

逆向仿真工程中的一种相机自标定技术

王 刃¹ 朱东兴^{1,3} 蒋 渤²

(1 郑州信息工程大学测绘学院, 郑州市陇海中路 66 号, 450052)

(2 天津 61365 部队, 天津市河北区中山路 129 号增 1 号, 300166)

(3 空军雷达学院, 武汉市汉口赵家条 69 号, 430010)

摘要: 一直以来, 数码相机的检测都是利用传统的直接线性解, 因此, 必须布设一个高精度的控制检测场。

为了能够实现无控测量, 采用了相机自检校法, 并取得了和直接线性解一致的结果。

关键词: 绝对二次曲线; 绝对二次曲面; 自检校

中图法分类号: P246.1; P234

在近景以及逆向仿真工程中, 对目标进行观测、控制, 使用更多的是商用数码相机, 而商用数码相机的内部参数即像主点 (x_0, y_0) 、主距 f 等一般来说是未知的, 因此, 在对目标进行观测、控制前, 首先需要对相机内部参数进行标定。很长时间以来, 对相机的检校都是在一个布有大量控制点的检校场中进行的, 这限制了利用相机进行测量、控制的范围和场所。为此, 就需要一种无需控制点的相机检校方法——相机自检校法。

1 相机标定

1.1 相机自检校

相机自检校法的出现使相机检校摆脱了传统方法对控制点的依赖, 为实时控制与仿真提供了可行性。在针孔成像模型中, 物点 $M[x, y, z]^T$ 与像点 $m[u, v]^T$ 之间的关系可以表示为:

$$s[u \ v \ z]^T = P \cdot [x \ y \ z \ l]^T \quad (1)$$

式中, s 是任意比例因子; P 是 3×4 的透视投影矩阵, 可以表示为摄像机内部参数与外部参数的乘积, 即

$$P = K \cdot [R \ t] \quad (2)$$

式中,

$$K = \begin{bmatrix} -fk_u & fk_u \cos\theta & u_0 \\ 0 & -\frac{fk_v}{\sin\theta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, f 为主距; k_u, k_v 为水平与垂直方向上的比例因子; u_0, v_0 为像主点坐标; θ 为图像坐标轴的夹角; R, t 为从物方坐标系到像方坐标系之间的旋转矩阵和位移矩阵^[1]。

令 $f_u = -fk_u, s = fk_u \cos\theta, f_v = -fk_v \sin\theta$, 则要检测的相机内参数就是 (f_u, f_v, s, u_0, v_0) 。

1.2 基本概念

为了建立相机自检校模型, 这里需要引入一些必要的概念。

1) 齐次空间

三维欧氏空间中的一个点可以表示为 $x = (X, Y, Z)^T$, 当把这个点的表达式扩充为 $x = (X, Y, Z, t)^T$ 时, 即由欧氏空间转换到了齐次空间中, 齐次项 $t=0$ 对应着无穷远平面上的元素。

2) 绝对二次曲线 Ω

绝对二次曲线是齐次空间中无穷远平面上的一个虚二次曲线, 可用方程式表示为: $X^2 + Y^2 + Z^2 = 0, t = 0, x = (X, Y, Z, 0)^T$ 是它上面的任一点。

绝对二次曲线定义了一个无穷远投影平面上的圆, 其半径 $i = \sqrt{-1}$ 。在平移、旋转和缩放变化中, 绝对二次曲线具有不变的性质。根据这一性质可以很容易得出, 绝对二次曲线的透视投影即绝对二次曲线的像 ω 也是一个绝对二次曲线, 其线上点坐标不依赖于相机的位置。移动相机在不同位置进行拍摄时, 绝对二次曲线及其所成的像保持不变。因此, 绝对二次曲线所成的像 ω 的坐标仅

和相机的内方位元素有关, 而与相机的外方位元素无关, 从而可以利用绝对二次曲线对相机进行标定。其透视投影所成的像可以用矩阵表示为:

$$D = K^T K^{-1} \quad (3)$$

自标定的目的就是寻找 ω (或 ω^*), 并计算出 $K^{-T} K^{-1}$, 再对 $K^{-T} K^{-1}$ 取逆得到 KK^T , 对 KK^T 作 Cholesky 分解, 即可求出内参数矩阵 K 。

3) 绝对二次曲面

绝对二次曲面 Ω^* 是空间中一个特殊的虚二次曲面, 其等同于绝对二次曲线 Ω 的对偶。从代数角度考虑, Ω^* 在扩展欧氏坐标系(无穷远平面方程为 $t=0$)中的二次型为:

$$\Omega^* = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

若设 P 为投影矩阵, 则 Ω^* 应满足 $\omega^* / P \Omega^* P^T$ 。

4) 单应矩阵

在齐次空间中, 两个不同坐标系之间的转换即为单应矩阵。

5) 双视点间的几何关系

在双视点结构下, 图像间的对应点遵循核线几何关系。如图 1 所示, 照相机分别在不同的摄站位置 C, C' 摄取图像, 地面点 x 在左、右像片上分别成像为 m, m' 。由核线几何关系知, m 必然落在核线 l_m 上, m' 必然落在核线 $l_{m'}$ 上, 其中, l_m 和 $l_{m'}$ 为同名核线。这种约束关系是两幅图像间最基本的几何关系, 习惯上称为核线几何约束, 从数学上可以描述为:

$$m^T F m = 0 \quad (5)$$

式中, F 是秩为 2 的 3×3 矩阵, 习惯上称为基础矩阵。由于基础矩阵 F 包含了两幅图像间的所有几何信息, 因此, 精确地计算 F 对于摄像机标定和三维重建具有重要意义。常用的方法是直接基于式(5)的 8 点算法, 原理如下: 设 $m = [u, v, 1]^T$, $m' = [u', v', 1]^T$, 将 F 写成由各分量组成的列矢量形式, 即 $f = [F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{31}, F_{32}, F_{33}]^T$, 则对每一对对应点对 (m, m') 可写出方程 $[uu', vv', u, uv', vv', v', u, v, 1]f = 0$ 。将 $n(n \geq 8)$ 个这样的方程叠加起来得到线性方程组 $Af = 0$, 再利用奇异值分解可求出该方程组的最小二乘解^[2]。

1.3 自标定模型

自标定模型按照其原理大致可以分为两类, 一种是基于 Kruppa 方程的直接求解的自标定, 另一种是分层逐步标定。

1.3.1 直接求解 Kruppa 方程的自标定

Kruppa 方程在核线变换和绝对二次曲线的

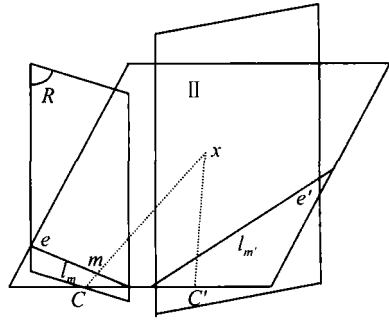


图 1 核线几何关系
Fig. 1 Epipolar Geometry

像 ω 之间建立了联系。在图 2 中, C, C' 为摄站点, k 为两摄站点之间的连线, e, e' 分别为两像平面上的核点。设 Π 为过连线 k 的平面, Π 与两像平面分别相交于 l, l' 。令 p, p' 分别为两像平面所对应的投影矩阵, 则核线变换在 l, l' 之间定义了一个单应矩阵。

如果 Π 和绝对二次曲线 Ω 相切, 则对应的有 l 和绝对二次曲线的像 ω 相切, l' 和 ω' 相切, 而绝对二次曲线独立于相机的摄影位置, 因此可以认为 $\omega = \omega'$ 。在核线变换下, l_1 与 l'_1, l_2 与 l'_2 一一对应^[1]。

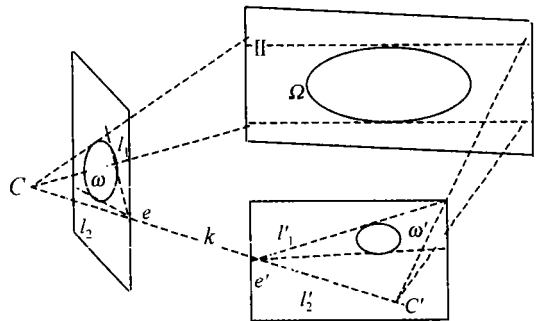


图 2 核线与绝对二次曲线像之间的关系
Fig. 2 Relations Between the Image of Absolute Conic and Epipolar

设 D 为绝对二次曲线 ω 的矩阵表示。由矩阵 D 的定义知, 核线 e, m (核点 e 与像点 m 的连线) 相切于 ω , 则点 m 必定在绝对二次曲线 ω 上, 即

$$(p \times m)^T D (p \times m) = 0 \quad (6)$$

矩阵 D 由 6 个参数组成, 其中有 5 个是独立的, 这和相机的内方位元素是一致的。

设点 m 的坐标为 $(x, y, 0)$, 同时考虑到对于两张像片面都有式(6)成立, 可得:

$$\begin{aligned} A_{11}x^2 + 2A_{12}xy + A_{22}y^2 &= 0 \\ A'_{11}x'^2 + 2A'_{12}x'y' + A'_{22}y'^2 &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中, A_{ij} 和 A'_{ij} 由矩阵 D 和核点 e, e' 共同决定。

令 $m = (x, y, 0), m' = (x', y', 0)$, 则当 $m' = Nm$ 时, 有:

$$? e, m? = H? e', m'? \tag{8}$$

其中, H 为单应矩阵。变换 N 等价为:

$$T = \frac{dT + b}{cT + d} \tag{9}$$

式中, 参数 a, b, c, d 可以根据核点 e, e' 以及同名像点 $q_i - q'_i (1 \leq i \leq n)$ 来计算。由立体像片的对应关系得:

$$T = \frac{p_3 q_2 - p_2 q_3}{p_3 q_1 - p_1 q_3}, T' = \frac{p'_3 q'_2 - p'_2 q'_3}{p'_3 q'_1 - p'_1 q'_3} \tag{10}$$

将式(10)代入式(9), 利用最小二乘平差可以解算出对应参数 a, b, c, d , 则式(7)可以改写为:

$$\begin{aligned} A_{11} + 2A_{12}T + A_{22}T^2 &= 0 \\ A'_{11}(bT + c) + 2A'_{12}(bT + c)(T + a) + \\ A'_{22}(T + a)^2 &= 0 \end{aligned} \tag{11}$$

式(11)中每个方程都是一个关于 T 的二次曲线。把两个方程的对应系数相比, 并令它们的比值相等, 可得:

$$\begin{aligned} A_{12}(A'_{22}a^2 + A'_{22}c^2 + 2A'_{12}ac) - (A'_{12}c + \\ A'_{22}a + A'_{11}bc + A'_{12}ab)A_{11} &= 0 \\ A_{22}(A'_{22}a^2 + A'_{11}c^2 + 2A'_{12}ac) - (2A'_{12}b + \\ A'_{22} + A'_{11}b^2)A_{11} &= 0 \end{aligned} \tag{12}$$

式(12)即为 Kruppa 方程。

由上面的推导知, 一对立体像对可以列出 4 个方程, 而内方位元素为 5 个, 故需要在 3 个不同位置摄取立体像对, 从而解算相机内部参数。

基于 Kruppa 方程的自标定方法不需要对图像序列作射影重建, 而是在两两图像之间建立方程, 在某些很难将所有图像统一到一个一致的射影框架的场合, 该方法相对于分层逐步标定法更具有优势^[3], 但基于 Kruppa 方程标定摄像机时, 随着图像序列的增长, 其解出现不稳定性, 这就限制了它的应用。

1.3.2 分层逐步标定

近年来, 分层逐步标定法成为自标定研究的热点, 并在实际应用中逐渐取代了直接求 Kruppa 方程的方法。分层逐步标定法首先要求对图像序列作射影重建, 再通过绝对二次曲线施加约束, 定出仿射参数(即无穷远平面方程)和摄像机内参数。

绝对二次曲面 Ω^* 对应着图像上的绝对二次曲线像的对偶 ω^* , 即下式成立:

$$\omega^* / KK^T = \lambda P_i \Omega^* P_i^T \tag{13}$$

它是将摄像机内参数的自身约束转移到对 Ω^* 的约束的纽带。

设第 i 幅图像对应的内参数矩阵为 K_i , 由式(13)可得:

$$K_i K_i^T / P_i \Omega^* P_i^T \tag{14}$$

考虑到 Ω^* 矩阵的对称型和秩为 3, 满足式(16)的 Ω^* 可以具有如下形式:

$$\lambda P_i \begin{bmatrix} KK^T & K^T a_\infty \\ a_\infty^T K & a_\infty^T a_\infty \end{bmatrix} P_i^T = KK^T \tag{15}$$

则通过优化下式可以解出所有的未知数:

$$CF(K_i, K, a_\infty) = \sum \|F(K_i K_i^T) - F(P_i \Omega^* P_i^T)\|_F \tag{16}$$

为保证式(16)收敛, 必须获得良好的 K_i 的初始值。这里假定倾斜因子 s 为零, 且主点坐标 (u_0, v_0) 已知, 则此时基于式(14)的自标定成为线性过程, 将该线性标定的结果作为式(16)的初始值, 可以保证优化过程的收敛^[2, 4, 5]。

1.4 解算步骤

1) 先用 8 点法计算基础矩阵 F 。在左、右立体像片上找 8 个同名像点, 利用奇异值分解求得立体影像的基础矩阵。

2) 计算右片上的核点像坐标。先利用共面方程求得右片上的任意两条核线, 然后通过求两条核线的焦点求得右片上的核点坐标。

3) 构建透视矩阵。通过公式:

$$\begin{aligned} P' &= [[e']_s F + e' v^T | \lambda e'] \\ P &= [I | 0] \end{aligned}$$

建立透视矩阵。其中, I 为单位矩阵; e' 为右片上的核点坐标; F 为基础矩阵; λ 为任意值; v 为任意一个 3×1 的矩阵。

4) 按上面介绍的分层公式求解。

2 实验结果与分析

本实验利用了一个活动控制架, 上面共布设有 40 个控制点, 在不同方位对控制架进行摄影。为了能够对相机自检校方法有一个客观的、较为准确的评价, 首先利用直接线性解对相机进行检校, 然后采用自检校法。在实验中, 分别利用 20、30、40 个控制点对相机进行了三次检校, 结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 利用自标定方法获取的结果和传统的直接线性变换解一致。也就是说, 利用相机自标定方法可以达到实测精度的要求。

表 1 直接线性变换解与自检校法的结果比较
Tab. 1 Results Comparison of DLT and Self-Calibration

控制点个数	直接线性解			自检校解			
	x_0 /像素	y_0 /像素	f	x_0 /像素	y_0 /像素	f_u	f_v
20	1 104. 81	734. 15	1 728. 50	1 103. 87	733. 90	1 727. 91	1 728. 84
30	1 104. 81	734. 25	1 728. 53	1 104. 54	734. 21	1 727. 82	1 728. 65
40	1 104. 81	734. 28	1 728. 56	1 103. 97	734. 36	1 727. 83	1 729. 66

在工业逆向仿真工程以及近景测量中, 由于商用数码相机的不稳定性以及内参数的不确定性, 需要频繁地对相机进行实时、实地检测。相机自检校法为此提供了可行的实施方法, 它成功地摆脱了控制点的束缚, 实现了无控制检测甚至测量。

参 考 文 献

- [1] Richard H, Andrew Z. Multiple View GeoMetry in Computer Vision[M]. Cambridge: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 2000
- [2] Meng Xiaoqiao, Hu Zhanyi. Recent Progress in Camera Self-Calibration[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1): 110-124(in Chinese)
- [3] Mendonca P, Cipolla R. A Simple Technique for Self-Calibration[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, Colorado, 1999
- [4] Faugeras O, Luong Q T. The Geometry of Multiple Images[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 2001
- [5] Zeller C, Faugeras O. Camera Self-Calibration from Video Sequences: the Kruppa Equations Revisited [R]. INRIA Rapport de Recherche No. 2793, France, 1996

第一作者简介: 王刃, 博士生。研究方向为图像处理、机器视觉及三维重建。
E-mail: chxy_wangren@163.com

Self-Calibration Applied in Converting Simulation Surveying

WANG Ren¹ ZHU Dongxing^{1,3} JIANG Bo²

(1 Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, 66 Middle Longhai Road, Zhengzhou 450052, China)

(2 Tianjin 61365 Troops, 1 Addition 129 Zhongshan Road, Hebei District, Tianjin 300166, China)

(3 Academy of Airforce Radar, 69 Zhaojiatiao, Hankou, Wuhan 430010, China)

Abstract: In the field of converting simulation surveying and traditional close range photogrammetry, it has been developed so far to survey objects by commercial digital camera and this technique is applied widely in every part of production. In order to get three-dimensional information of objects, commercial digital camera must be examined. For a long time, digital camera has been examined by DLT. Then there must be a high-precision control field. For realizing surveying without control points, we take a method of self-calibration and achieve good results.

Key words: absolute conic; absolute quadric; self-calibration

About the first author: WANG Fen, Ph. D candidate, majors in image process, computer vision and 3D reconstruction.

E-mail: chxy_wangren@163.com