「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011)」 2011 年 7 月

立方体モデルのフィッティングを利用したカラーカメラとデプスカメラ間のキャリブレーション

冨安 史陽† 丸谷 宜史† 藤井 俊彰‡ 梶田 将司†‡ 間瀬 健二†

†名古屋大学大学院情報科学研究科〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1
‡名古屋大学大学院工学研究科〒464-8603 名古屋市千種区不老町 1
†‡名古屋大学情報連携統括本部 〒464-8601 名古屋市千種区不老町 1
E-mail: †{tomiyasu, marutani}@cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp, ‡fujii@nuee.nagoya-u.ac.jp,
{†‡kajita, †mase}@nagoya-u.jp

あらまし 高解像度カラーカメラと低解像度デプスカメラ間の高精度なキャリブレーションを行う. 両カメラ間のキャリブレーションはカラーカメラ画像の 2 次元座標とデプスデータの 3 次元座標との高精度な対応が必要となる．マス目を交互に切り抜きチェッカーパターンを構成した面からなる立方体型器具を対応関係の基準としたキャリブレーション手法を提案する．立方体型器具を撮影したカラーカメラ画像よりチェッカーパターンの 2 次元座標を得る．測定したデプスデータに対し立方体型器具のモデルとのフィッティングを行いチェッカーパターンの 3 次元座標を得る．3 次元座標をカラーカメラ画像に投影する投影誤差を評価尺度とし，提案手法と手動選択による手法とで格子点の 3 次元座標を算出し外部パラメータを求め比較実験を行なった.

キーワード キャリブレーション，デプスカメラ，カラーカメラ

1. はじめに

近年，自由視点映像を生成する研究が盛んに行われている．高精度な自由視点映像は，医療や教育，エンターテイメントなど幅広い分野で応用可能である．例えば，医療の分野では手術の練習用映像として，教育の分野では教材用ビデオとして，またエンターテイメントの分野では新しいコンテンツとして応用が期待できる[1].

視点制約のない自由視点映像視聴を実現するためには，被写体表面の 3 次元情報と色情報を同時に表現する 3 次元モデルを作成する必要がある．3 次元情報の取得にはステレオ視のようにカラーカメラを用いる方法もあるが，ステレオ視では複数カメラでのテクスチャ情報の対応が必要とされるため，単色平面の 3 次元情報を得にくいという欠点もある．一方でデプスカメラは撮影範囲の 3 次元座標値を直接求めることができるので，本研究では 3 次元情報の獲得に Time-of-Flight（TOF）の原理を用いたデプスカメラを使用する．しかし，デプスカメラは色情報を取得する機能がないため高解像度なカラーカメラを併用することで，目的とする 3 次元モデルを作成するものとする.

カラーカメラとデプスカメラの併用にあたっては，通常カラーカメラ座標系とデプスカメラ座標系それぞれの世界座標系における相対的な位置関係が分からない．そこで，両カメラ間のキャリブレーションが必要となる．このキャリブレーションは，両カメラ間の位置関係を変更しない限り一度行うだけでよい．また，両カメラ間のキャリブレーションが 3 次元モデル生成に影響を与える．キャリブレーションによる両カメラ間の外部パラメータの算出は，デプスカメラ座標系を世界座標系とみなすように設定することで，カラーカメラ座標系と世界座標系間の外部パラメータを算出する問題となる[2].

この両座標系間の外部パラメータの算出は，基準となる世界座標系の 3 次元座標点とそれを撮影したカラー画像座標系の 2 次元座標点との正確な対応が必要となる. しかし, TOF デプスカメラはカラーカメラと比較して低解像度であるため，カラーカメラの各ピクセル位置に対応した正確な世界座標系における 3 次元座標値を得ることが難しいという問題がある.

3 次元座標と 2 次元座標との対応を求める同様の研究としては，椛島らの幾何拘束に基づく大域的手法とエッジ対応付けに基づく局所的手法を組み合わせることでレンジセンサデータとカラーカメラ画像との位置合わせを行う研究がある[3]．この研究では，撮影対象物が人工物である場合に，床や壁といった平面情報を使用して大域的に位置合わせを行い，従来の画像中のエッジ特徴を用いることで局所的な位置合わせを行うものである．しかし，撮影状況において必ずしも壁や床などの平面情報を撮影できるとは限らない．また，デプスカメラは解像度が低いために信頼できるエッジ特徴を直接的に使用することは不可能であるため，先述の問題を解決することはできていない.

そこで，本研究ではキャリブレーション用器具として，

正確な 3 次元座標値を推定できる立方体型器具を考案した．本研究ではこの器具を用い，低解像度のデプスデータに対し立方体型器具の高精度な位置合わせを行うことで，基準点となる正確な 3 次元座標値を導出する方法を提案する．求めた 3 次元座標値を使用してカラーカメラとデプスカメラ間の高精度なキャリブレーションを目指す．

以降，2 章でカラーカメラとデプスカメラ間のキャリブレーションについて説明する．3 章で立方体型器具を用いた正確な 3 次元格子点座標の算出方法について説明する．4 章で実験と考察を行い，5 章でまとめを述べる．

2. カラーカメラとデプスカメラ間のキャリブレーション

本研究では，高解像度カラーカメラと低解像度デプスカメラ間のキャリブレーションを行う．1 章で述べたように両カメラ間のキャリブレーションは，デプスカメラ座標系を世界座標系とみなすように設定することで，カラーカメラ座標系と世界座標系間の外部パラメータを算出する問題となる[2]．外部パラメータの算出は，世界座標系のある 3 次元座標点とそれを撮影したカラー画像座標系の 2 次元座標点との高精度な対応が必要となる．この様子を図 1に示す．

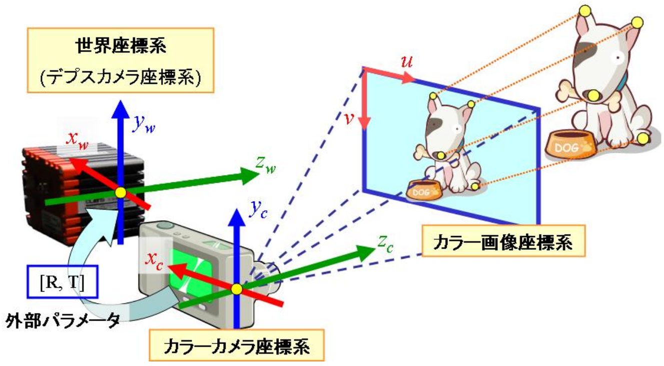


図 1 カラーカメラ座標系とデプスカメラ座標系

本研究では，カラーカメラとデプスカメラ間のキャリブレーションをするにあたり，Zhang の手法を使用する[4][5]．Zhang の手法では，ある 3 次元座標点とその点を撮影したカラー画像座標系での 2 次元座標点との対応を得るための基準としてチェッカーパターンの格子点を使用する．我々も Zhang の手法にならい，基準として用いる点はチェッカーパターンにより求めることとする．

カラーカメラでは，チェッカーパターンを撮影したカラーカメラ画像に対して Harris の手法を用いることでカラー画像座標系での格子点の精密な 2 次元座標値を算出することができる[6]．そこで以降では，低解像度デプスカメラにより測定されたデプスデータから基準点となるチェッカーパターンの格子点における 3 次元座標値を正確に求める手法について説明する．

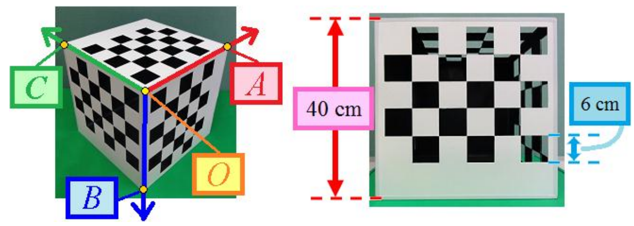
3. 立方体型器具を用いた 3 次元格子点座標値の算出

基準点となるチェッカーパターンの格子点における 3 次元座標値を正確に算出するためにキャリブレーション用器具として立方体型器具を作成した．3.1 節では立方体型器具について説明する．3.2 節では立方体型器具を用いた正確な格子点座標値の算出手法について説明する．

3.1. 立方体型器具

デプスカメラが低解像度であるという問題を解決するために，デプスカメラで取得した複数の 3 次元座標点から平面方程式を算出することを考える．多数の観測点から過剰制約で求められる平面は，実際の平面を精度よく近似している．同様にして求めた 3 平面が形成する交点の座標値も実際の交点の 3 次元座標値を精度よく近似していると期待できる．そのため，この交点およびこれらの平面を基準に求める他の 3 次元座標値も精度のよい 3 次元座標値であると考えられる．

上記の考えをもとに，高解像度カラーカメラと低解像度デプスカメラ間のキャリブレーション時に精度の高い格子点の 3 次元座標値を取得できる器具として立方体型器具を提案する．作成した立方体型器具の写真を図 2に示す．



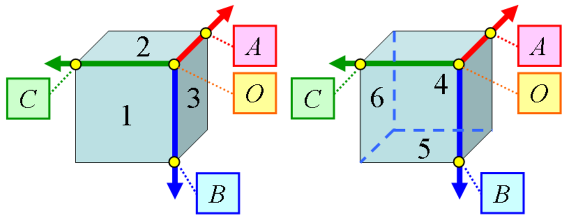
(a) 正面の撮影　(b) 側面の撮影

図 2 立方体型器具

立方体型器具は，表面が白色で裏面が黒色である平面 (40 × 40 cm)を 6 枚組み合わせた立方体である．このため内部は空洞となる．さらに，立方体のある 1 つの頂点を共有する 3 面に 15 個の四角い穴(6 × 6 cm)を開けることでチェッカーパターンを構成している．穴を開けたことにより，立方体型器具をカラーカメラで撮影すると白黒のチェッカーパターンが撮影できる(図 2-(a))．また，デプスカメラで測定すると，立方体型器具の表側平面のデプスデータと穴を開けた部分より裏側平面のデプスデータを取得できる．これにより立方体型器具の 6 面分のデプスデータを取得することが可能である．

立方体型器具の座標系は，チェッカーパターンを描いた 3 平面の交点を点 O とし，点 O に隣接する頂点をそれぞれ時計回りに点 A，点 B，点 C とする(図 2-(a))．また，

立方体型器具の座標系において，各平面番号を図 3のように定義する．図 3-(a)に表側平面の番号を示す．図 3-(b)に裏側平面の番号を示す．



(a) 表側平面の番号　　(b) 裏側平面の番号

図 3 立方体型器具の平面番号

3.2. 導出手法

チェッカーパターンの格子点における正確な 3 次元座標値を算出するために，立方体型器具のモデルとして立方体モデルを考える．この立方体モデルを観測点に対してフィッティングすることで立方体型器具の正確な位置合わせを行い，得られた立方体型器具の頂点座標を基準にして格子点の 3 次元座標値を算出する．

立方体モデルのフィッティングを用いたチェッカーパターンの格子点座標を算出する処理の流れを図 4に示す．以降，各ステップについて詳述する．

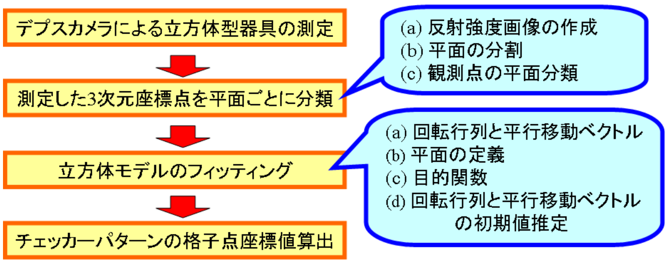


図 4 正確な格子点の 3 次元座標を算出する処理の流れ

3.2.1. 測定した 3 次元座標点の分類

立方体モデルのフィッティングでは，立方体型器具を測定した観測点のみを使用する．そこで，取得された観測点群から立方体型器具を測定した点のみを抽出し，さらに各平面ごとに分類する方法について順に説明する．

(a) 反射強度画像

デプスカメラは，物体表面の観測点における 3 次元座標値(x, y, z)とこの座標における反射強度値 $ref_{(u,v)}$を得ることができる．この 3 次元座標値と反射強度値は 1 対 1 に対応している．測定された反射強度値に対して式(1)により正規化することで，図 5に示すような各座標における反射強度を輝度値に変換して表現した画像(以下，反射強度画像)を作成する．これによりグレースケールで表現された大まかなテクスチャ情報を得ることができる．

$$ref'_{(u,v)} = \frac{\left(ref_{(u,v)} - ref_{\min}\right) \times 255}{\left(ref_{\max} - ref_{\min}\right)} \tag{1}$$

$ref'_{(u,v)}(0 \leqq ref'_{(u,v)} \leqq 255)$は反射強度画像の画素値である．$(u, v)$は反射強度画像の画像座標である．また，$ref_{max}$と ref_{min}は 1 回の測定で取得された全反射強度値の最大値と最小値をそれぞれ表している．

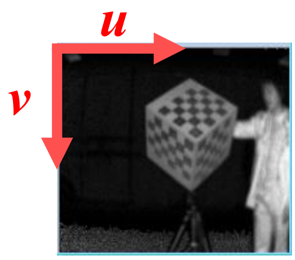
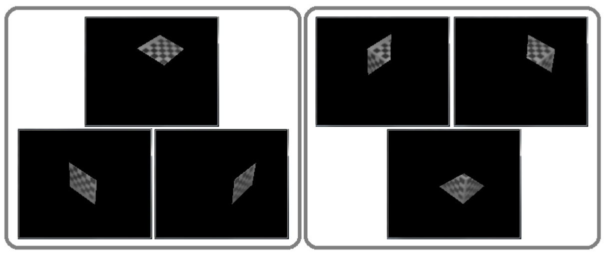


図 5 反射強度画像

(b) 平面の分割

反射強度画像を用いて立方体型器具の平面の分割を手動で行う．平面の分割では，表側平面 3 面と裏側平面 3 面の計 6 面を分割する．分割により各平面を測定した観測点の大まかな分類を行うことができる．分割した平面の例を図 6に示す．図 6-(a)は表側平面の分割例，図 6-(b)は裏側平面の分割例である．



(a) 表側平面の分割　　(b) 裏側平面の分割

図 6 手動による平面の分割

(c) 平面ごとの観測点分類

手動により分割した 6 平面は，表側平面の観測点と裏側平面の観測点の両方を含んでいる．そこで，デプス値と反射強度値を利用して各平面の観測点を分類する．反射強度画像から手動で分割した各平面領域に対して，表側平面を取り出すため，表側平面に相当する画素値の高い明るい画素を検出する．この処理は式(2)を共に満たす画素を検出することで実現する．同様に裏側平面を検出するため，裏側平面に相当する暗い画素を検出する．この処理は式(3)を共に満たす画素を検出することで実現する．実際に上記の処理で検出した平面の例を図 7に示す．図 7-(a)に表側平面の分類を，図 7-(b)に裏側平面の分類を示す．白い部分が分類された画素を示している．

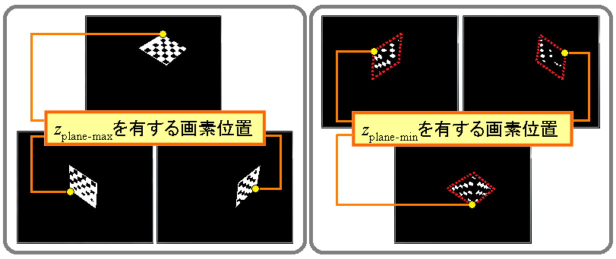
・表側平面の条件

$$\begin{cases} ref'_{(u,v)} \geq \dfrac{1}{k} ref'_{\max} + \left(1 - \dfrac{1}{k}\right) ref'_{\min} \quad (k = 5) \\ z_{(u,v)} < z_{plane-\max} \end{cases} \tag{2}$$

・裏側平面の条件

$$\begin{cases} ref'_{(u,v)} \leq \left(1 - \dfrac{1}{k}\right) ref'_{\max} + \dfrac{1}{k} ref'_{\min} \quad (k = 5) \\ z_{(u,v)} > z_{plane-\min} \end{cases} \tag{3}$$

式(2)と式(3)について，ref'_{max} と ref'_{min} は分割した平面領域中の最大画素値と最小画素値である．k は閾値パラメータであり経験的に求めた．$z_{(u,\ v)}$は反射強度画像の各画素に対応する 3 次元座標値(x, y, z)の z 値である．$z_{plane-max}$ と $z_{plane-min}$ は対象平面上の 3 次元座標点における z 値の最大値と最小値である．



(a) 表側平面の分類 (b) 裏側平面の分類

図 7 観測点群の各平面への分類結果

3.2.2. 立方体モデルのフィッティング問題

立方体モデルのフィッティングでは，立方体モデルを回転し平行移動させることで観測点群と立方体モデル間の距離が最小となるように計算する．回転行列 **R** と平行移動ベクトル **T** を定義し，立方体モデルをフィッティングする方法を説明する．

(a) 回転行列 R と平行移動ベクトル T

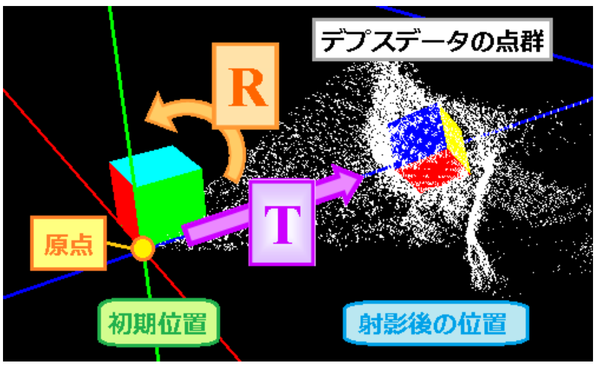


図 8 立方体モデルのフィッティング

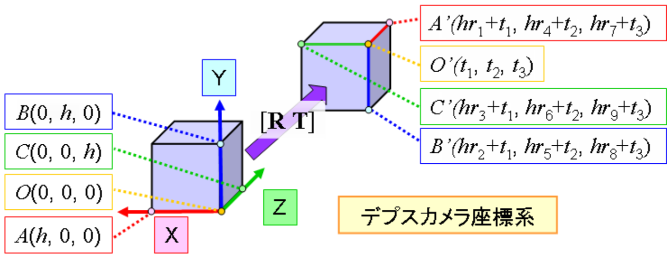
まず，立方体モデルをデプスカメラ座標系の原点に置く．この状態から立方体モデルに回転行列 **R** と平行移動ベクトル **T** を適用し座標変換することで，測定された立方体型器具の位置合わせを行う．この様子を図 8に示す．

回転行列 **R** と平行移動ベクトル **T** は式(4)で表される．さらに回転行列 **R** は式(5)で表されるように，x 軸回りの回転 θ_x を表す行列 $\mathbf{R}_x$ と y 軸回りの回転 θ_y を表す行列 $\mathbf{R}_y$, z 軸回りの回転 θ_z を表す行列 $\mathbf{R}_z$ から成り立つ．これにより，立方体モデルのフィッティングは，回転を表す 3 つの変数 θ_x, θ_y, θ_z と平行移動を表す 3 つの変数 t_1, t_2, t_3 の計 6 変数を最適化する問題となる．

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{gathered} \mathbf{R} = \mathbf{R}_z \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x \\ \mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & \sin\theta_x \\ 0 & -\sin\theta_x & \cos\theta_x \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & -\sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & \sin\theta_z & 0 \\ -\sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{gathered} \tag{5}$$

立方体モデルの 1 辺の長さを h とするとデプスカメラ座標系における初期位置での立方体モデルの点 O, 点 A, 点 B, 点 C は図 9-(a)となる．また，回転行列 **R** と平行移動ベクトル **T** を立方体モデルに適用した後の立方体モデルの各頂点を点 O', 点 A', 点 B', 点 C'とする．変換後の点 O', 点 A', 点 B', 点 C'は図 9-(b)となる．



(a) 初期位置 (b) 回転と平行移動後

図 9 立方体モデルの頂点座標

(b) 平面の定義

ベクトルを用いて平面の方程式を表現すると式(6)となる．**N** は平面の法線ベクトルである．**P** は平面上の任意の位置ベクトルである．$\mathbf{P}_0$ は平面上の特定の位置ベクトルである．

$$\mathbf{N} \cdot \left(\mathbf{P} - \mathbf{P}_0\right) = 0 \tag{6}$$

図 3で定義した平面 1 から平面 6 について式(6)を用いて平面の方程式を表現する場合，デプスカメラ座標系における変換後の点 O', 点 A', 点 B', 点 C'を用いると，各平面の法線ベクトル **N** と平面上の特定の点 $\mathbf{P}_0$ ベクトルの

組は表 1として表すことができる．

表 1 法線ベクトル **N** と平面上の特定の位置ベクトル $\mathbf{P}_0$

平面番号	法線ベクトル **N**	位置ベクトル $\mathbf{P}_0$
平面 1	$\mathbf{N}_1=\mathbf{A}'-\mathbf{O}'$	$\mathbf{O}'$
平面 2	$\mathbf{N}_2=\mathbf{B}'-\mathbf{O}'$	$\mathbf{O}'$
平面 3	$\mathbf{N}_3=\mathbf{C}'-\mathbf{O}'$	$\mathbf{O}'$
平面 4	$\mathbf{N}_4=\mathbf{N}_1=\mathbf{A}'-\mathbf{O}'$	$\mathbf{A}'$
平面 5	$\mathbf{N}_5=\mathbf{N}_2=\mathbf{B}'-\mathbf{O}'$	$\mathbf{B}'$
平面 6	$\mathbf{N}_6=\mathbf{N}_3=\mathbf{C}'-\mathbf{O}'$	$\mathbf{C}'$

(c) 目的関数

$$\min\left(\sum_{m=1}^{6}\left(\breve{E}_m\right)\right) \quad (m:\text{平面番号}) \tag{7}$$

立方体モデルフィッティングの目的関数は式(7)となる．式(7)は全 6 平面の各平面と観測点群との距離平均の総和を最小にするものである．この目的関数を満たすように立方体モデルのフィッティングを行うことで取得した観測点群に対して最適な立方体型器具の位置合わせを行う．

$$\breve{E}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} l_i \quad (n:\text{観測点の個数}) \tag{8}$$

平面と観測点群との距離平均は式(8)である．式(8)は各観測点と平面との距離 l_i の総和を平面の観測点数で割ったものである．n は平面の観測点の個数を表している．

3 次元座標点 D_i (x_i, y_i, z_i)と平面との距離 l_i は式(9)で求められる．この模式図を図 10に示す．i は観測点の変数である．

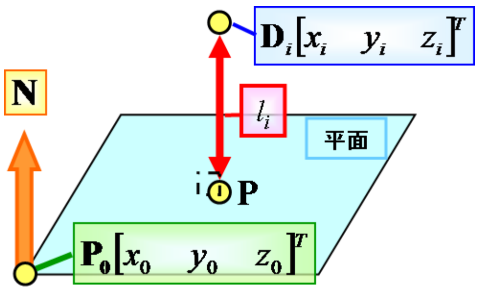


図 10 平面と 3 次元座標点との関係

$$l_i=\left\|\mathbf{P}-\mathbf{D}_i\right\|=\frac{\left|\mathbf{N}\cdot\left(\mathbf{D}_i-\mathbf{P}_0\right)\right|}{\left\|\mathbf{N}\right\|} \tag{9}$$

式(9)と図 10において，$\mathbf{D}_i[x_i\ y_i\ z_i]^{\mathrm{T}}$ はデプスカメラで観測された 3 次元の位置ベクトルである．$[\ ]^{\mathrm{T}}$ は転置行列を表す．**P** は観測点 D_i から平面に下ろした垂線と平面との交点の位置ベクトルである．l_i は観測点 D_i と点 P との距離である．**N** は平面の法線ベクトルである．$\mathbf{P}_0$ は平面上の任意の位置ベクトルである．

(d) 初期値推定

立方体モデルのフィッティングは，回転を表す 3 つの変数 θ_x, θ_y, θ_z と平行移動を表す 3 つの変数 t_1, t_2, t_3 の計 6 変数を最適化する問題である．最適化は最急降下法により行う．しかし，立方体モデルのフィッティングでは局所解が存在するため，初期値の設定が大変重要になる．

回転を表す 3 つの変数 θ_x, θ_y, θ_z の初期値は，式(5)の関係より回転行列 **R** の初期値から求められる．したがって，回転行列 **R** の初期値を求めればよい．回転行列 **R** の初期値はチェッカーパターンを描いた 3 平面を表す平面の方程式より求めることができる．

平面 1 を例に説明する．平面 1 の法線ベクトルは表 1 より $\mathbf{N}_1$ となる．この法線ベクトルを用いて式(6)より平面の方程式を表すことができる．

また，幾何学的に平面の方程式を表現すると式(10)となる．a, b, c は係数であり，x, y, z は平面の 3 次元座標値 (x, y, z)の各座標値である．

$$ax+by+cz=1 \tag{10}$$

ある平面として分類された観測点の個数を n とすると，その平面に属する観測点の点群 **D** の座標値を{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), é , (x_n, y_n, z_n)}として表すことができる．点群 **D** の座標値に対して，式(11)に示す擬似逆行列を用いて平面の方程式を算出する．観測点の点群 **D** を式(10)に代入すると式(12)が得られる．

$$\mathbf{D}^{+}=\left(\mathbf{D}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}\right)^{-1}\mathbf{D}^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ & \vdots & \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\mathbf{Ds}=\mathbf{I}$$

$$\mathbf{s}=\mathbf{D}^{+}\mathbf{I}$$

式(12)の左辺第一行列を **D**，第二ベクトルを **s**，右辺をベクトル **I** として表現し，擬似逆行列を用いて **s** について解くことで平面の方程式の係数を求められる．

分類した平面 1 の観測点を用いて式(12)より平面の方程式が求められ，式(10)を用いて幾何学的に平面の方程式を表すことができる．

両式は共に平面 1 を表しているので各方程式から単位法線ベクトルをそれぞれ求めると式(13)となる．同様の操作を平面 2 と平面 3 に対して行うことで回転行列 **R** の初期値は式(14)となる．

$$\mathbf{R}_1=\begin{bmatrix} r_1 \\ r_4 \\ r_7 \end{bmatrix}=\frac{1}{\sqrt{a_1^2+b_1^2+c_1^2}}\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 & \mathbf{R}_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_m = \frac{1}{\sqrt{a_m^2 + b_m^2 + c_m^2}} \begin{bmatrix} a_m \\ b_m \\ c_m \end{bmatrix} \qquad (14)$$

平行移動ベクトル $\mathbf{T}$ の初期値は，図 11より表側の 3 平面の交点と等しくなる．式(12)より表側の 3 平面の方程式を算出する．3 平面の交点は式(15)を用いることで求めることができる．この交点は立方体型器具の頂点である．

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (15)$$

$$\mathbf{Sd} = \mathbf{I}$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{I}$$

式(15)の左辺第一行列を $\mathbf{S}$，3 平面の交点を表す第二ベクトルを $\mathbf{d}$，右辺をベクトル $\mathbf{I}$ で表現すると，3 平面の交点は, 逆行列を用いて $\mathbf{d}$ について解くことで求められる.

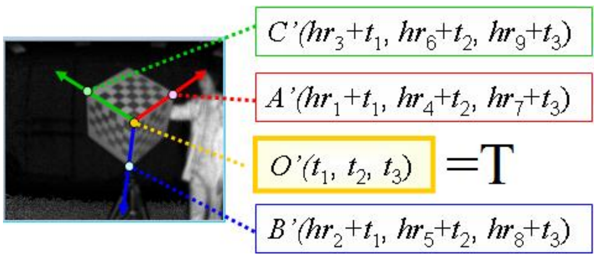


図 11 平行移動ベクトル $\mathbf{T}$ と頂点座標

3.2.3. チェッカーパターンの格子点座標算出

3.2.2 項より目的関数を最小とする最適な回転行列 $\mathbf{R}$ と平行移動ベクトル $\mathbf{T}$ が求められる．これにより観測点群に対して最も確からしい立方体型器具の位置合わせを行うことができる．したがって，立方体型器具における頂点の 3 次元座標値を得ることができる．

作成した立方体型器具の各辺の長さと，頂点から各格子点までの距離は既知である．そのため，格子点の 3 次元座標は頂点間のベクトル表現として式(16)で表すことができる．式(16)を用いて全格子点の 3 次元座標値を計算する．これを表側の 3 平面全てに対して行う．

$$\mathbf{G}_j = \begin{bmatrix} x_j & y_j & z_j \end{bmatrix}^T = p\mathbf{A} + q\mathbf{B} \qquad (16)$$

$\mathbf{G}_j$ は格子点の 3 次元座標値である. j は格子点の数である．p と q は係数であり $\mathbf{A}$ と $\mathbf{B}$ は 3 次元の辺ベクトルをそれぞれ表している．格子点の 3 次元座標値計算の様子を図 12に示す.

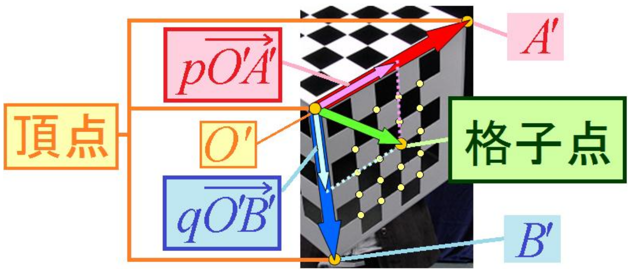


図 12 格子点の計算

4. 実験と考察

4.1. 実験環境

本実験では，デプスカメラとして Mesa Image 社製の Swiss Ranger SR4000 を，カラーカメラとして CASIO 社製の EX-F1 を使用した．Swiss Ranger の解像度は 176 × 144 画素であり，画角は 43.6°× 34.6°である．EX-F1 の解像度は 2048 × 1536 画素に設定した．また，3.1 節で説明したようなキャリブレーション用器具として 1 辺 40cm の立方体型器具を作成した．チェッカーパターンの格子点の総数は 60(=20×3)個である．

撮影実験では，デプスカメラとカラーカメラの設置位置を固定とし実験中は移動させないものとした．撮影物体である立方体型器具を 2.0m から 4.0m と 1.0m 毎に移動させ撮影をした．各距離において立方体型器具を 5 箇所の異なった位置に配置して撮影をした．各位置で 1 枚のカラー画像撮影と 5 回分のデプスデータ取得を行い，全部で 15 枚(=3 距離×5 箇所)のカラー画像撮影と 75 回分(=3 距離×5 箇所×5 回分)のデプスデータ取得をした．図 13に撮影環境を示す．図 14にカメラからの距離 3.0m における 5 箇所分のカラーカメラ画像を示す.

撮影したカラーカメラ画像に対して，Harris のオペレータにより各画像について 60 個の格子点を検出した[6]. この処理を撮影したカラーカメラ画像全てに行い，全部で 900(=60×15)個の 2 次元座標値を得た.

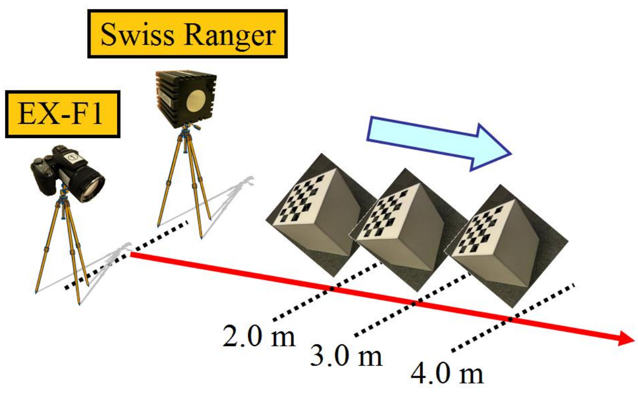


図 13 撮影環境

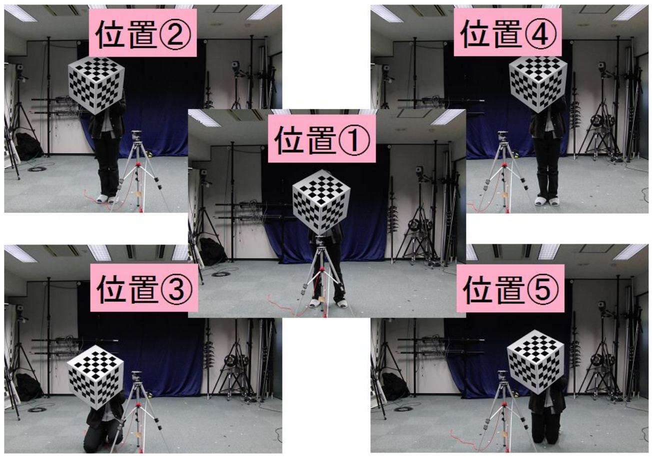


図 14 距離 3.0m における 5 箇所分のカラーカメラ画像

4.2. 格子点の **3** 次元座標値の算出

提案手法の有効性を示すために，チェッカーパターンの格子点における 3 次元座標値を手動により選択する場合と提案手法により算出する場合のそれぞれに対して外部パラメータ算出を行い，比較実験を行なった．

立方体型器具は全部で 60 個の格子点を有している．そのため各撮影位置で 60 個の格子点における 3 次元座標値を得ることができる．全 15 箇所の撮影では，格子点 900(=60×15)個分の 3 次元座標値を取得でき，これら 900 個の 3 次元座標値を用いて外部パラメータを算出した．

4.2.1. 立方体モデルフィッティングによる格子点算出

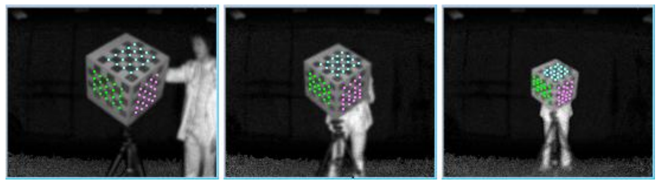
撮影においてデプスカメラでは各位置で 5 回分のデプスデータを取得した．提案手法では，全 5 回分の観測点を使用して立方体モデルのフィッティングを行なった．これにより各位置で格子点 60 個分の 3 次元座標値を取得した．この操作を全 15 箇所に対して行なった．

4.2.2. 格子点の手動選択による格子点の算出

比較対象である手動による格子点の選択では，反射強度画像を使用した．3.2.1 項より反射強度画像の各画素値は正規化された反射強度値である．また，反射強度値と 3 次元座標値は 1 対 1 に対応している．そのため，反射強度画像より手動で画素を選択することで直接的に 3 次元座標値を求めることができる．しかし，立方体型器具は裏側平面のデプスデータを得るために穴を開けてあるため，選択した画素に対応する 3 次元座標値をそのまま使用することはできない．

そこで，選択した画素を中心とする近傍 9 画素の観測点に着目する．撮影において各位置で 5 回分のデプスデータを取得しているため全部で 45(= 9 画素×5 枚)画素を対象とする．各画素に対応する 3 次元座標値の中で表側平面の 3 次元座標値のみを使用して平均値を求め，選択した格子点の 3 次元座標値とした．

この操作を各撮影位置で行い 60 個の格子点を選択した．図 15に各距離で取得したデプスデータに対して反射強度画像から手動で格子点の選択を行なった例を示す．選択した点を色を変えて表現する．図 15-(a)は 2.0m の距離である．図 15-(b)は 3.0m の距離である．図 15-(c)は 4.0m の距離である．



(a) 2.0 m (b) 3.0 m (c) 4.0 m

図 15 手動による格子点選択

4.3. 投影誤差

提案手法より求めた格子点の 3 次元座標値と手動選択による格子点の 3 次元座標値についてそれぞれ外部パラメータを算出した．1 格子点当たりの投影誤差平均を外部パラメータの評価尺度として用いた．投影誤差とは，カラー画像座標系での格子点の 2 次元位置とデプスカメラ座標系からカラー画像座標系に投影した格子点の 2 次元位置との誤差である．1 格子点当たりの投影誤差平均は式(17)を用いて計算される．

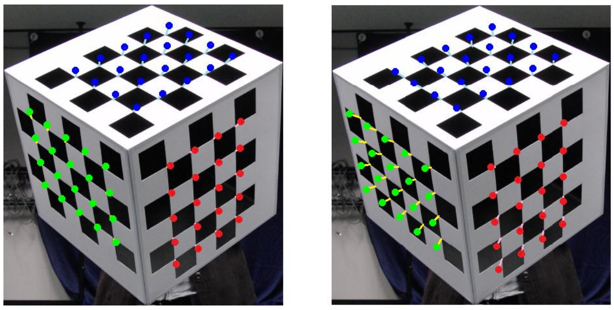
$$\frac{1}{60}\sum_{j=1}^{60}\sqrt{\left(\alpha_u^j-\beta_u^j\right)^2+\left(\alpha_v^j-\beta_v^j\right)^2} \qquad (17)$$

j は格子点の数である．(α^j_u, α^j_v)は j 番目のカラーカメラ画像に投影した格子点の位置を，(β^j_u, β^j_v)は j 番目の実際に撮影されたカラーカメラ画像上での格子点の位置を表している．

4.4. 実験結果と考察

投影誤差を計算するにあたり，カメラからの距離が 1.5m の位置に立方体型器具を置いて撮影したカラーカメラ画像とデプスデータより算出した格子点の 3 次元座標値を使用した．

提案手法による立方体モデルのフィッティングを用いた場合と手動による格子点選択を行なった場合のそれぞれについて，格子点の各 3 次元座標値をカラーカメラ画像に投影した結果を図 16に示す．図 16-(a)が提案した立方体モデルのフィッティングによる投影誤差の結果である．図 16-(b)が手動による格子点選択を用いた場合の投影誤差の結果である．図 16では，投影点を点で表現し，投影誤差を投影点とカラーカメラ画像の格子点間を直線で結ぶことで直線の長さとして表現している．図 16-(b)の手動による格子点選択に比べ図 16-(a)の提案手法の方が，左側の面の投影誤差が少ないことが分かる．



(a) 提案手法　　(b) 手動による格子点選択

図 16 カメラからの距離が 1.5m の場合の投影誤差

表 2は，1 格子点当たりの投影誤差平均を示している．提案手法による 6 面全てを使用した場合の立方体モデルフィッティングとチェッカーパターンを形成した 3 面のみを使用した場合の立方体モデルフィッティング，手動による格子点選択の場合の 3 つの投影誤差平均の結果である．

表 2 格子点 1 点当たりの投影誤差平均

	投影誤差
立方体フィッティング（6 平面）	16.0 (画素/点)
立方体フィッティング（3 平面）	19.8 (画素/点)
手動による選択	21.6 (画素/点)

表 2より提案手法である 6 面全てを使用した立方体モデルのフィッティングによる格子点算出は，手動による格子点の選択と比べて精度が高いことが分かる．6 面全てを使用した場合は，手動による格子点選択の場合に比べて, 1 格子点当たり平均 5.6 画素小さいという結果となった．これは約 26%の精度向上である．

さらに，本研究では立方体型器具に穴を開けることで裏側平面のデプスデータ取得を行っている．この穴を開ける処理の有効性を示すために，立方体モデルのフィッティングにおいて 6 面全てを使用した場合とチェッカーパターンを形成した 3 面のみを使用した場合とでの比較も行った．6 面全てを使用した場合の方が 3 面のみ使用した場合に比べ平均 3.8 画素小さいという結果となった．これは，約 19%の精度向上である．この結果より立方体型器具に穴を開けることで裏平面のデプスデータを取得し使用することは有効であると分かる．

本論文では，投影誤差を求める際にカメラからの距離が 1.5m で撮影した立方体型器具の観測点に対し, 提案手法を用いることで格子点座標を算出して使用している．今後は立方体型器具ではなくデプスカメラにより測定した一般物体のデプスデータを使用して評価を行う．デプスカメラの低解像度を考慮して，評価物体として複数平面からなる物体を使用する．この評価物体をデプスカメラで撮影し，複数の観測点から評価物体の平面をそれぞれ算出する．求めた平面に対してさらに各平面の交線や交点を求めカラーカメラ画像に投影することで投影誤差を求める．

5. おわりに

本研究では，新しいカラーカメラとデプスカメラ間のキャリブレーション用器具としてチェッカーパターンを利用した立方体型器具を作成し，この器具を用いたキャリブレーション手法を提案した．提案手法は，低解像度のデプスデータに対して，立方体モデルのフィッティングを行ない最適な位置合わせをすることで，高精度なチェッカーパターンの格子点における 3 次元座標値を求めるというものである. 本手法の有効性を確かめるために, 投影誤差を評価基準として用い，提案手法により格子点の算出をした場合と手動選択により格子点の算出をした場合とでそれぞれ外部パラメータを算出して比較実験を行なった．その結果 1 格子点当たりの投影誤差平均は, 立方体フィッティングによる提案手法では平均 16.0 画素であったのに対し，手動による格子点選択では平均 21.6 画素という結果が得られた．これより提案手法が手動による手法に対して約 26%精度が向上したことが分かる．

今後の課題として，キャリブレーション精度の評価をデプスカメラにより測定した一般物体のデプスデータを用いて行う．

謝辞

本研究の一部は独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究「三次元映像通信・放送のための中核的要素技術」による．

文　献

[1] 佐藤新，篠田浩一，古井貞熙，“ToF カメラによる 3D 手話認識，” 第 13 回 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2010 論文集，vol. IS3-44，pp. 1861-1868，2008 年

[2] Y. Takaya, F. de Sorbier, Y. Uematu and H. Saito, ñInteractive 3D Contents Generation for Auto-stereoscopic Display based on Depth Camera,ò Proc. International Conference on 3D Systems and Applications, no. 2-7, pp. 154-157, Tokyo, Japan, May 2010.

[3] 椛島祐樹，原健二，倉爪亮，岩下友美，諸岡健一，内田誠一，長谷川勉，“逆投影と幾何拘束を用いた 2D/3D 位置合わせ，” 電子情報通信学会論文誌．D，情報・システム，vol. J91-D, no. 5, pp. 1380-1392, 2008

[4] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration, ” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, Nov. 2000.

[5] Z. Zhang, ñCamera Calibration With One-Dimensional Objects,ò IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 26, no. 7, pp. 892-899, July 2004.

[6] C. Harris, M.Stephens, “A Combined Corner and Edge Detector, ” Proc. the 4th Alvey Vision Conference, pp. 147-151, 1988.