

アクティブステレオ距離画像センサの簡易キャリブレーション手法の提案

Proposal of an easy calibration method of active stereo range image sensors

牧野弘典 (中央大) 梅田和昇 (中央大)

Hironori MAKINO, Kazunori UMEDA

Chuo University, 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

Abstract: This paper proposes an easy calibration method of active stereo range image sensors. This method is based on the calibration of stereo vision. In this method, calibration is achieved by using only some images for arbitrary scenes and an object with known size.

Key words: Calibration, Range image sensor, Active stereo

1. 序論

ステレオ法に基づいた距離画像センサの計測手法には、プロジェクタなどを用いてパターン光を投影する能動型のステレオ法(active stereo)と、複数台のカメラのみで両眼立体視する通常のステレオ法(passive stereo)とがある。いずれの方法においても、2台のカメラ、またはカメラとプロジェクタを平行に揃えて配置するのが一般的である。このように配置することで、2次元で幾何学的問題を考える事ができ、キャリブレーションにおける未知パラメータが大幅に削減できるからである。しかしながら、平行カメラが常に実現できるわけではなく、任意に配置しなければならない場合もある。この場合3次元で幾何学的問題を考える必要がある。平行配置では、位置の自由度1を考えれば良いのに対し、カメラ/カメラ間、または、カメラ/プロジェクタ間の相対位置・姿勢で6自由度考えなければならず、未知パラメータが大幅に増える。キャリブレーション用の計測器等を用いて、これらすべてのパラメータのキャリブレーションを行うには、多大な労力と時間を必要とする。本研究では、アクティブステレオ法の距離画像センサを対象に、ステレオカメラのキャリブレーション手法¹⁾を応用して、時系列に得られた任意画像と、寸法が既知の単純形状の対象物を用いて、簡易にキャリブレーションを行う手法を提案する。

2. キャリブレーション理論

アクティブステレオ法では、スリット光、スポット光、コード化パターン光といった様々なパターン光が提案されている。いずれの場合においても画像面上から撮像された投影パターンの特徴点を検出、対応付けし、三角測量の原理から距離を計測するものであり本質的には等価である。

スポット光ではスポット像そのものを特徴点とし、その他のパターン光ではパターン上の独立したいくつかの点を特徴点として、以下、理論を展開する。ただし、対応点問題は解決されているものとし、また、カメラの内部パラメータ(焦点距離, CCD画素比, 画像中心等)および特徴点の投影方向ベクトルが既知であることを前提にする。内部パラメータはカメラ単体でのキャリブレーション²⁾によって求められる。

カメラの内部パラメータを要素とする内部行列を A とおく。このとき、CCDカメラで取得したデジタル画像 $m = (u, v)^T$ から正規化画像 $x = (x, y)$ へは、同次座標表現³⁾ $\tilde{m} = (u, v, 1)^T$, $\tilde{x} = (x, y, 1)^T$ を用いて次式で容易に変換できる。以後、同次座標は頭に“~”を付けて表す。

$$\tilde{x} = A^{-1} \tilde{m} \tag{1}$$

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} u_0, v_0 : \text{画像中心座標,} \\ \alpha_x, \alpha_y : \text{焦点距離} f \text{ と画素サイズの} \\ \text{積で表される定数} \end{array}$$

以下、カメラモデルを正規化カメラとして定式化する。プロジェクタについても特徴点の方向ベクトルを $\tilde{v} = (x_p, y_p, 1)^T$ の形で正規化する。Fig.1 に正規化カメラとプロジェクタとの幾何学的関係を示す。

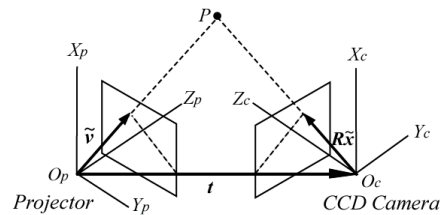


Fig.1 Geometric relation between laser projector and normalized camera

特徴点の正規化画像座標は、プロジェクタの座標系において、回転行列 R と並進移動ベクトル t を用いて $R\tilde{x} + t$ と表わされる。 $R\tilde{x} + t$ とスポット光の方向ベクトル \tilde{v} と、並進移動ベクトル t が同一平面上にある。これから次式(エピポーラ方程式)が得られる。

$$\tilde{v}^T (t \times (R\tilde{x} + t)) = 0 \tag{2}$$

式(2)を展開して整理すると次のようにまとめられる。

$$\tilde{v}^T E \tilde{x} = 0 \tag{3}$$

ただし、

$$E = [t]_{\times} R, \quad [t]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_x & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(4)は行列 E (以下、 E 行列と呼ぶ) の9つの要素に関する斉1次方程式である。従って、8点の対応点が得られれば、 E 行列の要素比を定めることができる。実際には、ノイズの影響を避け、安定した解を得るために、さらに多くの観測点を用いて E 行列の最適解を求める¹⁾。ただし、

E 行列のスケールは不定であるので $|t|=1$ を拘束とする。 $|t|=1$ の E 行列は、 EE^T のトレースが 2 となることを利用すればよい⁴⁾。

ここで、E 行列は、並進移動ベクトル t と回転行列 R のみで構成される行列であり、 t は、 EE^T の最小の固有値に対応する固有ベクトルとして得ることが出来る¹⁾ また、 R は、E 行列の列ベクトルと t を用いて求めることが出来る⁴⁾。

次に、Fig.1 より次の関係が成立する。

$$Z_p v = t + Z_c R \tilde{x} \quad (5)$$

これより、 $|t|=1$ としたカメラの奥行き方向の暫定的な距離は、次のように算出される³⁾。

$$Z_c = \frac{(t \times \tilde{v}, \tilde{v} \times R \tilde{x})}{\|\tilde{v} \times R \tilde{x}\|^2} \quad (6)$$

さらに、以上で得られた t , R と暫定的な特徴点の空間座標を初期値として次の評価関数を最小とするように非線形の最適化を行う。

$$J = \sum_{i,j} \left\{ \left(\frac{u_{ij} - u_0}{\alpha_x} - f_j \frac{r_{1j}^T X_{ij} + t_{xj}}{r_{3j}^T X_{ij} + t_{zj}} \right)^2 + \left(\frac{v_{ij} - v_0}{\alpha_y} - f_j \frac{r_{2j}^T X_{ij} + t_{yj}}{r_{3j}^T X_{ij} + t_{zj}} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

$r_1 \sim r_3$: R の行ベクトル,
 X : カメラ座標系での特徴点の空間座標

ただし、添え字 i, j はそれぞれ、 j 番目の画像における i 番目の対応点を意味する。最後に t のスケールは、寸法が既知の物体を観測し、その寸法を拘束条件に定められる。最も簡単な t のスケールの決定法は、Fig.2 に示すように直方体を置くなどして平行な 2 平面を生成し、平面間の距離を拘束に決定する方法である。

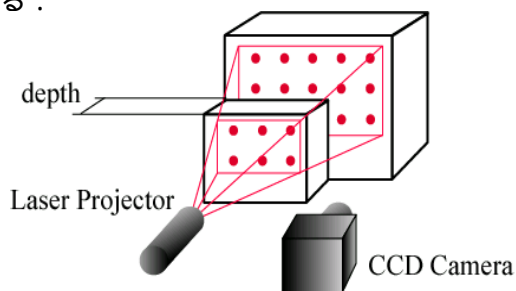


Fig.2 Restriction by an object with known size.

3. 実験

上記の手法に基づき実験を行った。プロジェクタは Laser Projector (Moritex SNF-501L) を使用し、ドットマトリックスパターン (19×19, 2 点間ビーム角 0.77°) を投影する。CCD Camera (TOSHIBA IK-M41MR) をプロジェクタに対し、ほぼ平行に設置し、計測レンジを拡大するために、画像面に回転 (約 18.4°) を与えた。基線長は約 40mm である。Fig.3 にセンサの外観を示す。画像処理ソフト Halcon (MV Tec) を用い、スポット光を検出する。以下、5 枚のランダムに取得した画像でキャリブレーションを行った結果を示す。

$$E = \begin{bmatrix} 0.0258 & -0.1136 & -0.2251 \\ 0.0762 & 0.0508 & -0.6522 \\ 0.0122 & 0.7085 & 0.0041 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 0.9485 & 0.3175 & -0.0495 \\ -0.3084 & 0.9665 & 0.0232 \\ 0.0589 & -0.0184 & 0.9809 \end{bmatrix},$$

$$t = [0.9314 \quad -0.3207 \quad 0.1723]^T$$

回転 R の左上 4 つの要素が、ほぼ画像面の 18.4° の回転を示す結果となっており、妥当な結果が得られている。上記の結果を用いて 70~170cm の距離で 10cm おきに平面を計測した。Fig.4 に距離と標準偏差の関係を示す。誤差が小さく、また距離の 2 乗に比例していることがわかる。

Fig.5 にキャリブレーション後、コップの形状を計測した結果を示す。各軸の数値は、 $|t|=1$ とした大きさである。コップの形状がよく表わされている。

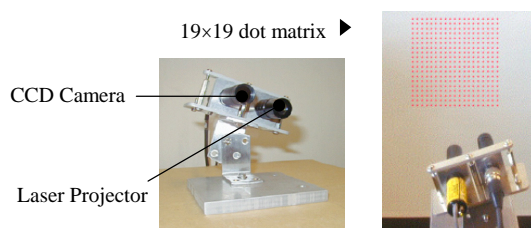


Fig.3 Range image sensor

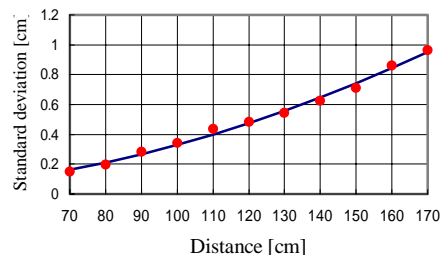


Fig.4 Relation between distance and standard

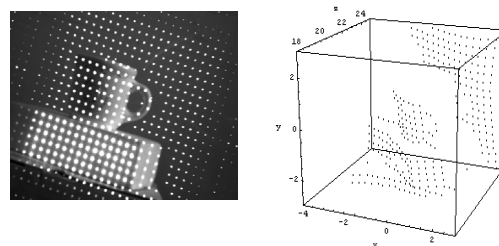


Fig.5 Three-dimension image of a cup.

4. 結論

アクティブステレオ法を対象とした簡易キャリブレーション手法を提案し、本手法の有効性を実験によって検証した。計測精度のより詳細な検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) 徐剛, 辻三郎: 三次元ビジョン, 共立出版 (1998) .
- 2) FEST Project 編集委員会: 新実践画像処理, pp.235-251, リンクス (2001) .
- 3) 金谷健一: 空間データの数理, 朝倉書店, pp.161-162, 1995 .
- 4) O.D.Faugeras: Three-Dimensional Computer Vision, p.273, MIT Press, Cambridge, MA, (1993) .