

[研究論文]

カメラの簡易設備による3D計測用 校正法の検討

関靖夫¹・山内俊明¹・水島彰也²

1 情報メディア学科

2 (株)ダイヤコーポレーション

Investigation of 3D Camera Calibration for Measurement by Low-cost Equipment

Yasuo SEKI¹, Toshiaki YAMANOUCHI¹, Akiya MIZUSHIMA²

Abstract

It is shown that the calibration of a TV camera for 3D measurement can be implemented by using easily obtainable and inexpensive tools and materials. The camera model for the calibration is the perspective camera model which is based only on hypotheses of no spherical aberration and no chromatic aberration. The camera calibrated is a commercially available monochromatic camera appropriate for measurement. The accuracy of the calibration is sub-pixel order. The time for calibration is not so much for the laboratory use. The target 3D space for calibration is considered to be wide enough for the robot application.

Keywords: Calibration, Camera, Inexpensive, Accurate, Wide

1. まえがき

人間がおこなっているように、カメラから得られる画像情報から、対象世界の3次元情報を求めることが出来る。カメラの機能は、対象の3次元世界の各点が画像上の1点に該当する明度で投影されることである。対象の定量的な3次元情報を得るためには、カメラの投影パラメータを定量的に十分な精度で求める必要がある。この処理をカメラの校正(キャリブレーション)という。校正には、いろいろな仮定のものものや、部分的なものがあるが、本報告での校正はあまり仮定を用いない精度のよいカメラの投影モデルである射影モデルに基づいた校正を行う。このモデルで仮定していることは、球面収差が無視できるということだけである。従来校正には、微動載物台または寸法の分かっている金属等の校正用物体等高価な設備・器具が必要であり、とくに広い3次元空間に対してカメラを校正するのは、高価な設備・器具が要求される。これに対して本報告では、高価でなく普通に市販されていて容易に入手できる器具・材料を用いて、十分広い空間に対して、十分な精度で、あまり大きな手間を要せず校正できることを示し、その方法を述べる。

以下、第2章で校正モデルとそのパラメータの理論的決定

法、第3章で校正の具体的実施方法、第4章で校正結果、第5章でまとめの順で述べる。

2. 校正モデルとパラメータの理論的決定

本報告でキャリブレーションとは、位置と姿勢が固定されたカメラにおいて、ある空間点での三次元座標 (X, Y, Z) (世界座標(生活空間に固定したもの))が決まったときに、その点 i の結像点の画像座標 $(i, j) = (\text{列}, \text{行})$ が決まる変換パラメータを求めることである。本報告で使用するカメラモデルである射影カメラモデルについて次に示す。

2.1 射影カメラモデル

射影カメラモデルは、

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

ただし、

$$\tilde{m} = (m_1, m_2, m_3)^T \quad (2)$$

$$\tilde{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4)^T \quad (3)$$

ここで、 T は転置行列(transposed matrix)を示す。そして式(2)、(3)は、それぞれ、画像座標

$$\vec{m} = (i, j) \quad (4)$$

および、対象世界の世界座標

$$\vec{X} = (X, Y, Z) \quad (5)$$

の斉次座標を示し、いずれも本キャリブレーションの場合には、有限点のみを考えるので、その場合に、斉次座標と原座標の関係は

$$\begin{aligned} X &= X_1 / X_4 & Y &= X_2 / X_4 \\ Z &= X_3 / X_4 \end{aligned} \quad (6)$$

および

$$u = m_1 / m_3 \quad v = m_2 / m_3 \quad (7)$$

また、変換行列 P は一般的な行列で射影カメラモデル (projective camera model) を特徴付け、つぎのような 3×4 行列である。

$$P_P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 p_{ki} の値は、自由度の関係から $p_{k4}=1$ 以外は一般に制限はない。

2.2 投影拘束式の変形

本校正での状況では、対象 3D 点も、画像点も有限点である。この場合は、式 (6), (7) に対応して一般性を失うことなく、

$$\tilde{m} = (i, j, 1)^T \quad (9)$$

$$\tilde{X} = (X, Y, Z, 1)^T \quad (10)$$

と定めることが出来る。ただし、 (X, Y, Z) は対象世界の空間点(物体点)、 (i, j) は画像座標 i が画素の列番号、 j を画素の行番号)を示す。また、すでに述べたように、

$$p_{14} = 1 \quad (11)$$

とおける。このとき、式(1)は、

$$\begin{cases} \lambda \cdot i = p_{11} \cdot X + p_{12} \cdot Y + p_{13} \cdot Z + p_{14} \\ \lambda \cdot j = p_{21} \cdot X + p_{22} \cdot Y + p_{23} \cdot Z + p_{24} \\ \lambda = p_{31} \cdot X + p_{32} \cdot Y + p_{33} \cdot Z + 1 \end{cases}$$

と展開される。 (12)

いま、3次元の対象点とその投影画像点の n 個のデータ点对 $[(X_k, Y_k, Z_k), (i_k, j_k)]$ ($k=1 \sim n$) から校正パラメータ (p_{uv}) を求める。このため、式(12)より λ を消去すれば、

$$\begin{cases} (p_{31} \cdot X_k + p_{32} \cdot Y_k + p_{33} \cdot Z_k + 1) i_k = \\ p_{11} \cdot X_k + p_{12} \cdot Y_k + p_{13} \cdot Z_k + p_{14} \\ (p_{31} \cdot X_k + p_{32} \cdot Y_k + p_{33} \cdot Z_k + 1) j_k = \\ p_{21} \cdot X_k + p_{22} \cdot Y_k + p_{23} \cdot Z_k + p_{24} \end{cases} \quad (13)$$

と変形される。これを p_{ki} について整理すれば

$$\begin{cases} X_k \cdot p_{11} + Y_k \cdot p_{12} + Z_k \cdot p_{13} + p_{14} \\ -i_k \cdot X_k \cdot p_{31} - i_k \cdot Y_k \cdot p_{32} - i_k \cdot Z_k \cdot p_{33} = i_k \\ X_k \cdot p_{21} + Y_k \cdot p_{22} + Z_k \cdot p_{23} + p_{24} \\ -j_k \cdot X_k \cdot p_{31} - j_k \cdot Y_k \cdot p_{32} - j_k \cdot Z_k \cdot p_{33} = j_k \end{cases} \quad (14)$$

そこで、係数および変数を分かりやすい記述に以下のように変換する：

$$\begin{pmatrix} p_1 \equiv p_{11} & p_2 \equiv p_{12} & p_3 \equiv p_{13} & p_4 \equiv p_{14} \\ p_5 \equiv p_{21} & p_6 \equiv p_{22} & p_7 \equiv p_{23} & p_8 \equiv p_{24} \\ p_9 \equiv p_{31} & p_{10} \equiv p_{32} & p_{11} \equiv p_{33} & p_{12} \equiv p_{34} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$a_{1,1}^{(k)} \equiv X_k, a_{1,2}^{(k)} \equiv Y_k, a_{1,3}^{(k)} \equiv Z_k,$$

$$a_{1,4}^{(k)} \equiv 1, a_{1,5}^{(k)} \equiv 0, a_{1,6}^{(k)} \equiv 0,$$

$$a_{1,7}^{(k)} \equiv 0, a_{1,8}^{(k)} \equiv 0, a_{1,9}^{(k)} \equiv -i_k X_k,$$

$$a_{1,10}^{(k)} \equiv -i_k Y_k, a_{1,11}^{(k)} \equiv -i_k Z_k$$

$$a_{2,1}^{(k)} \equiv 0, a_{2,2}^{(k)} \equiv 0, a_{2,3}^{(k)} \equiv 0,$$

$$a_{2,4}^{(k)} \equiv 0, a_{2,5}^{(k)} \equiv X_k, a_{2,6}^{(k)} \equiv Y_k,$$

$$a_{2,7}^{(k)} \equiv Z_k, a_{2,8}^{(k)} \equiv 1, a_{2,9}^{(k)} \equiv -j_k X_k, \quad (16)$$

$$a_{2,10}^{(k)} \equiv -j_k Y_k, a_{2,11}^{(k)} \equiv -j_k Z_k$$

さらに、

$$i_1^k \equiv i_k, i_2^{(k)} \equiv i_k \quad (17)$$

と置けば、その式(14)は、

$$\sum_{j=1}^{11} a_{i,j}^{(k)} p_i \equiv v_i^{(k)} \quad (18)$$

$$(i=1,2,k=1,2,\dots,n)$$

式(18)の未知数は p_1, p_2, \dots, p_{11} の 11 個であるので式の数 n が 11 個以上であると未知数を決定することが出来る。

$$n \geq 6 \geq 11/2 \quad (19)$$

よって、6 点以上の空間点を測定すればよいが、精度としては、出来るだけ多数の標本点を使用して決定することが望ましい。

3. 校正の具体的実施方法

カメラをキャリブレーションして、それを用いた3次元認識をもといてロボット等に適用するには、十分広い3次元空間を校正対象とする必要がある。そのために、精密微動台を使用するためには、台上の面積が十分広く且つ高さの変換範囲が大きい必要がある。このような既製品は市販されていないようで、特注品も非常に高価になると考えられ、大学の研究室等広いニーズに対応困難と考えられ、カメラの現実的な校正の大きな障害になっていると考えられる。そこで、本研究では、このような問題点を解決する校正の具体的実施方法を提案する。

3.1 校正対象パターンの生成とその世界座標の決定等

校正対象は、紙に印刷された幾何学的パターンで、特徴点が多数あり、且つ特徴点が位置の曖昧さを持たないものが望ましい。その代表的な例が白黒の千鳥格子であり本実験でもこれを使用する。このパターンの黒または白の矩形の角点は、原理的に太さを持たず位置の曖昧性がない。その例を Fig. 1 に示すが、これは画像生成により形として正方形の白または黒のパターンを意図して生成したものである。ノギス等の直接計測の結果、印刷操作により、校正パターンの白黒の単位パターンの縦方向と横方向の寸法はわずかに異なる。これはプリンターにおける紙の送りによると考えられる。しかし、パターン毎のバラツキは問題ならない程度であることがかなり多数のランダムなサンプリング計測により確かめられた。

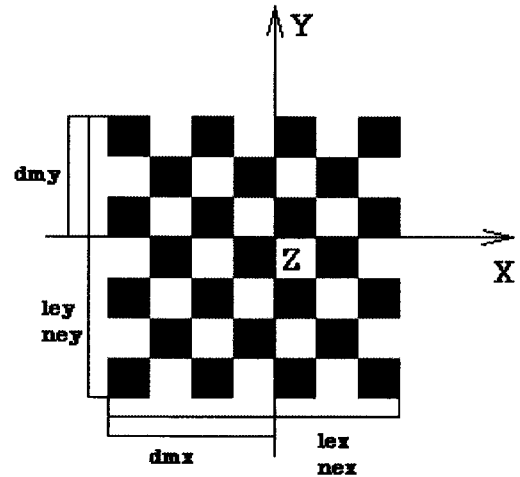


Fig.1 校正対象パターンと世界座標

校正パターンの紙は、十分平面度の良い合板の木材の上に貼り付けられた。貼り付けは、湿度による紙の伸び縮みを避けるためセロテープで引っ張って固定した。合板の平面度は、ガタツキがあまりないことを、同規格の板の裏表の重ねあわせることにより確かめられた。

この場合校正パターンは紙に普通のレーザープリンターで印刷されているので、経時変化が危惧されるが、あまり薄い紙を使用し且つとくに湿度の大きい場所でない限り、校正作業をする間の時間の経時変化は問題にならない。また、矩形パターンの縦・横線の直角性の誤差も問題になるほどないことが、L字定規により確認された。

3次元世界座標系は、3次元座標が簡単に求まるように、校正パターン上にX-Y平面が載るように Fig. 1 のように定めた。ただし、Z軸は右手系をなすように、紙の面に直角に手前方向に定めた。

校正対象特徴点の数は、校正の精度と信頼性と校正対象空間の広域性確保のため多数が望ましいが、上記のように印刷パターンのバラツキ誤差が少ないので、各特徴点の座標は計算により求めることができ、校正の手間を削減することが出来る。

校正対象カメラは、コンピュータビジョン用として市販されているモノクロカメラであり、BASLER製のCCD（電荷結合素子）カメラ本体 A600f に PENTAX製のレンズ H1214-M を装着したものである(Fig. 2 の最上に載っている小型カメラ)。



Fig.2 校正対象カメラ

3.2 校正パターンの高さ方向への変化方法

校正対象パターンの高さは、基準平面(世界座標の X-Y 平面)一致させる場合以外は、高さを変えて投影を行うが、校正対象空間を十分大きく取るためには、校正パターンが十分広く且つ校正パターンの載る台の高低差が十分大きい必要がある。また、空間の内部の任意の位置で校正精度を保障するためには、高さを適当な間隔で十分多数変化させる必要がある。そこでパターンの台の高さを変化させるために四角い木材のスペーサを 10 枚用いた。この木材はホームセンターで入手したものであるが、平面度はかなり良く重ねてもガタツキがなくすることが出来、ノギスによる各角での厚み測定をしたところ多少の不均一はあったが、記録を残して各積み上げで出来るだけ台が水平になるような重ね方をした。高さ方向にパターン位置を変化させたとき、パターンの (X, Y) 座標の変



Fig.3 キャリブレーション用の装置

化という横方向のずれが生じないようにその後カメラのキャリブレーションの精度を上げるため、Fig.3 に示すような字定規三本を組み合わせて作成した高さ方向のガイドを U 字のクランプで固定し、校正パターンを貼り付けた板をガイドに軽く押し付けながら高さを変化させた。

3.3 投影点画像座標の読取りと計算処理

3 次元の特徴点の投影点の画像座標は、画像処理ツール (AZP-8100-01, アパールデータ社製) を使用して測定した。このツールにより画像座標をサブピクセルの精度で読み取ることが出来る。

なお、調べる際は画像を拡大表示することでアイコン操作のミスが出にくくなる。

幾何学的に算出した特徴点の 3 次元座標と上記の画像座標の集合を連立方程式 (18) に代入し、連立方程式の解法としては、LU 分解法のうちのドゥリトル法を用いた C 言語プログラムにより、校正結果とその精度の評価を算出した。

4. 校正結果

4.1 校正結果データ

本実験において校正パターンの高さは、合板を 0 枚、3 枚、5 枚、7 枚、10 枚と順序を決めて重ねては、画像座標の測定を行った。その結果得られる校正用特徴点の数は 320 個となる。Fig.4 および Fig.5 のような白黒のパターン状の画像を校正対象とし、紙に印刷したものを、一つは装置の台の上にセロテープなどで固定して乗せ、得たデータ 64 個と、同様に固定して四パターンに高さを変えた 256 個のデータの合計 320 個の点で行った結果である。



Fig.4 基準高における校正パターン画像

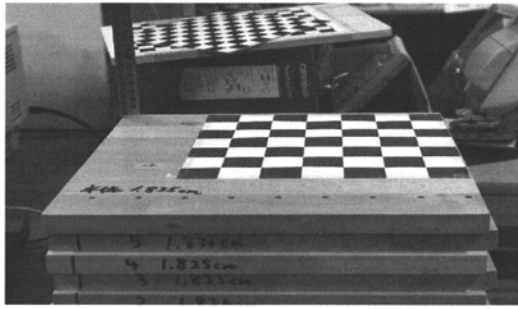


Fig.5 スペーサを5枚用いた高さでの校正パターン画像

校正実験により得られた校正パラメータの値とその精度評価パラメータの値を以下に示す。

射影変換モデルの校正パラメータは、

$$\begin{aligned} p_{11} &= 13.84673, p_{12} = 4.305098, p_{13} = -1.645598, \\ p_{14} &= 383.2844, p_{21} = -0.2292258, \\ p_{22} &= -2.074991, p_{23} = -14.28910, \\ p_{24} &= 353.8807, p_{31} = -0.0005625223, \\ p_{32} &= 0.01063349, p_{33} = -0.003546359 \\ &(\quad, p_{34} = 1.0000000) \end{aligned}$$

と求まった。

また、精度に関する評価値は、

$$r_{\text{err}} = 1.002598 \times 10^{-16}$$

および

$$\begin{aligned} e_{\text{esar}} &= 1.012540, e_{\text{emax}} = 2.566010, \\ e_{\text{dav0}} &= 0.533207, e_{\text{dav1}} = 0.602721 \\ e_{\text{dmax0}} &= 2.108474, e_{\text{dmax1}} = 2.556753 \end{aligned}$$

である。

ただし、精度評価パラメータの意味は、

r_{err} ; 校正結果の正規化した連立方程式の総合充足度、

e_{esar} ; 画像上位置のユークリッド距離誤差二乗平均平方根

e_{emax} ; 画像上位置のユークリッド距離誤差最大値

e_{dav0} ; 画像上位置の X 方向誤差の平均値

e_{dav1} ; 画像上位置の Y 方向誤差の平均値

e_{dmax0} ; 画像上位置の X 方向誤差の最大値

e_{dmax1} ; 画像上位置の Y 方向誤差の最大値

4.2 考察

この実験の結果は、画像上位置として X 方向、 Y 方向とも平均誤差として 0.5 画素程度で、量子化誤差程度であり、十分な精度が得られたと考えられる。対応する最大誤差は X 方向 2.1 画素、 Y 方向 2.6 画素でやや大きい、球面誤差よりは、肉眼とマウスにより読取の際エラーによりものと考えている。

5. まとめ

柔軟な操作・処理を実現させるための 3 次元認識には、カメラの校正が非常に重要である。

本研究では、キャリブレーション用の器材は一般に入手容易であり且つ大学の研究室としてもあまり高価でないものであり、それにより広い 3 次元空間に対しての射影モデルの校正の平均誤差として 0.5 画素という十分な精度が得られ、校正の手間も十分現実的な範囲で達成できることを明らかにした。

今後の課題としては、ステレオ処理への適用及び当初目的のパレット上の段ボールの積み替えへの応用の問題が残されている。

参考文献

- 1) 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳: コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, P.1~P.7, P.37~P.53 新技術コミュニケーションズ (2004)
- 2) 佐藤淳: コンピュータビジョン—視覚の幾何学—, P.146~P.149 コロナ社 (1999)