

## 研究テーマ イメージングシステムへの応用

研究者	棚橋英樹	財団法人ソフトピアジャパン	雇用研究員
	佐藤 淳	名古屋工業大学	兼業研究員
	平湯秀和	財団法人ソフトピアジャパン	雇用研究員
	王 彩華	財団法人ソフトピアジャパン	雇用研究員

### フェーズ I

#### 1 研究の概要

本研究では、全方向ステレオシステム (SOS) の各ステレオユニットの座標系とシステム全体としてのグローバル座標系間の正確な位置関係を求めるキャリブレーション手法を開発した。得られたキャリブレーションパラメータを用いて、SOS の各ステレオユニットから得られた全方向画像をグローバル座標系にマッピングし、一つの全視野画像に統合する手法を確立した。

#### 2 研究の目標

SOS は正多面体に設置した複数のステレオユニットから構成され、周囲環境に関する  $360^\circ \times 360^\circ$  全視野のカラー情報と 3 次元距離情報をリアルタイムに同時に取得することができる。このような特徴を利用して、動的環境における複数のイベントの同時抽出、現実環境からの 3 次元仮想環境の構築や各方向の画像から死角のない球面統合画像の生成は極めて容易になる。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。本研究では、SOS 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。また、得られたキャリブレーションパラメータを用いて、継ぎ目のない全方向画像を生成する。

#### 3 実施内容

##### 3.1 システムキャリブレーション

SOS の各ステレオユニットを構成する 3 個のカメラの間にすでにキャリブレーションが行われている。本研究では、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行う。つまり、SOS のグローバル座標系に対する各参照カメラの並進 (3 自由度)・回転 (3 自由度) のパラメータを正確に求めなければならない。

##### 3.1.1 ワールド座標系とカメラ座標系

ワールド座標系と参照カメラの座標系は図 1 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により、関連づけることが可能である。

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に、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。

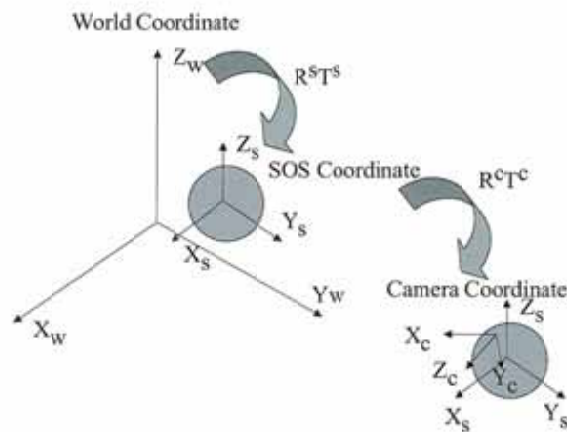


図1 ワールド座標とカメラ座標系の関係

### 3.1.2 キャリブレーションパターンの取得

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て行うことができる。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である。本研究では、大きさと形状が既知の没入型6面ディスプレイ（以下 COSMOS と呼ぶ）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SOSのキャリブレーションを行った。図2にはCOSMOSの構成を示す。

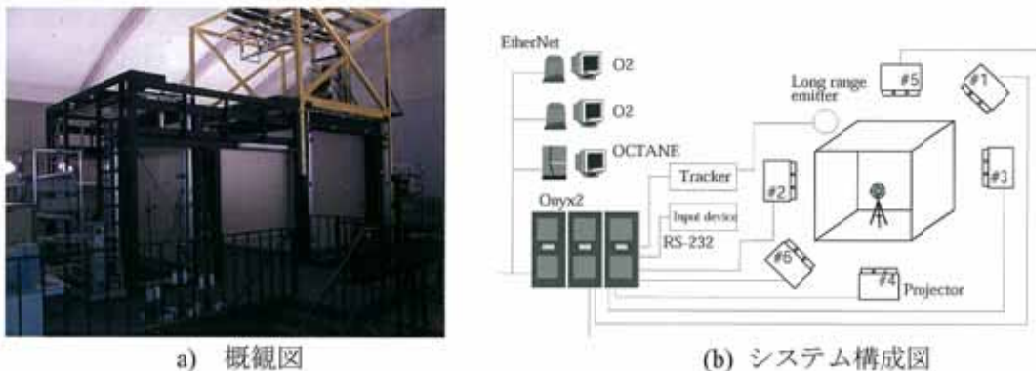


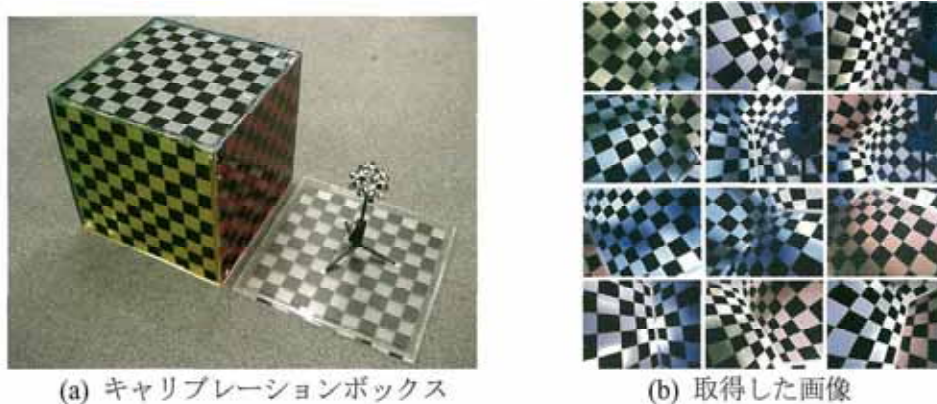
図2 没入型6面ディスプレイ(COSMOS)

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、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3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。この対応付けは手動で行った。



図3 格子パターン画像例

なお、初代 SOS の後続機種として開発された小型 SOS (miniSOS) は体積が遥かに小さく、システム中心から 20cm 離れた空間を死角なしでカバーできる。そのため、図 4(a)に示すように、miniSOS 用のキャリブレーションボックス (サイズ: 50cm×50cm×50cm、チェッカーパターンの間隔は 5cm) を製作し、それを用いて miniSOS のキャリブレーションパターンを取得した。図 4(b)は miniSOS で取得したキャリブレーションパターンの画像を示す。



(a) キャリブレーションボックス

(b) 取得した画像

図4 miniSOS 用のキャリブレーションボックス

### 3.1.3 画像射影誤差の最小化によるシステムキャリブレーション

各参照カメラ  $i(i=1, \dots, 20)$  から得られた格子パターンの 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  $3 \times 4$  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。

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

ここで  $\lambda$  は任意のスカラー量であり、 $\tilde{m}_i = [m_1, m_2, m_3]^T$  と  $\tilde{X} = [X_1, X_2, X_3, X_4]^T$  は、それぞれ  $m_i = [u, v]^T$  と  $X = [X, Y, Z]^T$  に対して、 $[m_1, m_2, m_3]^T \sim [u, v, 1]^T$  と  $[X_1, X_2, X_3, X_4]^T \sim [X, Y, Z, 1]^T$  に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。

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

ただし

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

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

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、SOSの各ステレオユニットはすでにキャリブレーションされているため、これらのパラメータは既知である。

各格子点の3次元ワールド座標とそれらの座標から各カメラの画像に射影された2次元格子点の対応を用いて、式(1)の残差の二乗和を最小化することによって、ワールド座標系に対する各カメラの外部パラメータ $R_i^c$ と $T_i^c$ を求めることができる。上に述べたように、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。本研究では、各カメラの並進 $T_i^c$ 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。

### 3.1.4 最適パラメータの推定

本研究では、線形手法と非線形手法を組み合わせ、各カメラの外部キャリブレーションパラメータを効率的かつ精度良く求める。まずステップ1では、線形解法を用いて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 $T^s$ 、 $R^s$ と $R_i^c$ 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 $T^s$ 、 $R^s$ と $R_i^c$ 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 $T^s$ 、 $R^s$ と $R_i^c$ 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 $p = [T_j^s, \theta_j^s, \theta_{i,j}^c]$ 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 $e$ の変動 $\Delta e = [\Delta e_1, \dots, \Delta e_{66}]$ を計算する。
5. 以下にもとづき $p$ を微小変化させる。

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

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 カメラ間の色合わせ

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。本研では、上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を開発した。

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 40cm 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 5(a)) を得られたキャリブレーションパラメータを用いて、基準とするカメラの画像座標に投影する (図 5(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 6) を得ることができる。

注目カメラとそれに隣接するカメラの共通領域では、環境中の同じ物体を写っている。それらの物体はほぼ乱反射表面を持つと仮定した場合、共通領域の色分布は同じである。本研究では、注目カメラとは隣接カメラの共通領域の RGB ヒストグラムを同じになるように自動的に調整することで、カメラ間の色合わせを行う。

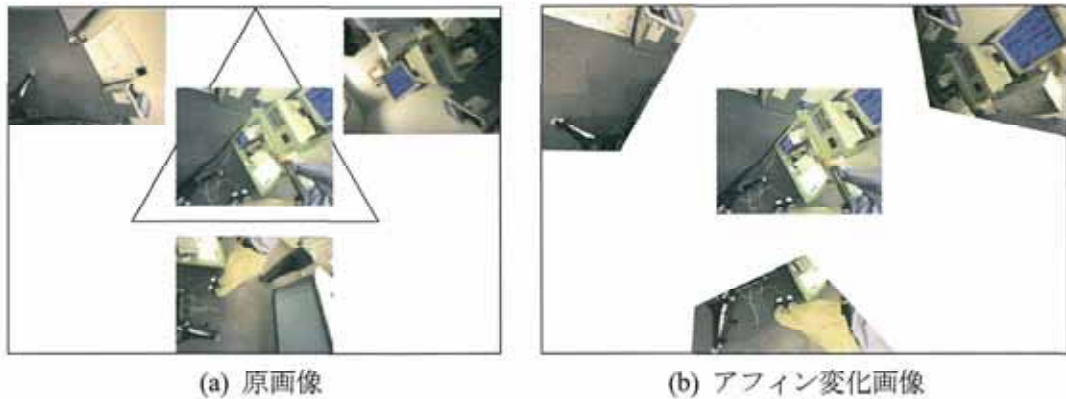


図 5 隣接カメラの画像のアフィン変換

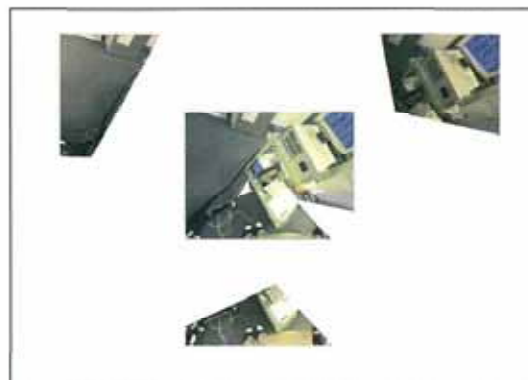


図 6 共通領域の抽出

注目カメラを  $C$  とし、その隣接カメラ  $C1$ 、 $C2$ 、 $C3$  とする。カメラ  $C$  の 共通領域の色ヒストグラムを  $h_c(R)$ 、 $h_c(G)$ 、 $h_c(B)$  とし、その隣接カメラの共通領域の合計色ヒストグラムを  $h_{c1c2c3}(R)$ 、 $h_{c1c2c3}(G)$ 、 $h_{c1c2c3}(B)$  とする。本研究では、注目カメラ  $C$  に対して、 $h_c(R)$ 、 $h_c(G)$  と  $h_c(B)$  をそれぞれ  $h_{c1c2c3}(R)$ 、 $h_{c1c2c3}(G)$  と  $h_{c1c2c3}(B)$  に近づくように微調整する。この処理をすべてのカメラに対して独立に行ったら、一回の処理は終了する。この処理で各カメラとその隣接カメラの共通領域の新しい色ヒストグラムが得られる。上述の処理を繰り返して適用すれば、各カメラとその隣接カメラの共通領域の色ヒストグラムは近づいていく。最後に、得られた各カメラの調整後の色ヒストグラムを用いて、色変換ルックアップテーブルを生成し、それを用いて各カメラの色の変換を行う。

### 3.3 画像統合

SOS から取得されるカラー情報は、各カメラの取り付け角に応じた回転を含んだ 20 枚の画像として取得されるため、そのままではそれぞれの位置関係を直感的に把握することが難しい。本システムにおいては、各センタカメラの光学中心が 1 点に集中していないため、2 次元画像のみを用いて中心射影画像を完全に表現することはできないが、対象までの距離を仮定することにより、近似的な合成画像を作成することができる。

システムを中心から固定距離  $d$  に物体が存在する場合、画像を合成するための各カメラの必要な視野角は図 7 のように計算することができる。それに基づいて各カメラの画像から必要なサイズの領域を切り出し、合成画像を生成することができる。正 20 面体 SOS の場合、合成画像を作るには、各カメラの画像において、画像中心を中心とする三角形領域を切り出す必要がある。その三角形のサイズとしての中心から各辺までの距離（画素数）は式(6)で計算することができる。正 12 面体 SOS の場合も、同様な手法で切り出し領域のサイズを決めることができる。

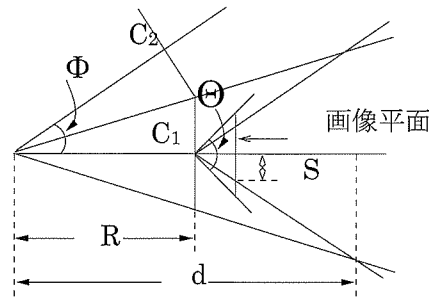


図 7 画像合成に必要な視野角

$$S(d) = \frac{X_{size} \tan(\Theta / 2) d}{2 \tan(\Phi / 2) (d - R)} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\Phi$  はカメラの水平画角であり、 $\Theta = 42.1^\circ$  は 20 面体の各面を中心軸の間の角度である。R はシステム中心から各カメラまでの距離であり、デザインパラメータから既知である。

各画像から切り出した画像領域をさらに球面や球面を円筒に展開した画像にマッピングし、様々な全視野画像を生成することができる。

## 4 結果

COSMOS に表示した格子パターンを SOS で画像を取得し、それを用いて SOS のキャリブレーションを行った。その実験の概要と結果を示す。

### 4.1 SOS のキャリブレーション

COSMOS で取得した格子パターンの画像から直線検出フィルタを適用し、閾値処理で直線を検出した。次に、Hough 変換を適用し、各直線の正確な位置と向きを検出し、各直線の方程式を求めた。直線方程式から、異なる方向の直線ペアの交差点座標を正確に計算し、手動でワールド座標の 3 次元点と対応つけた。図 8 は図 3 の格子パターン画像に対する直線検出結果を示す。

COSMOS の上下左右前後の 6 面に投影した格子パターンの格子点とワールド座標系の 3 次元点の対応から、前章で述べた手法を用いてシステムのキャリブレーションを行った。キャリブレーションの精度を評価するため、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 1 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。

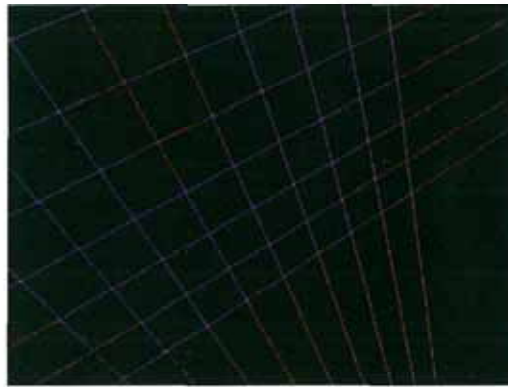


図8 図3の画像の直線検出結果

表1 画像座標における平均誤差 (pixel)

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

図9に投影した画像例を示す。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。

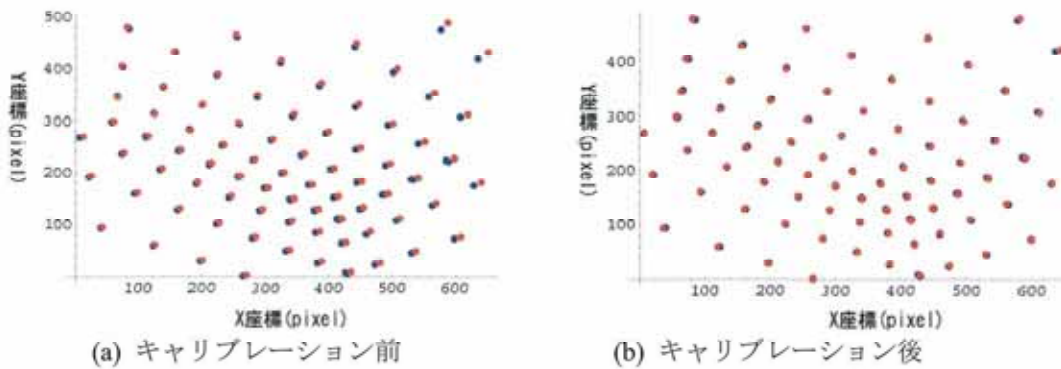


図9 キャリブレーション結果

また図10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10(a)はキャリブレーション前の結果であり、図10(b)はキャリブレーション後の結果である。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。

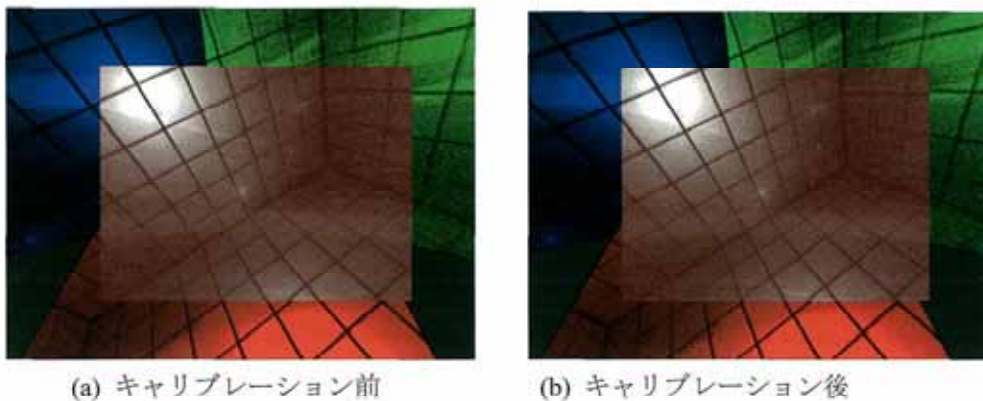
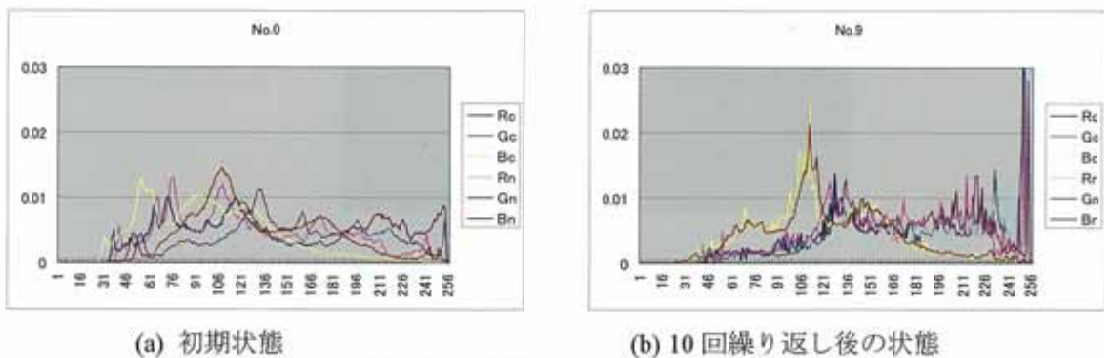


図10 画像統合結果

#### 4.2 色合わせと画像統合

普通のオフィス環境でSOSを用いてカラー画像を取得し、上で述べた手法で色のキャリブレーション

ションを行った。図 11 には共通領域の正規化ヒストグラムの初期状態と 10 回目の繰り返しを経たヒストグラム状態を示す。図 12 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、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。



(a) 初期状態 (b) 10 回繰り返し後の状態  
図 11 共通領域の正規化ヒストグラムの変化

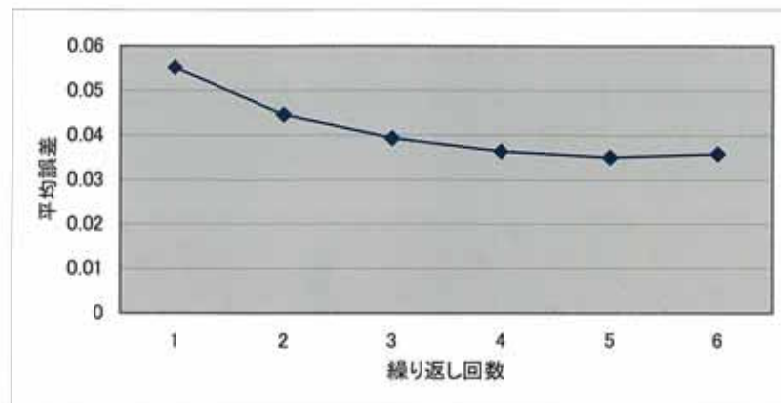


図 12 正規化ヒストグラムの平均誤差の推移

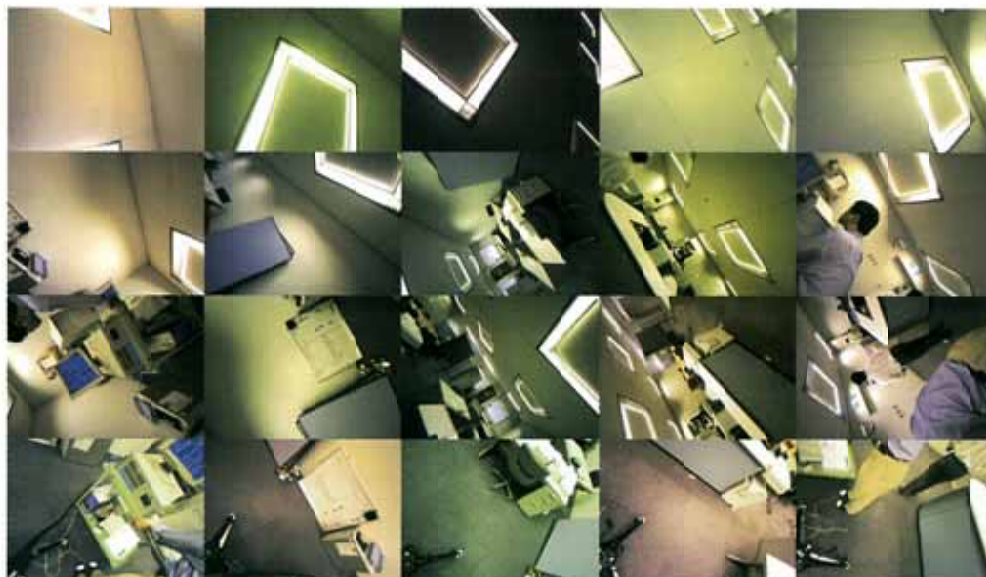


図 13 SOS で取得した 20 枚の全方向画像の例

SOS のキャリブレーションパラメータおよび色調整結果を用いて、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。図 13 は、取得した全 20 枚のカラー画像の例を示す。それぞれの画像のカラーキャリブレーションを行った後、提案法で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、全方向パノラマ画像を生成した。その結果は図 14(a)に示す。



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14(b)に示す。



(a) キャリブレーション後



(b) キャリブレーション前

図14 全方向パノラマ画像

また、図15(a)、(b)に図14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。



(a) キャリブレーション後



(b) キャリブレーション前

図15 図14の拡大画像

## フェーズ II

### 1 研究の概要

フェーズ I では、SOS システムのキャリブレーションと色調整を行った。それらのキャリブレーション結果を用いて、SOS の各ステレオユニットから得られたカラー画像と 3 次元情報を統一した座標系に統合し、連続した球面画像や全視野円筒展開画像を生成することは可能になった。フェーズ II では、全天周カラー画像および距離情報がリアルタイムに得られるといった SOS の特徴を生かし、今まで考えられなかった新しい応用システムを開発した。

本研究では、主に SOS の全天周特性を利用したイメージングアプリケーションシステムを開発した。まず、マルチユーザの任意視線方向要求に対応できるライブ映像配信システムを開発した。このシステムでは、複数のユーザが競合することなく、SOS が設置されている場所の周囲情景を自分の好きな角度で見たり、注目する目標を追いかけてたりすることができる。また、SOS の全方向距離画像とカラー画像から周囲環境の 3 次元モデルを生成し、それを用いて任意の仮想視点 (SOS が実際に位置していない場所) からの映像をリアルタイムに生成し、表示するアプリケーションを開発した。これは、バーチャルリアリティ (VR) や遠隔モニター・操作などの応用分野に大変有効であることが期待できる。

### 2 研究の目標

SOS に今までに考えられなかったまったく新しい応用展開の可能性が大いに秘められている。本研究では、このような可能性を実現し、その有効性を示すためのシステム開発を行う。ここで、SOS の死角がない特性を生かし、SOS で得られた全視野カラー画像を用いて、複数ユーザに対し、各々のユーザが好きなカメラアングルをインタラクティブに指定できるライブ映像をネットワーク上に配信するシステムを開発する。また、SOS が全方向距離情報とカラー画像を同時に取得することができるため、周囲情景の 3 次元モデルを生成することができる。この 3 次元モデルから任意の視線方向だけではなく、任意視点の映像を生成することも可能である。本研究では、SOS で得られた 3 次元環境のパッチモデルから任意視点の映像を生成する。さらに、3 次元データを携帯電話などに配信できるように、SOS の距離データから平面を抽出し、簡略化した 3 次元近似モデルを生成する手法を提案する。

### 3 実施内容

#### 3.1 インタラクティブ自由視線方向ライブ映像配信システム

インターネットの普及や高速化に伴い、インターネットを利用したライブ映像配信は盛んに行われている。普通のカメラを用いたライブ映像のネット配信では、すべてのユーザは同じ映像を受動的に受信しかできない。リモート制御可能なパンチルトカメラを用いて配信している場合、多くのユーザが一台のカメラの制御を取り合い、一人がカメラを制御すると、他のユーザはその人の好みの映像を受動的に見るしかない。こういった問題を解消するために、全方位カメラを用いたテレプレゼンスシステムが開発されているが、全方位カメラの上下に死角が存在する問題や、得られる画像の解像度の低さと空間分解能の不均一さの問題がある。

我々は開発した SOS は死角なしで SOS を中心とした全空間をカバーすることができると同時に、すべての方向において、均一かつ高解像度のカラー画像と距離情報を実時間に取得することができる。このような全天周高解像度の実時間のライブ映像を用いれば、複数ユーザにそれぞれの好きな視点方向の高品質の映像を提供することは可能である。

##### 3.1.1 システムの構成

本研究で開発されたインタラクティブ自由視線方向ライブ映像配信システムの基本構成は図 16 に示す。本システムは SOS、サーバーとクライアントから構成される。SOS は周囲環境の全方向画像を取得する。サーバーは、SOS から全方向画像をキャプチャーし、全天周円筒展開画像を生成し、圧縮して各クライアントに送信する。クライアントはサーバーから圧縮全天周円筒展開画像を

受信し、解凍して3次元球面モデルにマッピングする。同時に、ユーザの操作を受け、その操作で指定されたカメラ視線方向の画像をディスプレイに表示する。

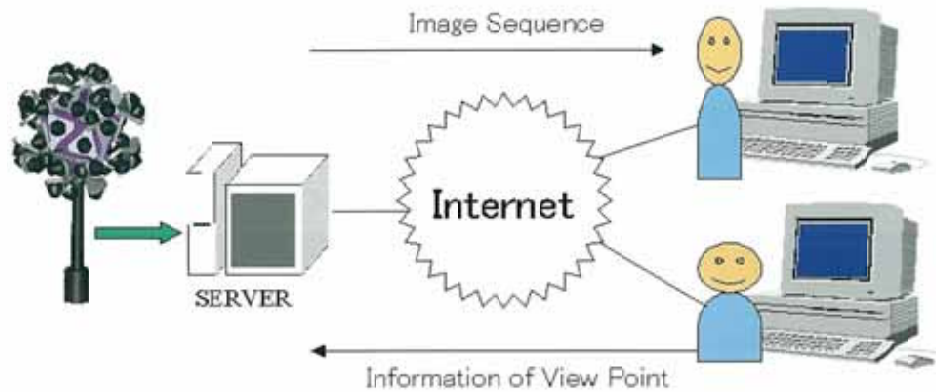


図16 システム構成

図17にはシステムの一連の処理手順を示す。リアルタイム性を確保するために、サーバーには2CPUのPCを使用し、画像キャプチャーや円筒画像の生成と画像圧縮送信などの処理をマルチスレッド化した。

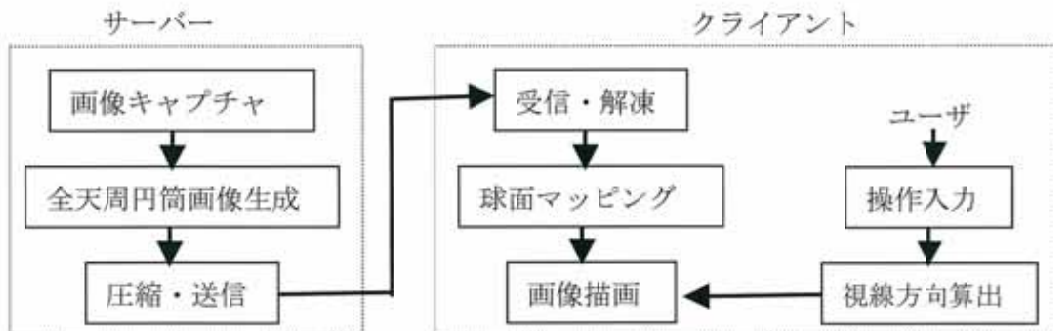


図17 処理のフローチャット

### 3.1.2 実験内容および結果

実験では、SOSを3.7m×3.7m×2.7mのパーティションのほぼ中央に設置し、複数の人物がパーティションの中で活動しているシーンの全方向カラー画像とステレオ画像をリアルタイムにキャプチャする。図18はSOSが設置されている環境を示す。本システムはSOSの各センタカメラのカラー画像のみを用いて、全視野円筒展開画像を生成する。サーバーにはDellの3.2GHzの2CPUのPCを使用した。SOSからサーバーへ2本の光ファイバーで全方向画像を15fpsのフレームレートで転送する。サーバー側では、マルチスレッド処理によって、画像キャプチャ、円筒画像生成と画像圧縮・転送など一連の処理を15fpsのフレームレートで行うことが可能である。クライアント側として、4台のPCはLANを通してサーバーに繋がっている。クライアント側に用いたPCは、ノートブックPCを含め、スペックは様々であった。図19はクライアント側として設置した4台のPCを示す。クライアント側のPCはサーバーから圧縮された全視野円筒画像を受信・解凍し、3次元球面にマッピングして表示する。ネットワークの状況にもよるが、クライアント側はほぼ10fpsのフレームレートで画像を更新することができた。ユーザはマウス操作によって、3次元球面を回転して、見たい方向の映像を見ることができる。また、全体環境に対して、見ている方向の方位角を把握するため、または、好きな方向の映像を見ながら、空間全体のイベント状況をチェックしやすいため、表示ウインドの右下に全視野円筒展開画像を表示すると同時に、今見ている方向を示すナビゲートマーカを表示している。図20には、異なるユーザが同時に各自の好きなカメラアングルで見たライブ映像を示す。

なお、PCM2001 (Second IEEE Pacific Rim Conference on Multimedia) では、ソフトピアジャパン

と北京の間でデモを行った。その場合、クライアント側に2台のノートPCを用いた。インターネットの通信状況により、1fpsのフレームレートしか得られなかったが、複数のユーザに対し、それぞれの好きなカメラアングルをサポートできることを示した。

また、ギガビットネットワーク（情報ハイウェイ）を通して、SOSの全方向画像を図2に示した6面没入型ディスプレイ（COSMOS）に遠隔表示する試みも行った。COSMOSとSOSは共に全天周特性を持っているため、SOSがキャプチャーした実世界の映像をCOSMOSにリアルに表示することができる。図21はその表示の一例を示す。このような全天周カメラと表示装置は、遠隔監視や災害地など危険場所の情報収集などに大変有効であることが考えられる。



図18 実験環境



図19 クライアント側



(a) ユーザ1の画面



(b) ユーザ2の画面

図20 複数ユーザのブラウザ画面



図21 SOSの画像をCOSMOSで表示した例

### 3.2 全天周3次元ライブ映像システム

SOS は全天周のカラー画像ではなく、全方向の距離画像も同時に取得することができる。SOS の各ステレオユニットはセンター、トップとレフトの三つカメラからなっている。センターとトップカメラ、センターとレフトカメラはそれぞれ2つのステレオを構成し、この2つのステレオカメラペアを同時に用いてステレオマッチングを行うことによって、高精度と高信頼度の3次元情報を取得することができる。図22は、SOSを用いて実環境で取得した全方向の距離画像を示す。白いほうは距離が近いことを示す。ブラックの部分は3次元環境においてその部分にテクスチャーがないため信頼的なステレオマッチングが取れなかったことを示す。

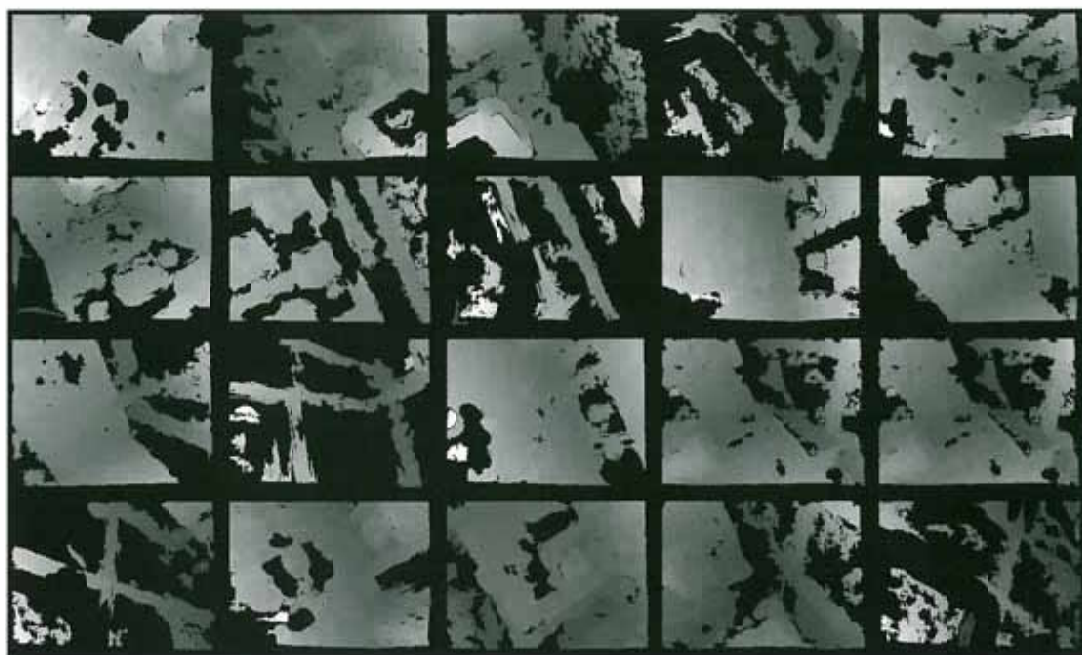


図22 SOSが取得した全方向距離画像の例

SOS で得られた実時間の全方向カラー画像と距離画像から環境の3次元ライブモデルを生成することができる。それを用いてSOSが実際に存在しない任意の視点(仮想視点)から見た実際の環境の映像を生成することができる。しかも、視点を変えながら、3次元ライブ映像をリアルタイムに見ることができる。また、SOSで得られた3次元ライブモデルを前述のCOSMOSに表示することもでき、立体感、臨場感とリアリティが溢れた3次元ライブ映像を作り出せる。図23はSOSで得られた実時間の全方向カラー画像と距離画像から3次元ライブモデル生成し、それを用いて3次元空間をフライして生成した仮想視点3次元ライブ映像中の幾つかのフレーム例を示す。



図23 SOSで生成した仮想視点の3次元ライブ映像

### 3.3 3次元環境モデルの生成

SOS は全方向カラー画像と距離画像を実時間に取得することができるが、これらの3次元は膨大な量になる。インターネットで3次元ライブ映像の配信や、遠隔ロボットによる情報収集などの応用では、膨大な量の3次元データをモデル化し、元の3次元情報を保存しながらデータ量を大幅に削減することが重要である。本研究では、建物内や市街地など人工物の多い環境においては平面が多く存在することに注目し、SOS で得られた全方向距離画像から平面領域を抽出し、それをを用いて3次元環境のモデル化を行う。このような3次元環境モデルを用いて、少ないデータ量で環境の3次元情報を表現できるため、インターネットや携帯端末への3次元映像の配信は可能になる。また、得られた3次元環境マップは自律ロボットの移動経路の計画や物体との衝突回避等に大変有効である。特に移動体 SOS が机の下を探索する等の目的を遂行するために、3次元環境マップは欠かせない。

#### 3.3.1 SOS の距離画像から3次元平面領域の抽出

SOS のステレオ画像からステレオマッチングによって得られた距離情報は、レンジファインダ等の能動的センサと比較すると、距離情報の欠落やノイズを多く含むという欠点はある。しかし、SOS から得られる全方向距離情報は、一般的なステレオカメラから得られる3次元情報と比べて、画角が広い分、データ量が多い。したがって、得られる3次元情報が多いため、統計的な手法を用いて、安定した平面領域を求めることができる。本研究では、SOS から得られた20個の距離画像を統合した円筒距離画像に対して、平面抽出を行う。図24は得られた円筒カラー画像と距離画像を示す。



図24 SOS で得られたカラー画像(上)と距離画像(下)

#### ● 平面領域を求める手法

1.  $15 \times 15$  の局所平面を当てはめ、平面方程式を求め、その法線ベクトルを求める。図25は図24の距離画像から計算した局所領域の法線ベクトルの $(X, Y, Z)$ 成分を R, G, B に変換し、擬似カラーで示したものである。同じ色は法線ベクトルの同じ向きを示す。



図 25 距離画像から得られた局所法線ベクトル

2. 平面方程式から得られた法線ベクトルを、法線ベクトルのヒストグラム空間に射影する。法線ベクトルは Gauss 球面に分布するが、本研究では、処理の単純化を図るため、図 26 (a) のように Gauss 球面を横と縦の2つのリング状に分割し、それぞれのリング領域を図 26 (b) に示す2つの矩形空間に写像し、法線ベクトルのヒストグラムを生成する。

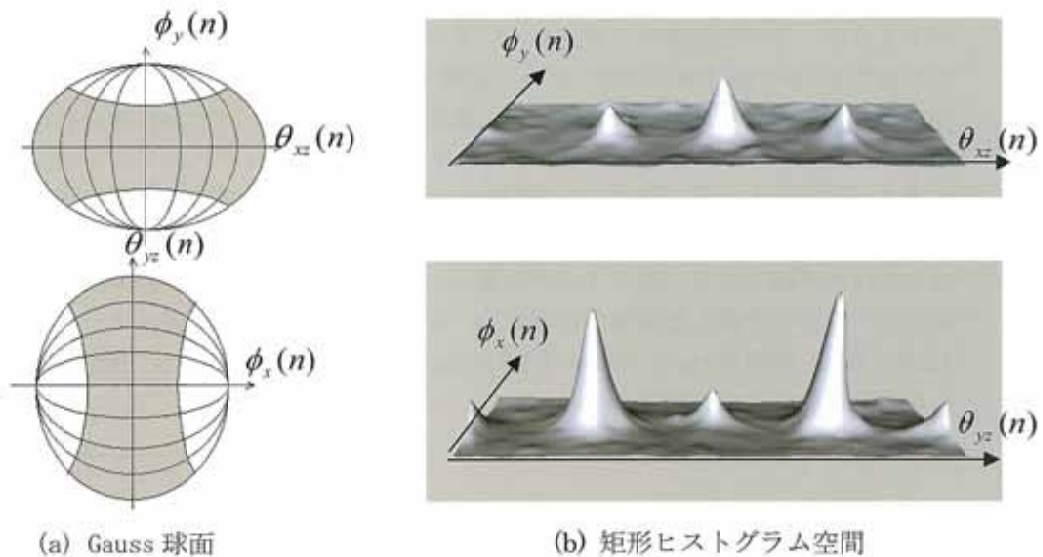
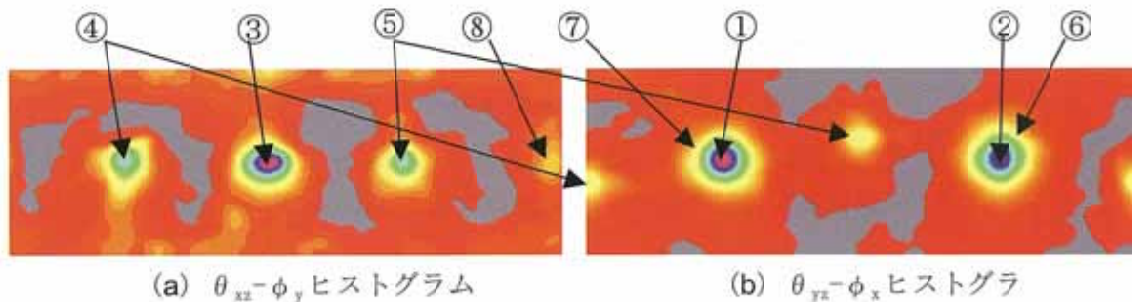
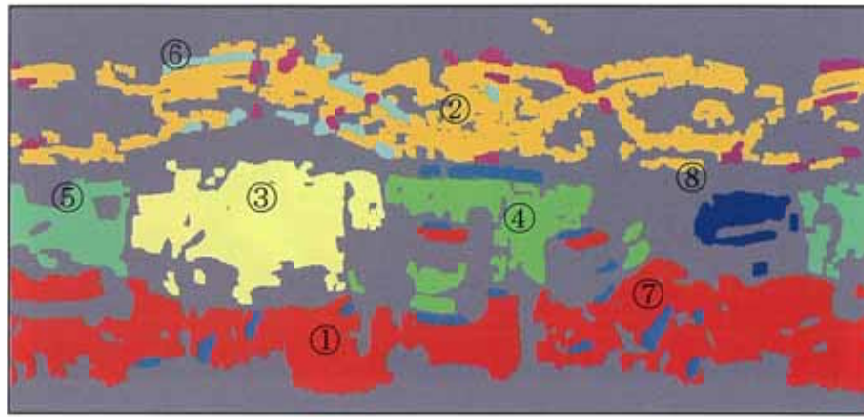


図 26 法線ベクトルヒストグラム空間

3. 上記の特徴空間ヒストグラムのピーク値は法線ベクトルのそろった領域、つまり平面領域となるため、特徴空間ヒストグラムのピークとなる部分を抽出することで、グローバル統計量に基づいた安定した平面領域の抽出が可能である。ここで、法線ベクトルヒストグラムのピークを大きい順で順次に検出し、そのピークを中心とした法線ベクトルの分布を抽出することによって、安定した平面領域（ほぼ同じ法線ベクトルを持った平面領域）を抽出することが可能となる。図 27 は検出された法線ベクトルヒストグラムのピークとそれらのピークが対応する平面領域を示す。この場合、①等において、床や机、台車等の平面部分が同一平面領域として抽出される。





(c) 抽出された平面領域

図 27 法線ベクトルヒストグラムのピークとその平面領域

4. 同じ法線ベクトルの向きを持つ一つの平面領域において、そこに含まれる平面は、実際の 3 次元空間上のいろいろな場所に分布している。そこで、その分布特徴を平面領域のグローバル特徴として、一つの平面領域から種となる平面を抽出する。ここで、図 28 (b) に示すように、各平面領域の 3 次元点を、その法線ベクトルに射影し、1 次元ヒストグラムを生成する。各平面は同じ法線ベクトルを持っていても、異なる 3 次元位置に存在すれば、生成された 1 次元ヒストグラムにおいて異なる分布をなす。このような分布を抽出することで、同じ法線ベクトルを持つが 3 次元の位置が異なるそれぞれの平面を抽出することができる。図 28(a)には、図 27(c)の領域①に対して生成した 3 次元位置ヒストグラムを示す。そのヒストグラムに 4 つの分布が存在し、4 つの平面領域に対応している。最も大きな分布は床平面であり、他の 3 つの分布 a、b と c は机の表面などの平面に対応する。分布のピークから計測した床面から平面 a、b と c までの値と実測値はそれぞれ 40cm(実測 42cm)、85cm(実測 87cm)と 102cm(実測 100cm)であった。この値から、統計量としての SOS の距離情報はかなり正確であることがわかる。

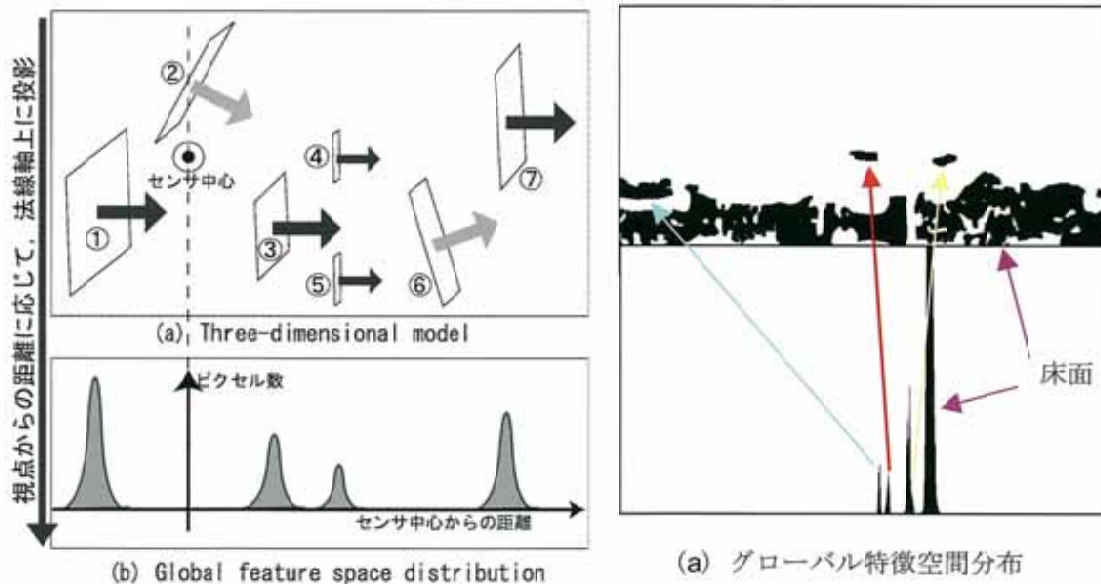


図 28 平面の 3 次元位置分布

5. 図 27 のすべての領域に対し、上の処理得られた平面領域の 3 次元位置分布のピーク値から種となる平面を抽出する。図 29 に示す 18 個の種となる平面は抽出された。



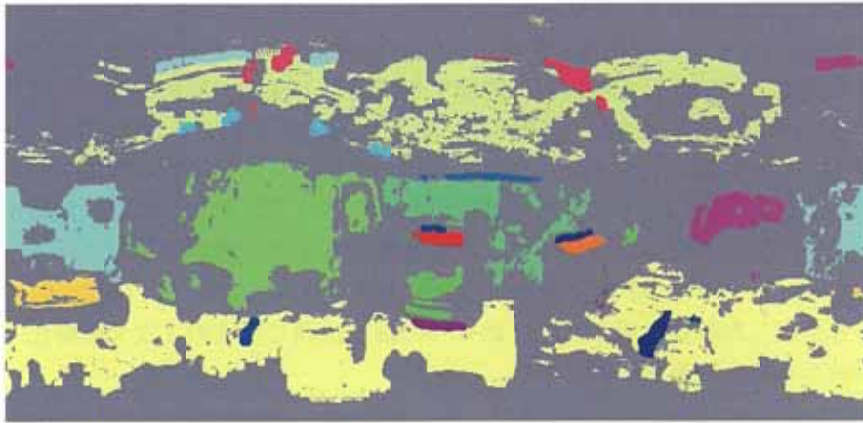


図 29 抽出された種となる平面領域

6. 幾何学的な距離（3次元距離）に基づく平面領域成長法

安定した領域の周辺部もやはり同一平面であると仮定し、安定した種平面に対して、領域成長法を適用する。ただし、ただ単に領域成長を行うのではなく、幾何学的な距離と法線ベクトルの角度に関する制約条件を設ける。

まず、個々の安定した種平面の平面方程式を求める。次に、種平面に対して領域成長法を適用させる。具体的には、下記の2つの制約条件に基づき、安定した種平面に対して平面領域成長法を実施する。

- a. 膨張した部分に対して、平面方程式を当てはめたときの誤差がある閾値以内である。
- b. 膨張した部分の法線ベクトルと種平面の法線ベクトルの角度差がある閾値以内である。

図 30 は最終で得られた平面領域を示す。図 30 から本手法は妥当な結果を得られていることがわかる。比較するために、図 31 には特徴空間ヒストグラムのピークを基に分布を推定して抽出する従来手法で得られた結果を示す。

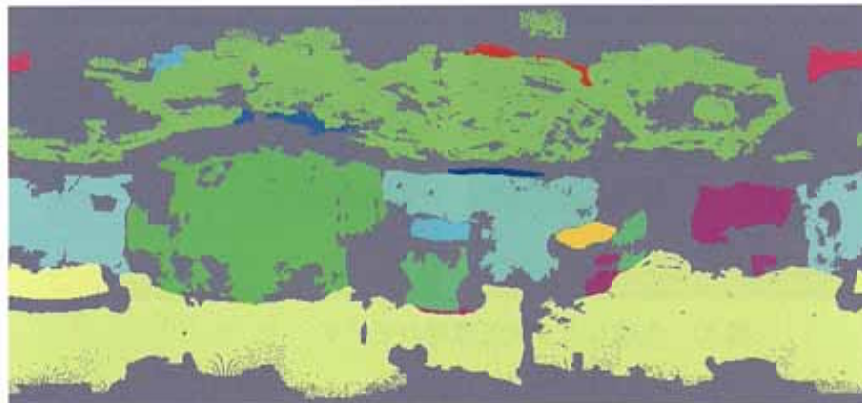


図 30 最終結果

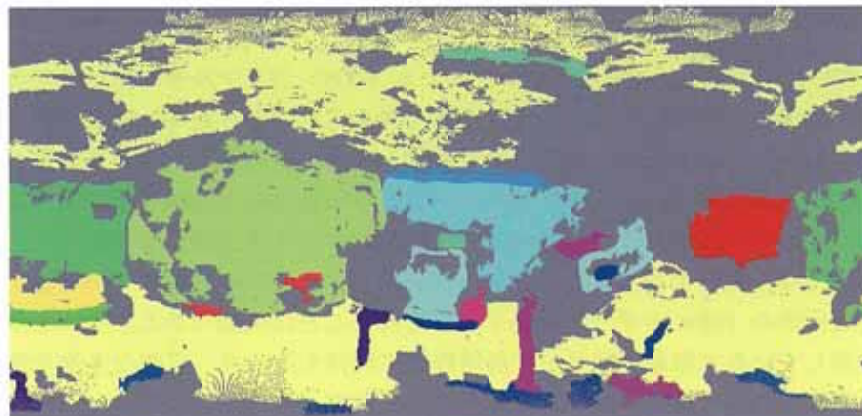


図 31 従来手法の結果

### 3.3.2 平面領域から3次元環境モデルの生成

上で得られた大きな平面を用いて環境の簡略化モデルを構成することができる。本研究では、円筒画像における各平面間の隣接関係を検出し、隣接する平面の3次元方程式を用いてそれぞれの平面の境界を計算する。3次元空間における不連続性によって生じた平面領域の境界部分では、2次元と3次元エッジを用いてその境界を決める。また、環境中のテクスチャーの有無により信頼的な距離情報が得られなかった部分については、その隣接平面を用いて近似する。また、距離が得られても平面として抽出されなかった部分については、それに隣接しかつ距離が最も似ている平面領域を選択し、その平面を用いてそれらの平面ではない部分を近似する。図32は上で抽出された平面を用いて簡略化モデルを生成した結果を示す。図32の4つの画像は同じ環境の3次元簡略化モデルを異なる視点や視線方向から見た映像を示している。

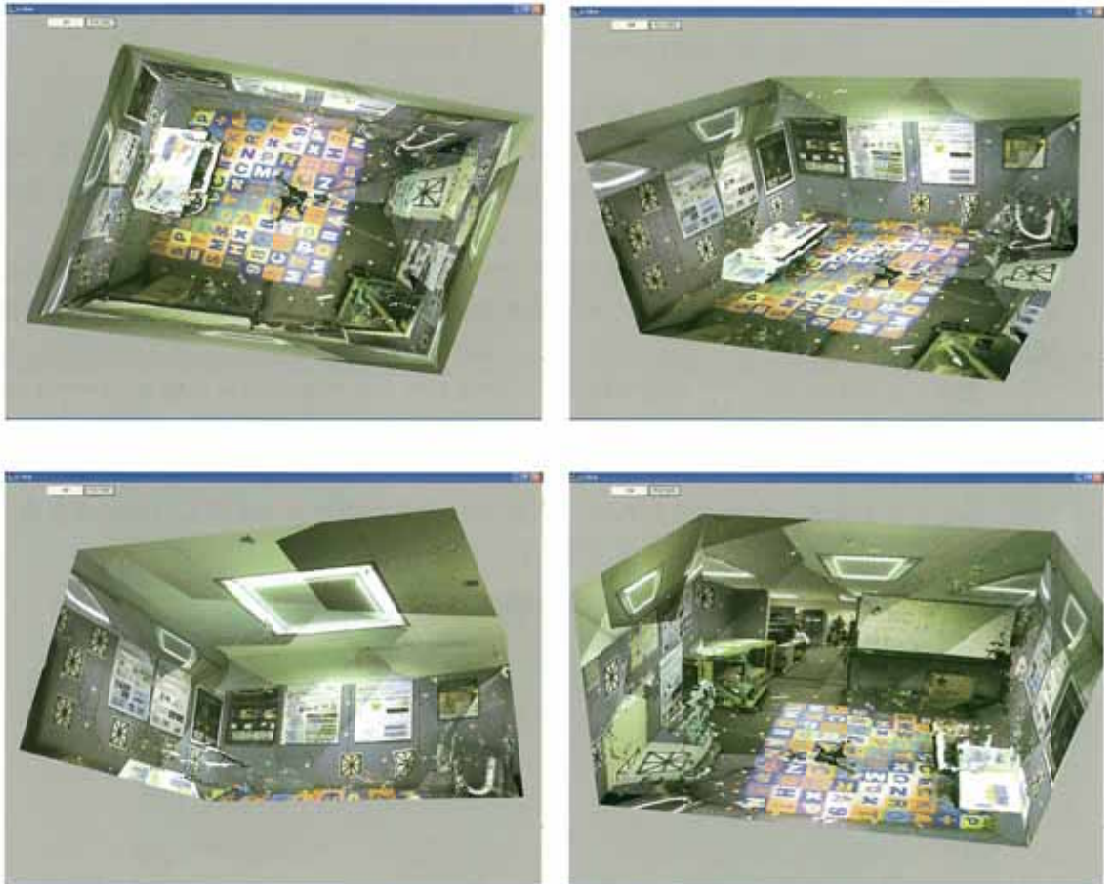


図32 生成した3次元環境のモデル

## フェーズ III

### 今後の取り組み

これまでの研究において、全方向ステレオシステム (SOS) がリアルタイムに全天周カラー画像と距離上を同時に取得できる特性を生かして、今まで考えられなかったインタラクティブ自由視線方向ライブ映像配信システム全天周3次元ライブ映像システムを開発した。今後の取り組みとしては、移動SOSによる遠隔監視・サーベイランスシステムや災害地など危険場所の情報収集などの応用が期待される。これらの応用では、全方向カラー画像および3次元形状を無線で転送することが望ましい。現時点では、SOSで得られた全方向3次元データとカラー画像のデータ量が多いため、実時間といえる最低限の10fpsのデータ転送レートを得ることは困難である。それを解決するために、飛躍的に進歩している大容量無線データ通信技術に期待する一方、正確な3次元形状モデリング技術や3次元環境の理解や認識技術の開発も不可欠である。