラメータのキャリブレーションと得られるカラー画像の相対的な色あわせ手法について述べる。

3.1 ステレオユニット間キャリブレーション

ワールド座標と参照カメラの座標は図 4 に示すように、ワールド座標における SOS 座標の回転 R^s 、並進 T^s と SOS 座標における各参照カメラの回転 R_i^c 、並進 $T_i^c (i = 1, \dots, 20)$ の計 126 個のパラメータを求めること

図 4 世界座標とカメラ座標系の関係
A relation between world coordinate and camera coordinate

により、関連づけることが可能である。

これらのパラメータをそれぞれ参照カメラごとに画像から求めることも考えられるが、SOSにおいてはステレオユニットは精度良く加工されたアルミ板に正確に固定されており、システム組み付けでの並進の誤差は少ない。また、各参照カメラの並進パラメータ $T_i^c (i=1, \dots, 20)$ の誤差による画像の変化は回転パラメータ R_i^c による画像の変化に比べて非常に小さい。したがって、画像から並進パラメータ T_i^c を推定しても、設計パラメータより精度が向上することは期待できない。そのため、並進パラメータ T_i^c に関しては画像から求めず、設計パラメータを用いる方が得策である。一方、画像は回転運動に関しては敏感であるため、回転パラメータ R_i^c は画像から精度良く求めることができる。そこで本研究では、SOS座標における各参照カメラの並進パラメータ T_i^c に設計パラメータを用いて、SOS座標における各参照カメラの回転パラメータ $R_i^c (i=1, \dots, 20)$ とワールド座標におけるSOSの中心の並進パラメータ T^s 、回転パラメータ R^s の計66個のパラメータを求めることですべてのカメラ座標とワールド座標を関連付ける方法を提案する。

一般に、複数のカメラ間のキャリブレーションを行うためには、3次元形状が既知のキャリブレーション器具、または3次元位置の既知なマーカ等を撮影し行う方法と、大きさも位置や姿勢もわからないような未知の対象物の画像からキャリブレーションを行う方法（セルフキャリブレーション）がある¹⁵⁾。

本論文では、SOSを中心とした3次元空間内に3次元位置の既知なマーカの画像を取得することで、各参照カメラの配置パラメータのキャリブレーションを行った。しかしながら、実空間の全方向に複数のマーカを精度良く配置することは困難なため、大きさと形状が既知の空間に繰り返しパターンを投影し、その画像を取得することでキャリブレーションを行った。キャリブレーションに用いた空間としては、図5に示すような没入型6面ディスプレイ¹⁶⁾（以下COSMOSと呼ぶ）を用いた。

図 5 没入型6面ディスプレイ (COSMOS)
An immersive six-screen display (COSMOS)

図 6 格子パターン画像例
An example pattern image

COSMOSは、1辺が3mのスクリーンで囲まれた立方空間で、この空間の外にあるプロジェクタから映像をスクリーンに投影することで、SOSを包含する仮想空間を構築することができる。これら6枚のスクリーンの配置関係、大きさおよびプロジェクタのキャリブレーションは、すべてのスクリーンに投影したパターン画像を用いて正確にキャリブレーションが行われている。そのため、SOSをCOSMOSのほぼ中央に設置して、1面ごとにプロジェクタから格子パターンを投影し、各参照カメラごと取得した画像（各6枚）から格子点の座標を求めて、その対応するワールド座標からキャリブレーションを行った。図6に1つの参照カメラから得られる格子パターン画像の例を示す。このようにキャリブレーションされたプロジェクタを用いて、カメラキャリブレーションを行うことで、特徴点が得やすいようにキャリブレーションパターンを簡単に変更できるといったメリットもある。得られたパターン画像から格子点を抽出し、その格子点の画像座標とワールド座標を対応づけた。この対応付けは人手により行った。

このようにして、各参照カメラ $i (i=1, \dots, 20)$ から得られた2次元画像上の点 $m_i = [u, v]^T$ とワールド座標における点 $X = [X, Y, Z]^T$ の関係は 3×4 の射影カメラ行列 P_i を用いて以下のように表現される。

$$\lambda \tilde{m}_i = P_i \tilde{X} \quad (1)$$

ここで λ は任意のスカラー量であり、 $\tilde{m}_i = [m_1, m_2, m_3]^T$ 、 $\tilde{X} = [X_1, X_2, X_3, X_4]^T$ は、それぞれ $m_i = [u, v]^T$ 、 $X = [X, Y, Z]^T$ に対して $[m_1, m_2, m_3]^T \sim [u, v, 1]^T$ 、 $[X_1, X_2, X_3, X_4]^T \sim [X, Y, Z, 1]^T$ なる同値関係が成り立つ斉次座標である。

カメラ行列 P_i は、ワールド座標における SOS 座標の並進 T^s と回転 R^s 、および SOS 座標における各参照カメラの並進 T_i^c と回転 R_i^c を用いて以下のように表せる。

$$\begin{aligned} P_i &= A_i \begin{bmatrix} R_i^c & -R_i^c T_i^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^s & -R^s T^s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= A_i \begin{bmatrix} R_i^c R^s & -R_i^c R^s (T^s + R^{s^{-1}} T_i^c) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= A_i \begin{bmatrix} R_i & -R_i T_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

ただし

$$R_i = R_i^c R^s \quad (3)$$

$$T_i = T^s + R^{s^{-1}} T_i^c \quad (4)$$

ここで、 T_i と R_i はワールド座標における各参照カメラの並進、回転パラメータである。また行列 A_i はカメラの内部パラメータを表す行列であり、2節で述べたように、これらのパラメータは既に求められている。

1節で述べたように、一般に並進は回転に比べて画像から正確に求めることが難しい。そこで本論文では、SOS 座標における各参照カメラの並進 T_i^c に設計パラメータを用い、回転 R_i^c は画像から求めるといったハイブリッドキャリブレーションを行う。すなわち、ワールド座標における各参照カメラの並進 T_i と回転 R_i を画像より求め、これらより SOS 座標における並進 T_i^c を設計パラメータに固定しつつ SOS 座標における回転 R_i^c を計算する。しかし、回転 R_i と並進 T_i を各カメラ独立に最適化して求めた場合、得られる T_i^c は一般に設計パラメータとは異なるものとなる。すなわち、各カメラを独立に最適化した場合には、 T_i^c を設計パラメータに固定するという条件を満たすことができない。そこで、並進 T_i^c を設計パラメータに固定しつつ、その他のすべての運動パラメータを同時に最適化することにより、ハイブリッドキャリブレーションを実現する。

これらの処理は以下の2つのステップで行う。まずステップ1では、線形解法を用いて各カメラごとに画像より T_i および R_i を求め、これらの結果より T^s 、 R^s 、 R_i^c の初期値を計算する。次にステップ2では、ステップ1で得られた T^s 、 R^s 、 R_i^c の初期値をもとに、並進 T_i^c を設計パラメータに固定しつつ T^s 、 R^s 、 R_i^c を最適化する。以下に各ステップにおける処理について具体的に述べる。

(ステップ1)

- (1) 式(1)を用いて、 m_i と X_i から各参照カメラの P_i を求める。
- (2) A_i が既知であることにより、式(2)から、各参照カメラの R_i と T_i を求める
- (3) このままでは、誤差の影響により R_i は回転行列とはならないため、特異値分解を用いて R_i を

正規直交化して回転行列 R_i を求める。すなわち、 R_i を特異値分解により U, W, V に分解し、 W を単位行列に置き直して再び $R_i = UWV$ により合成する。

- (4) SOS の対称性を用いて、各参照カメラの R_i と T_i の平均値を取り、3次元空間における SOS 座標の並進 T^s と回転 R^s の初期値を求める。
- (5) R_i および R^s から式(3)より各参照カメラの回転 R_i^c の初期値を求める。

(ステップ2)

- (1) ステップ1で得られたパラメータ $R^s, R_i^c (i = 1, \dots, 20)$ から各軸に対する回転角 $\theta_j^s, \theta_{i,j}^c (i = 1, \dots, 20, j = X, Y, Z)$ を求め、 T^s の各要素 $T_j^s (j = X, Y, Z)$ と共に初期値とする。
- (2) 得られた66個のパラメータ $p = [T_j^s, \theta_j^s, \theta_{i,j}^c]^T$ と設計パラメータ T_i^c より各カメラ行列 P_i を求める。
- (3) 推定した P_i により投影した画像 $\hat{m}_i$ と実際の画像 m_i との差の全画像における和 e を求める。
- (4) 66個のパラメータ p のそれぞれに微小変動を加えた時の e の変動 $\Delta e = [\Delta e_1, \dots, \Delta e_{66}]^T$ を計算する。
- (5) 以下にもとづき p を微小変化させる。

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} + \frac{M \Delta e}{\sqrt{\Delta e^T \Delta e}} \quad (5)$$

ここで $p^{(n)}$ は n 回目の繰り返しにおける p を表し、 M は p の各要素に与えた微小変動を対角とする対角行列である。

- (6) (2) から (5) を繰り返し行い、 n 回目の e よりも $n+1$ 回目の e が大きくなった時点で最適化を終了する。

3.2 カラーキャリブレーション

これまでに述べた手法により、各カメラの位置、姿勢は精度良くキャリブレーションできる。しかしながら、複数のカメラを用いた時には、各カメラの光学特性の違いにより得られる画像の色が異なり、各画像の相対的な色合わせが必要となる。本節では、前節で得られたキャリブレーションデータと SOS の各カメラから得られるカラー画像を用いた相対的な色合わせ方法について述べる。

SOS においては、20個のステレオユニットのうち、参照カメラのみからカラー画像が取得できる。また、これらの画像は、SOS 中心から 400mm 以上の領域に関しては画像の重なりがある。そのため、この隣り合うカメラから得られる共通な領域のカラーヒストグラムを用いて、これら領域のカラーヒストグラムが一致するように反復的に変化させた。

20個のカラー画像のうち1つを基準カラー画像とすると、その隣り合うステレオユニットから得られるカラー画像(図7(a))を得られたキャリブレーションパラメータ

図 7 共通エリアの抽出
An extraction of common region

を用いて、基準とするカメラの画像座標に投影する（図 7(b)）。この時、システム中心から画像平面までの距離は、1.5m とした。この投影画像と基準とするカメラからの画像との積により、共通な領域部分の画像（図 7(c)）を得ることができる。

これら共通領域は、カメラ方向が異なるため必ずしも同じ色とはならない。特に、鏡面反射成分が大きい対象が共通領域で観測された場合、反射率により観測される色が大きく異なるため提案法だけでは解決できない。しかしながら、一般の環境においては図 7(c) に示すように、鏡面反射成分が大きな対象が多く存在することは少なく、多くの対象は拡散反射成分が大きいいため、カメラ方向の多少の違いによる色の変化は小さい。

以下、この共通領域を用いてカラーキャリブレーションの具体的な手法について述べる。 i 番目の画像を $I_i (i = 1, \dots, 20)$ とし、その画像に 3 つの隣り合う画像

表 2 画像座標における平均誤差 (pixel)
An average error at image plane

キャリブレーション後 (ステップ1+ステップ2)	0.2485
中間結果 (ステップ1)	0.3840
キャリブレーション前	0.7079

を i 番目の画像平面に投影した画像を $I_{ij} (j = 1, 2, 3)$ とする。 I_i と I_{ij} と共通な領域をそれぞれ $R_{i,ij}$ と $R_{ij,i}$ とする。領域 $R_{i,ij}$ の正規化カラーヒストグラム $S_i = \bigcup_{j=1,2,3} R_{i,ij}$ と領域 $R_{ij,i}$ の正規化カラーヒストグラム $S_s = \bigcup_{j=1,2,3} R_{ij,i}$ を一致するように RGB の各ルックアップテーブルを最適化することで、SOS から得られるすべての画像 I_i の相対的な色の調整を行うことが可能となる¹⁷⁾。ルックアップテーブルの調整は RGB 各色ごとに以下に行った。

$$C_i^{(n+1)}(v) = (1 - \alpha)C_i^n(v) + \alpha A_i^n(v) \quad (6)$$

$$A_i^n(v) = \max\{C_s^n(u) | F_{S_i}(C_i^n(v)) \leq F_{S_s}(C_s^n(u))\} \\ (0 \leq u, v \leq 1.0)$$

ここで $C_i^n(v)$ は n 回目の調整後の画像 I_i に対する RGB の各色ごとのルックアップテーブル、 v は RGB の各色における明るさのインデックスである。 $F_*(\cdot)$ は、ヒストグラムの累積である。 α は、調整パラメータであり、 α が大きいと 1 回の調整で隣カメラの色が中心のカメラの色に近づくが、振動をおこす可能性がある。一方、 α が小さいとゆっくり隣カメラの色が中心のカメラの色に近づく。

$C_i^0(v) = v$ と $C_s^0(u) = u$ を初期値として、式 (6) を繰り返すことにより、ルックアップテーブルを作成し、このルックアップテーブルを用いて画像の更新を行い、2 つのヒストグラムの分布を合わせた。

4. 実験結果

3.1 節で述べた手法の有効性を示すため、ワールド座標における点を各カメラ画像上に投影した点の座標と画像座標との誤差をカメラ全体で評価した。表 2 にキャリブレーション前、ステップ 1 による中間結果、ステップ 1 + ステップ 2 によるキャリブレーション後の結果を示す。いずれの結果でも、サブピクセルの精度が得られているが、提案法によりキャリブレーション精度が向上していることがわかる。

図 8 に投影した画像例を示す。図 8(a) は、キャリブレーション後の結果であり、図 8(b) は、キャリブレーション前の結果である。ここで赤で表現された点は、画像上の格子点、青で表現された点は、画像に投影したワールド座標である。

(a) キャリブレーション後

(b) キャリブレーション前

図 8 キャリブレーション結果
A result of calibration image

(a) キャリブレーション後

(b) キャリブレーション前

図 9 画像統合結果
A result of integration image

図 10 正規化ヒストグラムの平均誤差の推移
Changes of average error of normalized histogram

また図 9 に一つのカメラ画像を中心としてその隣り合う画像を投影した結果を示す。図 9(a) はキャリブレーション後の結果であり、図 9(b) はキャリブレーション前の結果である。これらの図より提案法を用いることにより、カメラ画像の統合や復元結果の統合がより精度良く行えることがわかる。

図 10 に共通領域の正規化ヒストグラムの差の平均誤差の推移を示す。なお、この実験に用いた式 (6) の調整パラメータ α は、実験により 0.25 とした。正規化ヒストグラムの最適化を繰り返すことにより、各カメラの色、輝度が相対的に一致しているのがわかる。

最後に得られた結果を用いて、SOS から得られる 20 枚のカラー画像から、3 角形エリアを切り出し、その画像を正 20 面体の展開図に配置することにより全方向パノラマ画像を生成した⁹⁾。図 11(a) は、取得した全カラー画像のカラーキャリブレーションを行った後、提案法で

(a) キャリブレーション後

(b) キャリブレーション前

図 11 全方向パノラマ画像
A result of all directional panoramamic image

(a) 図 11(a) の部分拡大画像

(b) 図 11(b) の部分拡大画像

図 12 図 11 の拡大画像
A part image of all directional panoramamic image

得られたカメラパラメータから得られる相対カメラ位置を用いて画像補正を行い、作成した全方向パノラマ画像である。この時に切り出した 3 角形領域は、システム中心から 1.5m の距離の範囲とした。また、比較のため並進・回転パラメータに設計パラメータと入力画像を用いて、同様な条件で作成した全方向パノラマ画像を図 11b に示す。また、図 12(a), (b) に図 11 の部分拡大画像を示す。提案法により、全体の輝度、色が補正されており、異なるカメラから得られる画像間のつながりも滑らかに接続されていることがわかる。なお、図 12(a) の画像の上部において本来直線である線が折れ曲がって表示されているが、これは正 20 面体に投影されたカメラ画像を図 11 や図 12 では展開して表示しているためである。

5. む す び

本論文では、我々が開発した全方向ステレオシステム

(SOS) の参照カメラの並進, 回転パラメータのキャリブレーションとカメラ間の色, 輝度のキャリブレーション手法について述べた. 画像から精度よく求めることが困難なカメラの並進パラメータには, 設計パラメータを用い, 画像から比較的精度よく求めることが可能な回転パラメータは, 画像を用いて求めるといったハイブリッドキャリブレーション手法を提案し, SOS 上のカメラの並進パラメータを設計パラメータに固定し, その他のすべての運動パラメータを同時に最適化を行った. これにより, パラメータの安定化と精度の向上を図り, システム全体でサブピクセル精度を実現した. また, 隣り合うカメラから得られる共通画像領域を用いて, その領域の正規化ヒストグラムを最適化手法を用いて一致させることにより色, 輝度のキャリブレーションを行い, 良好な結果を得た.

本論文では, 3次元位置が既知のパターンを投影するために没入型ディスプレイを用いたが, 今後, 各カメラから得られる共通領域の画像特徴を用いたセルフキャリブレーションを行う予定である.

〔文 献〕

- 1) <http://www.hoip.softopia.pref.gifu.jp>
- 2) T. Kanade, P. Rander and P. J. Narayanan: "Virtualized Reality: Constructing Virtual Worlds from Real Scenes", IEEE MultiMedia, 4, 1, pp.34-47 (1997)
- 3) H. Saito and T. Kanade: "Shape Reconstruction in Projective Grid Space from Large Number of Images", Proc. CVPR'99, II, pp.49-54 (1999)
- 4) T. Kawanishi, K. Yamazawa, H. Iwasa, H. Takemura and N. Yokoya: "Generation of High-resolution Stereo Panoramic Images by Omnidirectional Imaging Sensor Using Hexagonal Pyramidal Mirrors", Proc. 14th ICPR, I, pp.485-489 (1998)
- 5) 戎野聡一, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和: "円筒パターンを用いた全周ステレオ画像センサのキャリブレーション手法", 日本 VR 学会第 4 回大会論文集, pp.211 - 212 (1999)
- 6) 山本和彦, 棚橋英樹, 桑島茂純, 丹羽義典: "実環境センシングのための全方向ステレオシステム (SOS)", 電学論 (C), 121-C, 5, pp. 876 - 881 (2001)
- 7) 棚橋英樹, 島田大輔, 丹羽義典, 山本和彦: "全方向ステレオシステム (SOS) のステレオ情報を用いた空間イベントの取得", 情処学研報, CVIM125-14, pp.103 - 110 (2001)
- 8) H. Tanahashi, D. Shimada, K. Yamamoto and Y. Niwa: "Acquisition of Three-Dimensional Information in a Real Environment by Using the Stereo Omni-directional System(SOS)", Proc. 3rd 3DIM, pp.365 - 371 (2001).
- 9) B. Madhavan, H. Tanahashi, C. Wang, K. Yamamoto and Y. Niwa: "Induction of a real-time omni directional stereo images acquisition system for Virtual Environment application", Proc. CGIM2000, pp. 83 - 86 (2000).
- 10) 山本和彦, 桑島茂純, 棚橋英樹: "全方向ステレオ画像撮影装置及びステレオ画像撮影装置", 特開 2001-285692 (2001)
- 11) Point Gray Research Inc.: "User's Guide and Command Reference - TRICLOPS Stereo Vision Software Development Kit(SDK) Version2.2.2 -"
- 12) R. Y. Tsai: "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", IEEE Journal of Robotics and Automation, 3, 4, pp.323-344 (1987)
- 13) D. Murray and J. Little: "Using real-time stereo vision for mobile robot navigation", Workshop on Perception for Mobile Agents, at CVPR'98
- 14) 桑島茂純, 桑原裕之, 山本和彦, 棚橋英樹, 丹羽義典: "全方向ステレオカメラシステム", O plus E, bf 22, No.12, pp.1585 - 1591 (2000)
- 15) 佐藤淳: "コンピュータビジョン-視覚の幾何学-", コロナ社
- 16) T. Yamada, M. Hirose and Y. Iida: "Development of Complete Immersive Display: COSMOS", Proc. VSMM'98, 2, pp.522 - 527

(1998)

- 17) H. Tanahashi, C. Wang, K. Yamamoto and Y. Niwa: "Live Events Accessing for Multiusers with Free Viewpoints using Stereo Omni-directional System", Advances in Multimedia Information Processing-PCM2001, pp.166 - 173(2001)

棚橋 英樹 1985 年, 岐阜大学工学部卒業. 同年岐阜県 (工業技術センター) 入庁. 1998 年岐阜大学工学研究科博士課程了. 現在 (財) ソフトピアジャパン地域結集型共同研究推進室 (HOIP) 主任専門研究員. 工博. コンピュータビジョン, 特に画像からの 3 次元形状再構成とその応用研究に従事. 第 6 回画像センシングシンポジウム論文賞受賞.

佐藤 淳 1984 年, 名古屋工業大学工学部卒業. 1996 年ケンブリッジ大学大学院博士課程了. 同年ケンブリッジ大学工学部助手. 1998 年名古屋工業大学工学部助教授. この間に, ATR 人間情報通信研究所客員研究員など. コンピュータビジョン, 視覚誘導, 視覚的ユーザインターフェースの研究に従事. 博士 (PhD). 著書に「コンピュータビジョン-視覚の幾何学-」(コロナ社) など. BMVC'94 最優秀科学論文賞, BMVC'97 最優秀科学論文賞, 第 5 回画像センシングシンポジウム論文賞など受賞.

王 彩華 1983 年, 中国人民情報工科学科卒業. 1986 年同大修士課程修了. 同大コンピュータセンター助手. 1988 年講師. 1996 年静岡大学電子科学研究科博士課程修了. 同年科技団特別研究員として電総研で研究に従事. 1999 年 11 月から (財) ソフトピアジャパン HOIP 研究室主任専門研究員. 工博. 画像マッチング, ステレオ画像処理, 3 次元モデリングの研究に従事.

丹羽 義典 1974 年, 名古屋大学工学部卒. 同年岩崎通信機 (株) 入社. 1978 年岐阜県 (金属試験場) 入庁. 現在 (財) ソフトピアジャパン地域結集型共同研究推進室長. 主に画像認識, CAD/CAM 関連の研究に従事. 第 6 回画像センシングシンポジウム論文賞受賞.

山本 和彦 1971 年, 東京電大大学院修士課程修了. 同年電子技術総合研究所入所. 手書き文字認識の研究に従事. 1979~1980, 米国メリーランド大学コンピュータビジョン研究所で, 並列分散処理による画像理解の研究. 1986~1994, 電子技術総合研究所知能情報部画像研究室室長. 現在岐阜大学工学部応用情報学科教授. 人工知能, パターン認識, 特に図形の柔軟な対応付けの研究に従事. 工博. 第 6 回画像センシングシンポジウム論文賞など受賞.