

3次元位置取得のための3D校正板による デプスカメラキャリブレーション手法

合原 航輝^{†1,a)} 酒井 道¹ 宮城 茂幸¹

概要: Kinect 等のデプスカメラでは、カメラから測定対象までの深度のみが測定可能であって、カメラ座標系における位置 (X, Y) は深度およびカメラパラメータから推定される。カメラパラメータにはカメラによる個体差があるため、正確な位置推定のためにはキャリブレーションが必要である。そこで本論文では立体的な突起物を並べた 3D 校正板を用いたデプスカメラの校正方法を提案する。従来のカメラモデルと深度モデルを組み合わせ、3D 校正板上の突起位置が正確に測定できるよう内部パラメータおよび外部パラメータの調整を行う。この際必要となる初期値を求める詳細な手順についても述べる。

1. 研究背景

2010 年に Microsoft 社がコンシューマ向けデプスカメラを含むセンサデバイス (Kinect) を発売して以来、Kinect は本来のゲームコントローラとしてだけではなく、物体の 3D 復元 [1], [2], シーン解析 [3], 物体検出 [4], あるいは動作解析 [5] といった様々な分野で応用されている。フレームレート 30fps で深度画像を取得できるため、物体やシーン 3 次元的な形状を高速に把握できるということと、開発用のツールキットを用いると深度だけでなく 3 次元的な位置も同時に推定できることから応用領域が広がっていると考えられる。

一方で Kinect に搭載されているデプスカメラはコンシューマ向けであることから、取得された深度画像にはノイズが多くまた推定された 3 次元位置の正確さも不十分である。したがって応用に際し、カメラキャリブレーションが必要である。初期には Zhang と Zhang により Kinect に搭載されている RGB およびデプスカメラの内部パラメータ推定が行われている [6]。その後、例えば、Khoshelham と Elberink はより詳細なデプスカメラの内部パラメータ推定を行っている [7]。また Smisek ら [8] や Herrera C. ら [9] は RGB カメラとデプスカメラを合わせてキャリブレーションを行う手法を提案している。

Karan により指摘されているように [10], 上述のこれま

でのキャリブレーション手法では、深度を補正するためにデプスカメラから取得される視差データを用いている。しかし最近の Microsoft Kinect for Windows SDK (以下では SDK と省略する) では視差データは得られず、深度に変換した結果のみ得られる。したがって上述のキャリブレーション手法を直接適用することができない。そこで文献 [10] では視差を含まない形の深度モデルを用いてキャリブレーションを行っている。ただし、文献 [10] ではデプスカメラの内部パラメータ推定のために、Kinect に搭載されている深度測定用のパターンを投影するプロジェクタの動作を止め、Kinect に搭載されている赤外線カメラの画像を利用している。このような方法も現行の Microsoft Kinect for Windows SDK では利用できない。

そこで、本論文では 3 次元的な校正板を用い、Microsoft Kinect for Windows SDK から出力される 3 次元位置を直接補正することのできる、デプスカメラのキャリブレーション手法を提案する。

2. 深度計測の原理

本研究では、Microsoft 社の Kinect for Windows を使用する。Kinect の外観を図 1 に示す。Kinect はカラー画像の取得できる RGB カメラと、深度画像を取得できる近赤外線カメラ、およびプロジェクタで構成されている。

ここでは Kinect で用いられているパターン投影方式における深度計測の原理を簡単にまとめる。図 2 に示す通り、赤外線カメラの中心 O と赤外線プロジェクタが離れた位置にあるとする。Kinect から既知の距離 Z_0 離れた参照面に既知のパターンを投影すると、参照面上の点 Q で反射して、投影面上の点 y に投影される。次に Kinect から

¹ 滋賀県立大学
The University of Shiga Prefecture

^{†1} 現在、滋賀県立大学院
Presently with Graduate school of The University of Shiga Prefecture

^{a)} oo23kgouhara@ec.usp.ac.jp



図 1 Kinect for Windows の外観

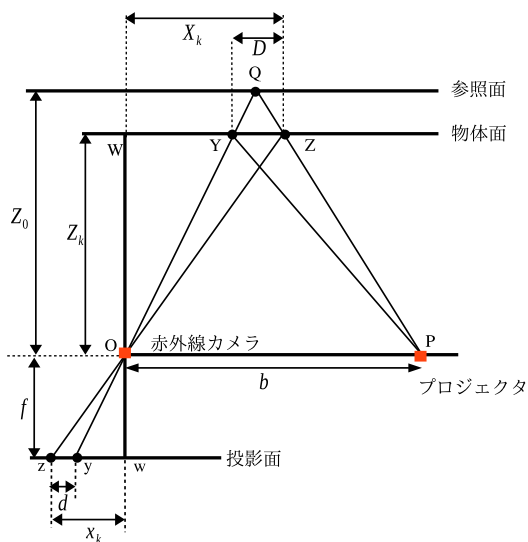


図 2 パターン投影方式における深度計測の原理

距離 Z_k 離れた物体面上に同様に既知のパターンを投影し、その物体面で反射したパターンは、投影面上で点 z に投影される。投影面上において、点 y, z 間の距離を d とする。点 y への投影結果は、参照面上の点 Y からの反射とみなせるので、点 Y, Z 間の距離を D とすると、三角形 QOP と QYZ の相似より、

$$\frac{D}{b} = \frac{Z_0 - Z_k}{Z_0} \quad (1)$$

となる. また三角形 OYZ と O_{yz} の相似より,

$$\frac{d}{f} = \frac{D}{Z_k} \quad (2)$$

である。式 (1) と (2) より，赤外線カメラから物体面までの深度 Z_k は

$$Z_k = \frac{Z_0}{1 + \frac{Z_0}{fb}d} \quad (3)$$

で表される.

さらに，図 2 において，三角形 OWZ と O_wz の相似より，

$$\frac{X_k}{Z_k} = \frac{x_k}{f} \quad (4)$$

なので，焦点距離 f が既知であれば得られた深度 Z_k と投影面上の位置 x_k から物体面上での位置 X_k を推定することができる。

3. デプスカメラモデルおよびそのパラメータ推定

ここではデプスカメラモデルおよびキャリブレーション

手順を説明する.

3.1 座標系の定義

以下で使用する座標系を図 3 に示す．ワールド座標系における位置を $\mathbf{M} = [X \ Y \ Z]^T$ でカメラ座標系における位置を $\mathbf{M}' = [X' \ Y' \ Z']^T$ で表す．カメラ中心から焦点距離 f 離れた画像面の左上角を画像座標の原点とし，画像座標上での位置は (u, v) で表す．また画像座標 (u, v) に付随する深度値を w で表す．

3.2 デプスカメラモデル

従来のカメラモデル [11] およびデプスモデル [7] を組み合わせる以下のデプスカメラモデルを考える.

$$u = f \frac{X'}{Z'} + u_0 - \delta_u(X', Y', Z') \quad (5)$$

$$v = f \frac{Y'}{Z'} + v_0 - \delta_v(X', Y', Z') \quad (6)$$

$$w = Z' + \delta Z(u, v) + Z_0 \quad (7)$$

ここで, (u_0, v_0) は画像座標の原点の画像中心からのずれを, $\delta_u(X', Y', Z')$, $\delta_v(X', Y', Z')$ はカメラ座標の原点からの半径に依存して発生するひずみをそれぞれ表す. 観測される深度 w は画像中心より離れるにしたがって実際の深度からずれるので, このずれの大きさを $\delta Z(u, v)$ で表す. また, w の全体的なオフセット値として Z_0 を追加する.

カメラ座標系 M' とワールド座標系 M との関係は $M' = RM + t$ と書ける. ここで R は回転行列であり, 各 X, Y, Z 軸周りの回転角を $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ とすると,

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

である. また, t は並進ベクトル $[t_x \ t_y \ t_z]^T$ である.

キャリブレーションでは、ワールド座標における既知の点を複数与え、その時デプスカメラで観測される (u_k, v_k, w_k) とモデル式 (5), (6), (7) から求められる $\hat{u}_k, \hat{v}_k, \hat{w}_k$ との誤差

$$e = \sum_{k=1}^n (|u_k - \hat{u}_k|^2 + |v_k - \hat{v}_k|^2 + |w_k - \hat{w}_k|^2) \quad (8)$$

が最小になるように，パラメータ f , u_0 , v_0 , δ_u , δ_v , δZ , Z_0 , θ_x , θ_y , θ_z , t を定める．式 (8) を最小化するために

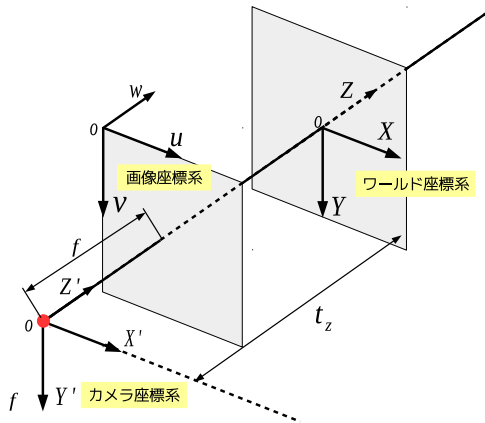


図 3 各座標系の定義

非線形最適化法を適用するが、その際最適解に近い初期値が必要である。また同時に変化させるパラメータ数が多い。そこで、 δZ はモデル式 (5), (6) から独立していると仮定し、あらかじめ平行平板を用いて δZ を推定し、3次元 (3D) 較正板を使用して (8) を最小化する際は、 δZ を固定した。

以下では δZ を推定する方法と、 δZ が既知の際、それ以外のパラメータの初期値を求める方法を順次説明する。

3.3 パラメータ δZ の推定

δZ を推定するために、既知の位置にデプスカメラに対し平板を平行に設置する。このときカメラと平板とが完全に平行にならない可能性があるため、まず設置時に発生する θ_x, θ_y を除去する必要がある。平行平板に対する深度画像を取得した例を図 4(a) に示す。その画像中心において水平に切断した断面図を図 4(b) に示す。深度 w が全体として右上がりに傾いていることがわかる。この断面は $u-w$ 座標上での観測であるが、カメラ座標 $X'-Z'$ がワールド座標 $X-Z$ に対し θ_y 回転している影響が現れていると考え、 $u-w$ 座標上で傾きを推定すれば θ_y の推定となり得る。また同様に画像中心の垂直方向に対して考えれば θ_x の推定となり得る。 θ_z については、デプスカメラを設置する際、水平器を用い床に対して平行になるように設置しているので 0 とし、傾きの補正を行わない。実際に、図 4(a) の中心より左側の領域と右側の領域のデータを用い傾きから θ_y を、図 4(a) の中心より上側の領域と下側の領域のデータを用い傾きから θ_x を推定した後、深度画像を $-\theta_y$ 回転および $-\theta_x$ 回転した結果を図 4(c), (d) に示す。図 4(c) より、 w が全体的に水平になっていることがわかる、次に図 4(d) を詳細に見てみよう。平行平板を測定しているので本来図 4(d) の w は一定になるはずであるが、深度画像の中心部では w は小さく、画像周辺に離れるほど w は大きくなる。そこで深度画像の中心部における

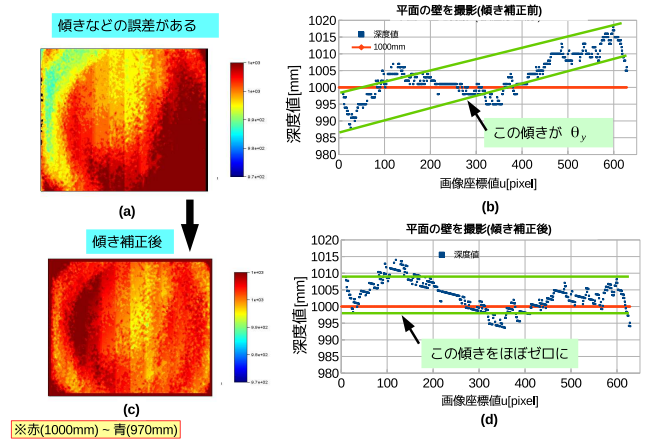


図 4 平行平板を撮影した時の深度画像。(a):平行平板を撮影した時の深度画像の原画像をカラーマップで表示。(b):(a)の画像中央の水平方向の断面図。(c):回転 θ_x, θ_y を補正した後の深度画像をカラーマップで表示。(d):(c)の画像中央の水平方向の断面図。

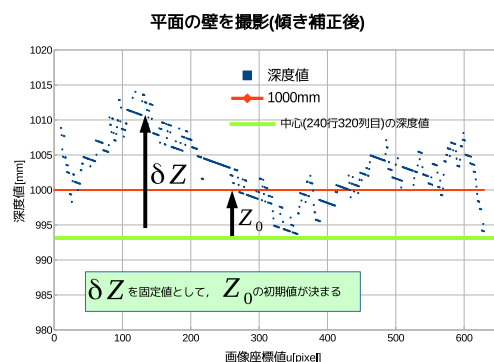


図 5 図 4 の (d) の拡大図

w の最小値と既知の深度 Z_{known} の差を Z_0 の推定とすれば、 $\delta Z = (w - Z_0) - Z_{\text{known}}$ と推定できる。この推定値を各 (u, v) についてあらかじめすべて求めておく。図 5 のグラフは図 4 の (d) の拡大図である。画像中心の深度値を基準値として、各画素についての深度値の基準値に対する誤差を、ひずみによる影響として δZ とし、これを固定値として、後の計算に使用する。

3.4 3D 較正板の性質

ワールド座標系での位置を正確に与えるために次のような 3D 較正板が与えられるとして、以下のキャリブレーション手法を考えることにする。

平板上に等間隔の格子を用意し、その格子点上に、同一形状かつその大きさが既知の突起を設置する。ただしすべての格子点上に突起を置かず、平板上の中心付近および上下左右の一部には平板表面を残しておく。

3.5 各パラメータの初期値推定法

以下では 3D 較正板を用いてキャリブレーションを行う際に用いる各パラメータの初期値の推定方法を述べる。

デプスカメラを設置する際、水平器を用い床に対して平行になるように設置しているので θ_z の初期値は $\check{\theta}_z = 0$ とする。3.3 で説明した方法により、3D 較正板の平板表面を利用し、あらかじめ θ_x, θ_y を推定しその初期値を $\check{\theta}_x, \check{\theta}_y$ とおくと回転行列の初期値 $\check{\mathbf{R}}$ が求められる。また、較正板の中心とデプスカメラの中心がほぼ一致するように、既知の位置 t_z に設置するので並進ベクトルの初期値は $\check{\mathbf{t}} = [0 \ 0 \ t_z]^T$ とする。パラメータ u_0, v_0 については画像の中心座標を初期値 $\check{u}_0, \check{v}_0$ とする。

さて、以下で述べる手順を実行する前に、較正板全体を撮影し画像座標上での測定値 $[u \ v \ w]^T$ から、上述の $\check{\mathbf{R}}$ を用い、あらかじめ $[u' \ v' \ w']^T = \check{\mathbf{R}}^{-1}[u \ v \ w]^T$ を求めておく。較正板中心付近の平板領域の観測値 w' とすでに 3.3 において推定した δZ との差分より、 Z_0 の初期値 $\check{Z}_0$ が推定できる。

焦点距離 f

深度画像の中心付近は、半径方向のひずみが少ないと考えられる。そこで中心付近の突起を利用し既知の 2 点 $(X_a, Y_a, Z_a), (X_b, Y_b, Z_b)$ を指定し、あらかじめ求めておいた $[u' \ v' \ w']^T$ から対応する点 $(u'_a, v'_a, w'_a), (u'_b, v'_b, w'_b)$ を取り出し、(5), (6) を用いると近似的に

$$u'_a - u'_b = f \frac{X'_a - X'_b}{Z'_a} \quad (9)$$

$$v'_a - v'_b = f \frac{Y'_a - Y'_b}{Z'_a} \quad (10)$$

が得られる。初期値 $\check{\mathbf{R}}$ および $\check{\mathbf{t}}$ を用いると既知の 2 点 $(X_a, Y_a, Z_a), (X_b, Y_b, Z_b)$ のカメラ座標系における点 $(X'_a, Y'_a, Z'_a), (X'_b, Y'_b, Z'_b)$ が計算できる。ここで、 $[u' \ v' \ w']^T = \check{\mathbf{R}}^{-1}[u \ v \ w]^T$ と補正した観測値を使用していることから $X'_a - X'_b, Y'_a - Y'_b$ は $X_a - X_b, Y_a - Y_b$ と同じであり、また、突起の形状が同一であることから $Z_a = Z_b$ であることを考慮すると $Z'_a = Z'_b$ である。また、 Z'_a は突起の形状と t_z より決定できる。複数個の 2 点間距離を与えることにより、 f に関する方程式 (9), (10) を最小二乗法で解くことにより焦点距離の初期値 $\check{f}$ が求められる。

半径方向の歪み係数

半径方向の歪みを表現するモデルは

$$\delta_u = uk_1 r^2 \quad (11)$$

$$\delta_v = vk_1 r^2 \quad (12)$$

$$r^2 = \left(\frac{X'}{Z'}\right)^2 + \left(\frac{Y'}{Z'}\right)^2$$

と表すことができる [12]。本来ひずみに関する項は複数あるが、今回の実験においては k_1 の一項までとした。前項

同様、既知の 2 点 $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$ を指定し、それらに対応する $(u'_1, v'_1, w'_1), (u'_2, v'_2, w'_2)$ を取り出す。これらの値を (5), (6) に用いると、

$$u'_2 - u'_1 = f \frac{X'_2 - X'_1}{Z'_2} + (u'_2 r_2^2 - u'_1 r_1^2) k_1 \quad (13)$$

$$v'_2 - v'_1 = f \frac{Y'_2 - Y'_1}{Z'_2} + (v'_2 r_2^2 - v'_1 r_1^2) k_1 \quad (14)$$

である。ただし、 $Z'_1 \simeq Z'_2$ を利用した。初期値 $\check{\mathbf{R}}$ および $\check{\mathbf{t}}$ を用いると既知の 2 点 $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$ のカメラ座標系における点 $(X'_1, Y'_1, Z'_1), (X'_2, Y'_2, Z'_2)$ が計算できる。これらと $\check{f}$ を用い、最小二乗を式 (13), (14) に適用すると、 k_1 の初期値 $\check{k}_1$ が推定できる。また複数の 2 点ペアを与えた場合も、最小二乗法により $\check{k}_1$ が推定できる。

3.6 非線形最適化法によるキャリブレーション

3.2 で述べた通り、較正板上の既知の点に対応する観測値 (u_k, v_k, w_k) とモデル式から求められる $(\hat{u}_k, \hat{v}_k, \hat{w}_k)$ との平均二乗誤差が最小になるようにパラメータを推定する。このとき、平行平板を用いて推定した δZ については固定し、パラメータ $f, u_0, v_0, k_1, Z_0, \theta_x, \theta_y, \theta_z, \mathbf{t}$ について、非線形の最適化法を (8) に適用する。後述の実験では最適化法として準ニュートン法を用いた。

3.7 ワールド座標系上の位置推定方法

画像座標上での位置 (u, v, w) が与えられた時、モデル式から逆にワールド座標上での位置 $\mathbf{M} = [X \ Y \ Z]^T$ を推定する方法を述べる。

観測された深度 w から δZ および Z_0 の影響を除去すると Z' が求まる。(5), (6), (11), (12) より、 $p = X'/Z', q = Y'/Z'$ とおくと (5), (6) は p, q に関する 2 次の方程式とみなせる。これを数値的に解き、 Z' をかけると X', Y' が推定でき、 $\mathbf{M}'$ が得られる。キャリブレーションで得られた回転および並進に関する外部パラメータを用いると、 $\mathbf{M} = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{M}' - \mathbf{t})$ となりワールド座標系上での位置が推定できる。

4. Kinect のキャリブレーション結果

ここでは、3 で述べたキャリブレーション手法を用いデプスカメラモデルのパラメータ推定を行った結果を示す。

4.1 キャリブレーションに用いる 3D 較正板

深度画像を補正するための平行平板としては、実際は壁面を用いた。また、実際に設計した 3D 較正板を図 6 に示す。後述の実験において、各格子点を区別するために便宜上番号を付与した。その番号を図 7 に示す。

較正板の大きさは、1200mm × 900mm であって、格子間隔は 100mm である。突起の形状は直径 50mm、高さ 100mm の円錐であり、各格子上に配置する。ただし図 6



図 6 較正板

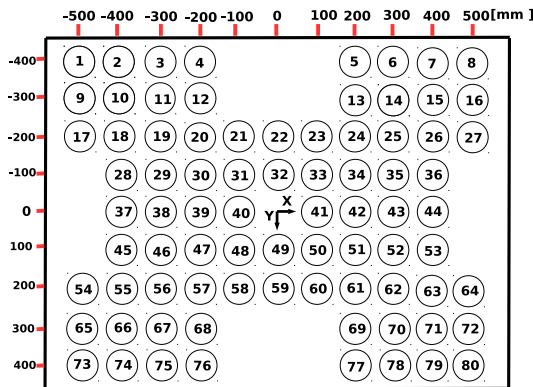


図 7 較正板上の点と座標

からわかる通り、突起は全ての格子に配置していない。較正板の中心をワールド座標系の原点としたときの、実際の座標値も図 7 に示す。

4.2 パラメータ δZ の推定結果

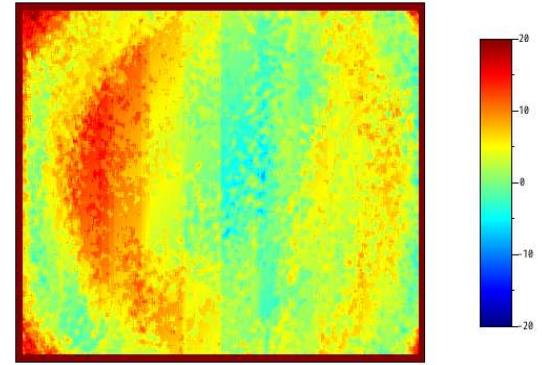
Kinect を壁から 1000 mm 離れた位置に、壁と平行になるように設置した。壁面の深度画像を 10 枚撮影し、それらの平均を求めた。

θ_x を推定する際には、 $\{(u, v) | u = 319, 10 \leq v \leq 59\}$ および $\{(u, v) | u = 319, 420 \leq v \leq 469\}$ の領域に属するデータを、また θ_y を推定する際には、 $\{(u, v) | 10 \leq u \leq 59, v = 239\}$ および $\{(u, v) | 580 \leq u \leq 629, v = 239\}$ の領域に属するデータをそれぞれ用いた。3.3 で述べた方法により、 δZ を求めた結果を図 8 に示す。

4.3 各パラメータの初期値の推定結果

4.2 と同様、Kinect を 3D 較正板から 1000 mm 離れた位置に、較正板と平行になるように設置した。 $\theta_z = 0$ とし、4.2 と同様の領域を用いて θ_x , θ_y を推定し、 $\hat{\mathbf{R}}$ を求めた。較正板の中心とデプスカメラの中心がほぼ一致するように設置したので、 $\hat{\mathbf{t}} = [0 \ 0 \ 1000]^T$ となる。

パラメータ θ_x , θ_y の初期値推定には、4.2 と同様の領域を用いた。測定した深度画像に対し、 $\mathbf{R}^{-1}$ を適用した結果



※赤(20mm)～青(-20mm) (a)

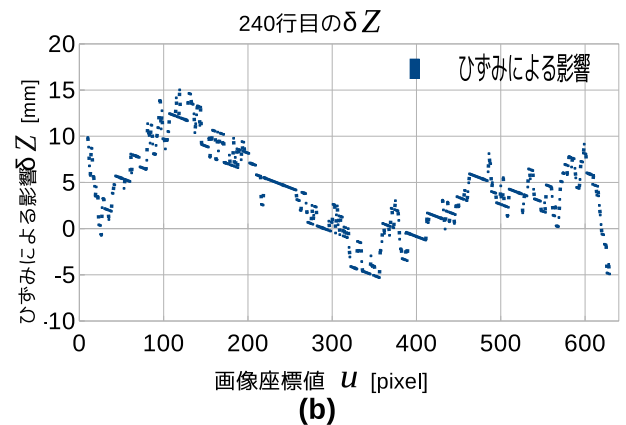


図 8 δZ の深度画像.(a): δZ をカラーマップで表示. (b):画像中央の水平方向の断面図

$[u' v' w']^T$ を求め、その値に対して、4.2 で求めた δZ を引き、画像中心の深度が 1000 mm になるように、 Z_0 の初期値を定めた。その結果 $Z_0 = 16$ mm となった。較正板を撮影した時の深度画像と、それぞれの補正後の深度画像を図 9 に示す。画像座標において、左上角である 1 行 1 列目を原点としているので、 $\tilde{u}_0 = 319$, $\tilde{v}_0 = 239$ とする。

4.3.1 頂点座標の取得方法

$\hat{f}$ および $\hat{k}_1$ の推定のために、較正板上の既知の座標を与える必要がある。そこで $[u' v' w']^T$ より突起の頂点を読み取ることにする。突起の高さが既知なので、しきい値を 945mm として、深度画像をしきい値処理し、二値化した。二値化画像に対しラベリング処理を行い、頂点近傍の各領域において、中心位置を推定し、その値を (u', v') として読み取った。また、 (u', v') における深度を w' とする。

焦点距離 f

本来ならば $\hat{f}$ の推定には最小二乗を用いるのが適切であるが、今回は式 (9) により導出された複数の f の平均を $\hat{f}$ とする。その際に以下の 2 点間の座標値を用いた。

点 31 - 32, 32 - 33, 33 - 40, 40 - 41, 41 - 49, 49 - 50

しきい値処理後より、点 48 の w は値の取得に失敗したので、計算には使用しない。

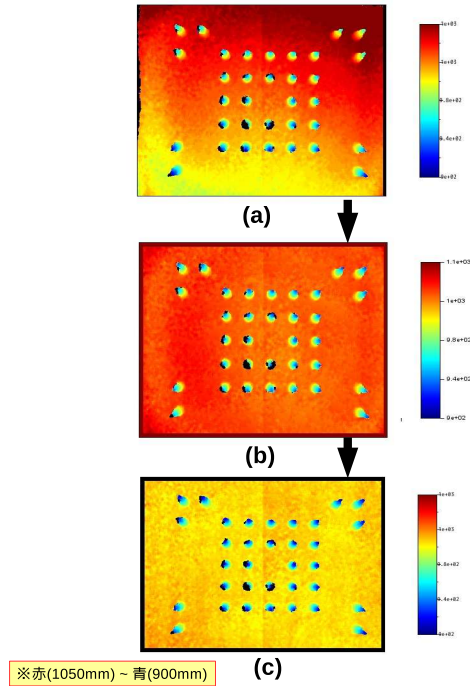


図 9 較正板を撮影した時の深度画像。(a):較正板を撮影した時の深度画像の原画像をカラーマップで表示。(b):回転 θ_x, θ_y を補正した後の深度画像をカラーマップで表示。(c):ひずみによる影響 δZ , オフセット Z_0 を補正した後の深度画像をカラーマップで表示

表 1 各パラメータの初期値および推定結果

パラメータ	初期値	推定結果	
		条件 (i)	条件 (ii)
θ_x [deg]	-0.1249	-5.453×10^{-2}	-4.547×10^{-2}
θ_y [deg]	6.720×10^{-2}	-2.858×10^{-2}	-1.156×10^{-2}
θ_z [deg]	0	8.213×10^{-3}	0.3507
t_x [mm]	0	-129.0	132.0
t_y [mm]	0	-125.7	-160.4
t_z [mm]	1000	960.5	669.6
k_1	-4.690×10^{-7}	0	0.8425
f [mm]	593.0	562.4	520.7
u_0 [pixel]	319	415.3	275
v_0 [pixel]	239	315.1	330
Z_0 [mm]	16	-16.83	16

歪み係数 k_1

複数の 2 点間の座標を与え、式 (13) より k_1 を求め、それらの平均を $\check{k}_1$ とした。その際以下の 2 点間の座標値を用いた

点 10 - 11, 11 - 18, 18 - 63, 63 - 71

以上で全ての初期値が求められたので、各パラメータの初期値を表 1 に示す。

4.4 パラメータの初期値推定後の最適化

図 7 より設置した較正板の突起物のワールド座標値 X, Y, Z と、ラベリングにより求めた画像座標値 u, v, w と合わせて、式 (8) を用いて、非線形の最適化を行った。このとき、 $\check{f}, \check{k}_1$ の導出に用いた点を全て使用した。

キャリブレーションは以下の条件で行った。

条件 (i) 半径方向の歪みを考慮せずにキャリブレーションした場合

条件 (ii) 半径方向の歪み係数 k_1 を考慮してキャリブレーションした場合

最適化後の各パラメータの値を表 1 に示す。

5. 比較実験

キャリブレーションの効果を確認するために、SDK 中の関数を用いて推定した座標と、条件 (i)(ii) で得られたモデル式から推定した座標とを比較する。両者の推定結果から得られる 2 点間の距離は、理論上対応する較正板上の 2 点間の距離に一致するので、これらの距離がどの程度正確であるかを調べる。なお、比較に用いる点は、較正時に使用しなかった頂点の座標を利用する。さらに較正の際に使用した深度画像を用いることで、傾きや並進などは変わらないようにした。

各条件下で推定した 2 点間距離と理論値、さらに各条件下における誤差率を表 2 に示す。誤差率は以下の式で求めた。

$$|\text{誤差率}| = \left| \frac{\text{推定距離} - \text{理論値}}{\text{理論値}} \right| \times 100$$

各条件下で求めた誤差率の平均は、

13.6 %, 2.65 %, 5.78 %, となった。

6. 考察

表 1 より、Khoshelham と Elberink[7] が推定した焦点距離である 5.453 ± 0.012 mm に条件 (i)(ii) で求めた値が近いので、 f に関しては妥当な値が得られていると考えられる。

表 2 より条件 (i)(ii) で求めた推定距離は、SDK 中の関数で求めた推定距離よりも精度が高かった。そして最も精度が高かったのは、条件 (i) で求めた推定距離であった。これは Kinect の個体差や測定環境により、今回使用した突起物の座標においては、ひずみの影響が小さかったのではないかと考えられる。

点 48 の深度値は、測定条件や他の値との比較すると大幅に小さかった。これは今回の実験で使用している突起物が円錐であることから、頂点において Kinect の赤外線パターンの反射が不十分となったことで、その画素におけるパターンの取得に失敗したことなどが考えられる。円錐にしたことで頂点が明確になったが、Kinect の赤外線パターンの取得に失敗する事例が起りやすくなってしまったのではないかと考えられる。

今後の課題としては、較正板上に設置する突起物を、頂点が特定しやすいもので、赤外線パターンが確実に取得できるものと考えて実験を行う。そしてひずみに関するパラメータの影響がどこまで考慮されるのかを細かく検証する

表 2 各条件下における 2 点間距離と誤差率

点-点	理論値 [mm]	SDK を利用 推定距離 [mm]	条件 (i)		条件 (ii)		
			誤差率 [%]	推定距離 [mm]	誤差率 [%]	推定距離 [mm]	誤差率 [%]
14-15	100	115.5	15.5	97.94	2.06	106.3	6.29
15-20	608.3	702.9	15.6	586.1	3.64	633.7	4.18
20-21	100	116.6	16.6	97.55	2.45	103.8	3.83
21-22	100	117.6	17.6	96.79	3.21	106.1	6.14
22-23	100	110.1	10.1	93.60	6.40	102.3	2.32
23-24	100	118.1	18.1	97.64	2.36	104.8	4.85
24-26	200	227.5	13.7	195.1	2.43	210.8	5.42
26-30	608.3	692.3	13.8	586.7	3.54	635.3	4.44
30-34	400	452.1	13.0	385.2	3.70	417.5	4.39
34-39	412.3	468.7	13.7	398.3	3.40	431.8	4.72
39-42	400	454.8	13.7	386.9	3.28	418.2	4.54
42-47	412.3	479.7	16.4	400.7	2.81	433.8	5.21
47-51	400	463.0	15.8	388.5	2.87	421.1	5.27
51-55	608.3	672.7	10.6	603.4	0.799	650.3	6.90
55-57	200	214.8	7.38	202.8	1.39	216.7	8.34
57-58	100	109.0	8.98	100.6	0.591	109.1	9.09
58-59	100	116.0	16.0	100.6	0.616	107.5	7.51
59-60	100	110.5	10.5	95.51	4.49	105.0	4.99
60-61	100	114.6	14.6	98.78	1.22	107.5	7.53
61-66	608.3	670.0	10.1	618.8	1.74	667.5	9.72

ことなどが考えられる。

7. 結論

本研究は、Kinect により取得された深度画像と、3D 校正板を用いて、デプスカメラのキャリブレーション手法の構築を提案した。各条件下で比較したところ、条件 (i) で推定した結果が、最も精度が高かった。これは Kinect の個体差や測定環境により、今回使用した突起物の座標においては、ひずみの影響が小さかったのではないかと考えられる。

参考文献

- [1] Alexander Weiss et al., “Home 3D Body Scans from Noisy Image and Range Data,” IEEE International Conference on Computer Vision 2011, pp. 1951 – 1958, Nov. 6–13, 2011.
- [2] Jing Tong, et al., “Scanning 3D Full Human Bodies Using Kinects,” IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 18(4), pp. 643 – 650, April, 2012.
- [3] Richard A. Newcombe et al., “KinectFusion: Real-Time Dense Surface mapping and Tracking,” 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2011, pp. 127 – 136, Oct. 26-29, 2011.
- [4] Lu Xia, et al., “Human Detection Using Depth Information by Kinect,” International Workshop on Human Activity Understanding from 3D Data 2011, pp. 15-22, Jun. 24, 2011.
- [5] Lulu Chen, et al., “A survey of human motion analysis using depth imagery,” Pattern Recognition Letters, 34(15), pp. 1995 – 2006, Nov., 2013.
- [6] Cha Zhang and Zhengyou Zhang, “Calibration between depth and color sensors for commodity depth cameras,” IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME) 2011, pp. 1 – 6, July 11–15, 2011.
- [7] Kourosh Khoshelham and Sander Oude Elberink, “Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Application,” Sensors 12, pp. 1437–1454, 2012.
- [8] Jan Smisek, et al., “3D with Kinect,” Consumer Depth Cameras for Computer Vision, Advances in Computer Vision and Pattern Recognition 2013, pp. 3 – 25, Springer.
- [9] Daniel Herrera C., et al. “Joint Depth and Color Camera Calibration with Distortion Correction,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 34(10), pp. 2058 – 2064, Oct., 2012.
- [10] Branko Karan, “Calibration of Depth Measurement Model for Kinect-Type 3D Vision Sensors,” Poster Proceedings of 21st International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, pp. 61–64, June 24 – 27, 2013
- [11] Zhengyou Zhang, “Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations,” The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision 1999, Vol. 1, pp. 666 – 673, 20 Sep, 1999.
- [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, August 1987.