

2平面を用いたステレオカメラの弱校正に関する幾何学的な性質

蚊野 浩† (正員) 美濃 導彦†† (正員)
 安田 昌司† 大隅 正人†

Geometric Characteristics of Weak Calibration Using Two Planes

Hiroshi KANO[†], Michihiko MINOH^{††}, Members, Masashi YASUDA^{*},
 and Masato OSUMI[†], Nonmembers

† 三洋電機株式会社メカトロニクス研究所, 枚方市
 Sanyo Electric Co., Ltd., Mechatronics Research Center, Hirakata-shi, 573-8534
 Japan
 †† 京都大学総合情報メディアセンター, 京都市
 Center for Information and Multimedia, Kyoto University, Kyoto-shi, 606-0100
 Japan

あらまし 2平面を用いて弱校正されるステレオカメラの性質について考察した結果, 2平面弱校正ステレオにより, 3次元射影座標での計測がなされることを数学的に示した. また, 計測される3次元射影座標とユークリッド座標の関係についても明らかにした.

キーワード ステレオ視, 校正, 射影座標

1. まえがき

ステレオカメラの校正法には様々なものが提案されてきた[2], [4], [5]. これらの方法で校正されるステレオシステムは3次元ユークリッド座標を計測することができる. 一方, このような従来の校正法に対して, ステレオカメラの弱校正法[3], [6]と呼ばれる方法が知られている. この方法で校正されるステレオシステムでは3次元射影座標を計測することができる. 我々が提案した2平面を用いた多眼ステレオの校正法[1]もこの弱校正法の一つである.

2平面弱校正法に必要な手順は, 3次元空間に存在する二つの平面を観察し, 平面上の特徴点集合について, ステレオ画像対で対応をとることだけである. 2平面弱校正されたステレオカメラで計測される距離情報は, 校正に用いる2平面からの相対的な距離である. 本校正法はその手順が非常に簡単である. したがって, ステレオカメラの自律走行車への応用など, 強校正が困難な状況において有効な校正法として期待されている.

本論文の主な目的は, (1)ステレオカメラから観察した2平面に関する幾何学的な性質をまとめること, 及び(2)2平面弱校正ステレオにより3次元射影座標系での計測が行われることを数学的に示すことである.

また, 計測される3次元射影座標とユークリッド座標との関係も明らかにする.

2. ステレオカメラによる3次元計測

2.1 透視投影行列

ステレオ計測に用いる個々のカメラに固有の特性を内部パラメータ, カメラ間の位置関係を外部パラメータと呼ぶ. ピンホールカメラモデルを用いる場合, 内部パラメータは焦点距離(f), 画素サイズ(s_x, s_y), 画像中心((x_c, y_c))で表現することができる. ここで, $x = f/s_x$, $y = f/s_y$ と置き換えると, ピンホールカメラの特性は画像の大きさに関係した(x, y), 及び画像中心を与える(x_c, y_c)という四つの未知数を含む 3×3 の内部パラメータ行列 N として式(1)のように表現できる.

$$N = \begin{pmatrix} \alpha_x & 0 & x_c \\ 0 & \alpha_y & y_c \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

カメラの光学中心を原点とし, 光軸方向を z 軸, z 軸に垂直で撮像素子の水平方向に平行な軸を x 軸, z 軸・ x 軸に垂直な軸を y 軸とする3次元座標系をカメラ中心の3次元座標系と呼ぶ. ステレオカメラの外部パラメータは, 基準カメラ中心の3次元座標系に対する検査カメラ中心の3次元座標系の位置関係として, 回転行列 R と並進ベクトル t で記述することができる. 2台のカメラを基準カメラ, 検査カメラと呼び, 基準カメラの内部パラメータを N_b , 検査カメラの内部パラメータを N_i とすると, このステレオカメラの特性は式(2)の1組の透視投影行列によって記述される[10].

$$P_b = N_b \cdot (I\mathbf{0}) \\ P_i = N_i \cdot (R|t) \quad (2)$$

ここで, I は 3×3 の単位行列, $\mathbf{0}$ は3要素の縦零ベクトル, $(R|t)$ なる表現は 3×3 の回転行列 R の後ろに3要素縦ベクトル t を連結した 3×4 行列を意味する. 式(2)の透視投影行列を用いることで, 基準カメラ中心の3次元座標で記述される測定点(X, Y, Z)が, それぞれの画像面での画像座標(x, y)に式(3)のように変換される.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \approx P \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで \approx は射影的な等号を意味する. すなわち, 通常

の観察点を (x_b, y_b) , 他方のカメラでの観察点を (x_p, y_p) とするとき, 3×3 の正則行列を H , $m_b = (x_b, y_b, 1)'$, $m_i = (x_p, y_p, 1)'$, として射影的に成立する式(9)の関係がある .

$$m_i = H \cdot m_b \quad (9)$$

平面射影変換行列 H は 2 台のカメラの内部パラメータ N_b, N_i , カメラ間の相対的な位置・姿勢である回転行列 R と並進ベクトル t , 及び基準カメラに対する平面の単位法線ベクトル n と距離 z を用いて式(10)のように記述することができる[1], [8] .

$$H = N_i \cdot \left(R - \frac{t \cdot n'}{z} \right) \cdot N_b^{-1} \quad (10)$$

カメラの内部パラメータや位置・姿勢, 平面の法線ベクトルと距離に関する情報がなく, 平面を 2 台のカメラで観察した画像における 4 点以上の対応だけが与えられた場合, 式(9)を用いて射影変換行列 H を推定することができる . 推定される行列は式(10)で決まる行列に対してスケール因子が不確定である .

3.2 ステレオカメラの 2 平面弱校正

本節では文献[1]で提案したステレオカメラの 2 平面弱校正法について数学的・幾何学的に説明する .

内部パラメータ, 外部パラメータが未知の 1 対のステレオカメラで, 異なった場所に配置した二つの平面を観察する . 基準カメラに対する二つの平面の単位法線ベクトルと距離を $(n_1, z_1), (n_2, z_2)$ とすると, それぞれの平面による射影変換行列は, 式(10)を展開して, 式(11)となる .

$$\begin{aligned} H_1 &= N_i \cdot R \cdot N_b^{-1} - N_i \cdot \frac{t \cdot n_1'}{z_1} \cdot N_b^{-1} \\ H_2 &= N_i \cdot R \cdot N_b^{-1} - N_i \cdot \frac{t \cdot n_2'}{z_2} \cdot N_b^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

H_1 と H_2 の差行列である $H_1 - H_2$ は $-N_i \cdot t \cdot \left(\frac{n_1'}{z_1} - \frac{n_2'}{z_2} \right) \cdot N_b^{-1}$ となる . この式には 3×1 のベクトルである t が含まれるので, 行列の階数は 1 である .

一方, それぞれの平面に対するステレオカメラ間の射影変換行列を, 画像間の対応点から最小 2 乗的に推定することができる . 推定される射影変換行列はスケール因子が未知である . しかし, スケール因子を等しくした二つの射影変換行列の差行列の階数が 1 であるという性質を利用して二つのスケール因子を等しく

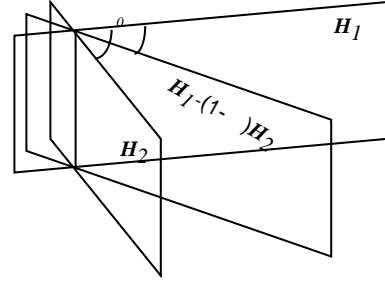


図 1 二つの平面から補間される平面
Fig. 1 Plane interpolated from two planes.

することができる . 具体的には, H_1, H_2 を推定した二つの行列とし, $H_1 - kH_2$ を特異値分解したときの第 1 特異値と第 2 特異値の比が最大になるように繰返し演算による非線形最小 2 乗法で k の値を決める . H_1, H_2 が精度良く推定されておれば, このようにして求めた $H_1 - kH_2$ はほとんど特異行列となり, 階数を 1 とみなすことができる . この二つの 3×3 行列 H_1, kH_2 をステレオカメラの幾何学的な特性として用いる校正法が 2 平面弱校正法である .

スケール因子を等しくした二つの平面射影変換行列を H_1, H_2 とし, この二つの行列を $\alpha : 1 - \alpha$ の比率で線形加算した行列 $\alpha \cdot H_1 + (1 - \alpha) \cdot H_2$ を考える . この行列に関して次の定理 1 が成り立つ .

[定理 1] 二つの平面射影変換行列 H_1, H_2 を $\alpha : 1 - \alpha$ の比率で補間した行列 $\alpha \cdot H_1 + (1 - \alpha) \cdot H_2$ も平面の射影変換行列であり, 対応する平面は 1 本の直線を共有する平面群 (面束) である (図 1 を参照のこと) .

(証明) 式(11)を用いることで, $\alpha \cdot H_1 + (1 - \alpha) \cdot H_2$ を式(12)と記述することができる .

$$N_i \cdot \left(R - t \cdot \left(\alpha \cdot \frac{n_1'}{z_1} + (1 - \alpha) \cdot \frac{n_2'}{z_2} \right) \right) \cdot N_b^{-1} \quad (12)$$

式(12)の一部を $\alpha \cdot \frac{n_1'}{z_1} + (1 - \alpha) \cdot \frac{n_2'}{z_2} = (n_x, n_y, n_z)$ とおくと $\alpha \cdot H_1 + (1 - \alpha) \cdot H_2$ は単位法線ベクトル $\left(\frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}, \frac{n_y}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}, \frac{n_z}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \right)$, 基準

カメラからの距離 $\frac{1}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}}$ の平面に対応する射影変換行列であることが明らかである .

H_1 に対応する平面と H_2 に対応する平面が交わる直線が存在する . この直線上の点を 2 台のカメラで観察した座標を $m_b = (x_b, y_b, 1)'$, $m_i = (x_p, y_p, 1)'$ とすると式(13)が成り

式(17)を得る .

$$\begin{aligned} P_b &= (I|0) \\ P_i &= (H_1/\alpha_0 \cdot N_i \cdot t) \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)の第 1 式と適当な行列の積をとることで式(18)を得る .

$$\begin{aligned} P_b &= (I|0) \\ &= N_b \cdot (I|0) \cdot \begin{pmatrix} I & 0 \\ \mathbf{n}'_l & -\alpha_0 \\ z_l & \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_b^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

また, 式(17)の第 2 式に式(11)を代入することで式(19)を得る .

$$\begin{aligned} P_i &= (N_i \cdot R \cdot N_b^{-1} - N_i \cdot t \cdot \frac{\mathbf{n}'_l}{z_l} \cdot N_b^{-1} | \alpha_0 \cdot N_i \cdot t) \\ &= N_i \cdot (R - t \cdot \frac{\mathbf{n}'_l}{z_l} | \alpha_0 \cdot t) \cdot \begin{pmatrix} N_b^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= N_b \cdot (R | -t) \cdot \begin{pmatrix} I & 0 \\ \mathbf{n}'_l & -\alpha_0 \\ z_l & \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_b^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

したがって, 2 平面弱校正されたステレオカメラで計測される 3 次元射影座標を (U, V, W, S) とすると, 2.2 で述べたように, これはユークリッド座標 (X, Y, Z) と式(20)の関係にある .

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} I & 0 \\ \mathbf{n}'_l & -\alpha_0 \\ z_l & \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_b^{-1} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \\ S \end{pmatrix} \quad (20)$$

式(20)において二つの座標を関係づける係数行列は基準カメラの内部パラメータと校正に用いた平面だけで決まる定数行列である . このステレオカメラで計測される 3 次元座標 (U, V, W, S) は射影座標であるが, 検査カメラの内部パラメータや検査カメラが配置される位置に依存しない . したがって, 本校正法を基準カメラを共通にする多眼ステレオカメラに応用した場合, すべてのステレオ対から得られる距離情報は同じ射影座標での値であることが保証される .

式(20)と α_0 の性質から明らかのように, 基準カメラの内部パラメータ N_b と校正に用いた二つの平面の単位

法線ベクトル $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$, 及び基準カメラからの距離 z_1, z_2 が既知であれば, 直接計測される射影座標をユークリッド座標に変換することができる . また, 2 平面に関して単位法線ベクトル $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ だけが既知で, z_1, z_2 が未知の場合, スケール因子が不確定なユークリッド座標に変換することが可能である .

4. むすび

本論文では 2 平面弱校正されたステレオシステムで計測される 3 次元空間の幾何学的な性質を考察した . その結果, 3 次元射影空間での計測がなされ, その空間は基準となるカメラの内部パラメータと校正に用いる平面だけに依存することを示した .

謝辞 御討いただいた京都大学松山隆司教授に感謝致します .

文 献

- [1] 蚊野 浩, 金出武雄, “任意のカメラ配置におけるステレオ視とステレオカメラ校正,” 信学論(D-II), vol. J79-D-II, no. 11, pp. 1810-1818, Nov. 1996 .
- [2] 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, RA-3, no. 4, pp. 323-344, Aug. 1987.
- [3] Z.Zhang, “Determining the epipolar geometry and its uncertainty : A review,” International Journal of Computer Vision, vol. 27, no. 2, pp. 161-195, 1998.
- [4] 出口光一郎, “カメラキャリブレーション手法の最近動向,” 情処研究, CV92-1, 1993 .
- [5] O.Faugeras and G.Toscani, “The Calibration Problem of Stereo,” Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 15-20, 1986.
- [6] O.Faugeras, “What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig?,” Computer Vision - ECCV'92, LNCS-series, vol. 588, pp. 563-578, Springer-Verlag, 1992.
- [7] R.Hartley, R.Gupta, and T.Chang, “Stereo from uncalibrated cameras,” Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 761-764, 1992.
- [8] O.Faugeras, “Three-dimensional computer vision,” The MIT Press, 1993.
- [9] Z.Zhang, R.Deriche, O.Faugeras, and Q.Luong, “A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry,” Artificial Intelligence, vol. 78, pp. 87-119, 1995.
- [10] 出口光一郎, “コンピュータビジョンのための幾何学 2 . ステレオの仕掛けを解き明かす,” 情報処理, vol. 37, no. 7, pp. 662-670, July 1996 .

(平成 10 年 7 月 15 日受付, 9 月 3 日再受付)