

文章编号: 1001-9014(2007)06-0465-04

基于平行光管的 CCD 相机标定新方法

王志和, 舒嵘, 何志平, 吕刚, 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 阐述了一种由二维精密转台、平行光管和 CCD 相机构成的光学实验室相机标定的方法。首先通过 Hough 变换和最小二乘模板匹配方法得到平行光管十字丝板孔在 CCD 相机焦平面上的成像交叉点的位置, 然后根据相机畸变模型, 由最小二乘回归解算出内方位元素和畸变参数, 实验证明该方法标定结果满足空三处理和测图精度的要求。

关键词: CCD 相机; 几何标定; 最小二乘模板匹配; 非线性畸变

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

NEW METHOD OF CCD CAMERA CALIBRATION BASED ON COLLIMATOR

WANG Zhi-He, SHU Rong, HE Zhi-Ping, LV Gang, WANG Jian-Yu

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: A new method to calibrate CCD camera was proposed. It consists of two-dimension rotate instrument, collimator and CCD camera. At first, through Hough translation and least squares image matching, the intersection point of crisscross fixed on collimator, which imaged on the CCD focus plane, was found, And then a linear regression of least squares was used to calibrate the inner orientation elements and the distorted parameters based on the non-linear distortion model of camera. Experimental results of this method reveal good performance in the application of aerial triangulation operation and digital mapping.

Key words: CCD camera; geometric calibration; least squares image matching; non-linear distortion

引言

廉价的非量测 CCD 相机越来越广泛应用于摄影测量生产和计算机视觉系统中, 相应的 CCD 相机标定方法重新成为研究热点。一般来说, 标定方法可以分为光学实验室标定, 三维控制场标定和自标定。利用三维控制场进行相机标定程序简单, 但高精度控制场的建立比较困难; 自标定方法是直接从影像序列中求解标定参数, 无需控制场和标准标定物, 可标定精度水平无法与光学实验室标定方法相比, 且运算量大, 方程解不稳定。

作者结合现有的实验设备条件, 采用二维精密转台、平行光管和 CCD 相机建立光学实验室相机标定环境。相机标定参数分两个阶段解算。先利用相机主点的畸变差最小原理解算内方位元素, 然后再根

据 CCD 相机非线性畸变模型计算畸变参数^[1,2], 从而避免了未知数之间的相关性。

为了达到高精度标定水平, 对于像点坐标量测精度需达到 0.1 像素, 一些研究者通常采用 CCD 细分技术^[4,5]。该技术是在像点附近通过等间距转动角度统计像点灰度最大值确定像点坐标和二维转角的关系。由于受到光源能量波动, 背景噪声, A/D 转换量化噪声的影响, 使得像点灰度变化呈现随机性, 作者发现在邻域区间出现多个灰度峰值, 导致无法建立像点坐标和二维转角的对应关系; 另外该技术实际操作复杂, 工作量大, 对于一个点需反复测量十多次。在影像中, 线特征信号比点特征信号更加稳定, 抗噪声干扰能力更强, 提取的结果相对更加可靠。为此, 本文使用十字丝板孔作为物像, 通过 Hough 变换和最小二乘模板匹配提取十字丝板孔成

收稿日期: 2006-11-09, 修回日期: 2007-04-25

基金项目: 上海科委(055115020)资助项目

作者简介: 王志和(1978-), 男, 江西抚州人, 研究实习员, 硕士。现主要从事于数字摄影测量和数字图像处理研究工作。

Received date: 2006-11-09, revised date: 2007-04-25

像的两条相互垂直线段,由线段求交得到观测点坐标.

1 系统组成及工作原理

CCD 相机标定系统主要由精密的二维转台、角度显示仪、平行光管、CCD 相机以及工控机组成.选择合适的十字丝板孔和光源强度,使得成像清晰、线段宽度在 1~2 个像素左右;然后转动平台,通过软件控制得到影像和观测点坐标,并记录下转动角度.观测点的数量可以自定义,观测点分布要求均匀,通常采用等角度间隔进行观测.

在开始测量前,需要保证平行光管的光轴与相机初始状态的像平面相垂直.如图 1 所示,根据畸变对称性质,当平行光轴与像平面垂直时,沿方向相反角度相同转动二维转台得到两点 A 和 B,它们到像主点中心的距离为 Δx 和 $\Delta x'$,其绝对值相等.即: $|\Delta x| = |\Delta x'|$.

根据这一性质,不断调节转台直到在二维方向上的两点坐标绝对值一致,此时可以认为平行光轴与像平面垂直.

2 基于 Hough 变换和最小二乘模板匹配的像点观测

CCD 相机拍照得到的影像只包含十字丝板孔的成像,如图 2 所示.这种图像内容简单,目标明确单一,适合运用 Hough 变换进行直线提取,然后由求交点的方法得到观测点坐标.

Hough 变换是目前应用非常广泛的几何基元提取方法,基本思想是通过在参数空间的统计累计特征参数,来确定图像空间中的几何基元的描述参数,具有随机噪声鲁棒性高优点.

最小二乘模板匹配(Least Squares Image Matching, LMS)是由德国 Ackermann 教授提出的^[3].LSM 可以达到 0.1 甚至 0.01 像素的精度.由已知边

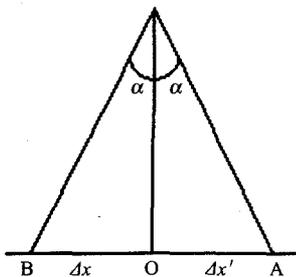


图 1 相机畸变对称示意图
Fig.1 Symmetric distribution of camera deformation

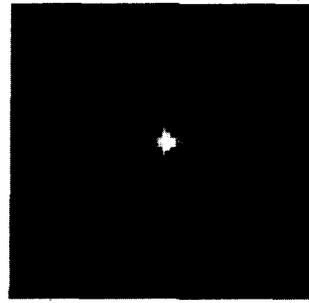


图 2 十字丝板孔成像图
Fig.2 Image of crisscross

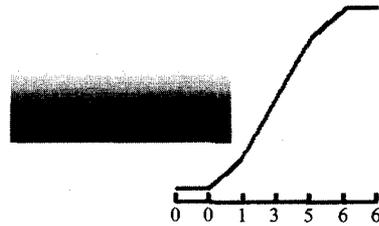


图 3 理论模板图
Fig.3 Theory model

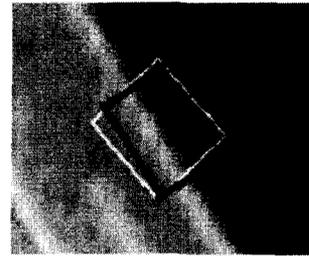


图 4 最小二乘模板匹配示意图
Fig.4 Least squares model matching

缘模式生成的边缘模板是一小块影像,用这一小块影像与实际的待检测影像进行匹配,就能精确地确定边缘的位置.图 3 所示为理论模板及其相应的断面图.图 4 中的黑色方框为具有一定宽度的直线段初值窗口,白色方框则为匹配后的影像窗口.可以看出,匹配后影像窗口的中线(即匹配后的边缘位置)正好对应于影像的实际边缘.假设给定模板为 $g_m(x,y)$, $g(x,y)$ 是实际影像块.如果只考虑影像灰度的偶然误差(随机噪声 n),有 $v = g(x,y) - g_m(x,y)$,则影像匹配可以写为 $\sum v = \min$,利用该式列误差方程式并按最小二乘法求解即为最小二乘模板匹配的基本思想.

为了提高匹配速度和便于计算方便,本文在匹配前利用直线段的初始参数将影像块旋转成水平影像,水平影像的每个象素都由双线性内插得到,这样

可以只在一维方向(断面方向)上进行匹配,即求解线段两端 y 方向的改正数,同时考虑辐射和几何位移有

$$g(x, y) = h_0 + h_1 g_m(x, y + dy) \quad (2)$$

对该式线性化后,即可得最小二乘模板匹配的误差方程式

$$v = b_0 dh_0 + b_1 dh_1 + b_3 dy - \Delta g \quad (3)$$

式中 dh_0, dh_1, dy 为待求参数的改正数, $\Delta g = g(x, y) - g_m(x, y + dy)$, 这是典型的间接平差方程, 简写成矩阵形式为

$$V = BX - L \quad (4)$$

由误差方程式建立法方程式

$$(B^T B)X = (BL) \quad (5)$$

最小二乘模板匹配是一个迭代过程, 由平差的改正值获得较初值更为准确的直线段参数, 然后进行重采样将影像旋转成水平, 而后再进行模板匹配, 当改正数小于某个给定的限差迭代终止, 输出匹配结果。

由最小二乘模板匹配获得两条相互垂直的线段, 通过线段求交便得到观测点的精确坐标值。

3 相机标定参数的解算

相机标定的参数包括内方位元素和畸变参数, 为了避免内方位元素和畸变参数的相关性, 本文分两个阶段分别求解。

3.1 内方位元素解算

如图 5 所示, S 点光源, O 图像坐标原点, 取图像几何中心, N 像主点, P 像点, 根据光束几何关系有

$$x - N_x = f * \operatorname{tg}(\alpha - d\alpha) \quad ,$$

$$y - N_y = f * \sec(\alpha - d\alpha) \operatorname{tg}(\beta - d\beta) \quad , \quad (6)$$

式中 x, y 为像点 P 坐标, N_x, N_y 为像主点的坐标, f 为焦距, α, β 为像点 P 的光束角度, $d\alpha, d\beta$ 为像主点

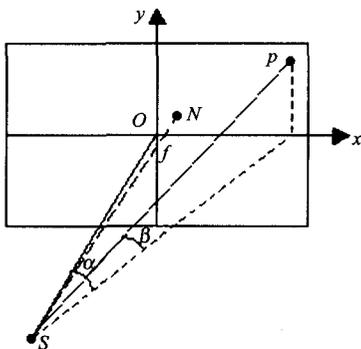


图 5 成像光束几何图

Fig. 5 Geometric drawing of image bundle

的光束角度, 该值微小, 没有在图中显示, 角度含义与 α, β 相同。

畸变公式有

$$\Delta x = x - N_x - f * \operatorname{tg}(\alpha - d\alpha) \quad ,$$

$$\Delta y = y - N_y - f * \sec(\alpha - d\alpha) \operatorname{tg}(\beta - d\beta) \quad , \quad (7)$$

将三角函数按泰勒公式展开得

$$\operatorname{tg}(\alpha - d\alpha) \approx \operatorname{tg} \alpha - d\alpha * \sec^2 \alpha \quad ,$$

$$\sec(\alpha - d\alpha) \approx \sec \alpha - d\alpha * \sec \alpha * \operatorname{tg} \alpha \quad ,$$

$$\operatorname{tg}(\beta - d\beta) \approx \operatorname{tg} \beta - d\beta * \sec^2 \beta \quad , \quad (8)$$

令 $d\alpha = N_x/f, d\beta = N_y/f$, 式(7)可以有以下形式

$$\Delta x = x - f * \operatorname{tg} \alpha + N_x * \operatorname{tg}^2 \alpha \quad ,$$

$$\Delta y = y - f * \sec \alpha * \operatorname{tg} \beta + N_x * \sec \alpha * \operatorname{tg} \alpha * \operatorname{tg} \beta + N_y * \operatorname{tg}^2 \beta \quad , \quad (9)$$

根据相机畸变理论, 像主点的畸变最小, 按最小二乘 $\sum vv = \min$ 原理, 可得法方程式

$$f \sum (\operatorname{tg}^2 \alpha + \sec^2 \alpha * \operatorname{tg}^2 \beta) - N_x \sum (\operatorname{tg}^3 \alpha + \sec^2 \alpha * \operatorname{tg} \alpha * \operatorname{tg}^2 \beta) - N_y \sum (\operatorname{tg} \alpha * \operatorname{tg}^3 \beta) = \sum (x \operatorname{tg} \alpha + y \sec \alpha * \operatorname{tg} \beta) \quad ,$$

$$f \sum (\operatorname{tg}^3 \alpha + \sec^2 \alpha * \operatorname{tg} \alpha * \operatorname{tg}^2 \beta) - N_x \sum (\operatorname{tg}^4 \alpha + \sec^2 \alpha * \operatorname{tg}^2 \alpha * \operatorname{tg}^2 \beta) - N_y \sum (\sec \alpha * \operatorname{tg} \alpha * \operatorname{tg}^3 \beta) = \sum (x \operatorname{tg}^2 \alpha + y \sec \alpha * \operatorname{tg} \alpha * \operatorname{tg} \beta) \quad ,$$

$$f \sum (\sec \alpha * \operatorname{tg}^3 \beta) - N_x \sum (\sec \alpha * \operatorname{tg} \alpha * \operatorname{tg}^3 \beta) - N_y \sum \operatorname{tg}^4 \beta = \sum y \operatorname{tg}^2 \beta \quad , \quad (10)$$

解式(10)得内方位元素 (N_x, N_y, f) 。

3.2 畸变参数解算

相机光学系统在制造和安装过程中不可避免存在各种畸变误差。畸变误差源主要包括: 径向畸变、偏心畸变、薄棱镜畸变误差等等。其中径向畸变为误差主要因素, Weng 的实验表明, 径向畸变所引起的误差是偏心畸变和薄棱镜畸变的 7~8 倍^[1]。

径向畸变使成像点沿径向方向发生畸变, 其数学模型

$$\Delta x_r = (x - x_0)(K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6 + O[r^8]) \quad ,$$

$$\Delta y_r = (y - y_0)(K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4 + K_3 \cdot r^6 + O[r^8]) \quad ,$$

(11)

其中 $r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2$, (x_0, y_0) 为像主点坐标。

偏心畸变和薄棱镜畸变使构像点沿向径方向和垂直于向径的方向发生畸变^[1], 其数学模型分别为

$$\Delta x_d = P_1(r^2 + 2 \cdot (x - x_0)^2) + 2 \cdot P_2(x - x_0) \cdot (y - y_0) + O[(x - x_0, y - y_0)^4] \quad ,$$

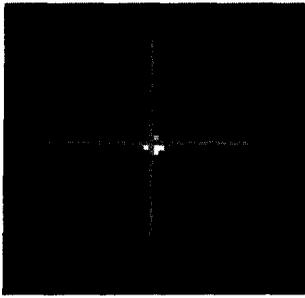


图6 十字丝交点检测结果
Fig.6 Result of crisscross detection

$$\Delta y_d = P_2(r^2 + 2 \cdot (y - y_0)^2) + 2 \cdot P_1(x - x_0) \cdot (y - y_0) + O[(x - x_0, y - y_0)^4], \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta x_p &= s_1((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2) + O[(x - x_0, y - y_0)^4], \\ \Delta y_p &= s_2((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2) + O[(x - x_0, y - y_0)^4]. \end{aligned} \quad (13)$$

这里主要考虑径向和偏心畸变,因为其他误差源引起的畸变非常小,可以忽略不计,而且引入太多的畸变参数,反而影响相机标定精度^[6].一般来说,取式(11)前1~2项可以满足相机的标定精度,总畸变的数学模型为

$$\begin{aligned} \Delta x &= (x - x_0)(K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4) + P_1(r^2 + 2 \cdot (x - x_0)^2) + 2 \cdot P_2(x - x_0) \cdot (y - y_0), \\ \Delta y &= (y - y_0)(K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4) + P_2(r^2 + 2 \cdot (y - y_0)^2) + 2 \cdot P_1(x - x_0) \cdot (y - y_0), \end{aligned} \quad (14)$$

联合式(9)和式(14),建立畸变误差方程式

$$\begin{aligned} K_1(x - x_0) \cdot r^2 + K_2(x - x_0) \cdot r^4 + P_1(r^2 + 2 \cdot (x - x_0)^2) + 2P_2(x - x_0) \cdot (y - y_0) &= x - f \cdot \operatorname{tg} \alpha + N_x \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha, \\ K_1(y - y_0) \cdot r^2 + K_2(y - y_0) \cdot r^4 + 2P_1(x - x_0) \cdot (y - y_0) + P_2(r^2 + 2 \cdot (y - y_0)^2) &= y - f \cdot \operatorname{seca} \cdot \operatorname{tg} \beta + N_x \cdot \operatorname{seca} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta + N_y \cdot \operatorname{tg}^2 \beta. \end{aligned} \quad (15)$$

其中 K_1, K_2, P_1, P_2 为待估参数,其他参数含义同上.把上节求出的内方位元素(N_x, N_y, f)代入式(15),然后运用豪斯荷尔德求解最小二乘线性方程的方法计算该超定方程得到待估参数.

4 实验结果及分析

本文采用的相机是CONTAX 645,焦距80mm.数码后背的主要参数:面阵像元数 4096×4096 ,像元大小为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$.以下数值单位均取像素,定义的坐标系是以图像几何中心为原点的图像坐标系.

在二维方向上每隔一度旋转转台,而后运用Hough变换和最小二乘模板匹配方法检测像点,获

表1 某像点坐标的检测结果

Table 1 The result of an image point detection

观测次数	x	y
1	799.91	2993.05
2	799.96	2992.96
3	799.99	2992.98
4	800.09	2992.93
5	799.96	2992.95
均值	799.98	2992.97

取169个观测点坐标.图2是十字丝板孔的成像,图6是十字丝检测结果,由两条垂直直线求交得到交点坐标.为了保证检测精度达到0.1个像素,坐标值精确到小数点后两位.另外考虑到检测结果的稳定性,设定每个点的检测数为5次,再取均值.如表1所列,该点对应的角度为 $(8^\circ, 6^\circ)$.

解算内方位元素得: $x_0 = 13.58, y_0 = -85.63, f = 8851.85$,该相机的像主点偏移较大,焦距的标定值与相机说明书的焦距参考值相差37个像素.标定的畸变参数:

$K_1 = 8.4748e - 010, K_2 = -6.8630e - 017, P_1 = -7.2928e - 010, P_2 = 5.7204e - 017$ 取像点坐标最大值(2048,2048)代入式(14),得到最大畸变差: $\Delta x = 4.43, \Delta y = 4.43$.这说明该相机的畸变较小.运用该标定结果进行摄影测量空三处理,由空三解算结果表明该方法的标定结果正确可行.

REFERENCES

- [1] Juyang Weng. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation[J]. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965—980.
- [2] Guo Q W, Ma S D. Implicit and explicit camera calibration theory and experiment[J]. *IEEE*, 1994, 5(16): 469—480.
- [3] Ackermann F. *High Precision Digital Image Correlation* [M]. University of Stuttgart, 1983.
- [4] LIU Jin-Guo. Study on high accurate geometric calibration of precision photoelectronic measuring system with large field of view and distortion correcting[J]. *Optics And Precision Engineering* (刘金国.大视场光电测量系统的精密几何标定和畸变校正的研究. *光学精密工程*), 1994, 2(4): 109—120.
- [5] HUANG Jing, GAO Xiao-Dong, MA Wen-Li, et al. Accurate geometric calibration of large resolution digital aerial survey camera[J]. *Opto-Electronic Engineering* (黄静,高晓东,马文礼,等.大面阵数字航测相机的精密几何标定. *光电工程*), 2006, 33(2): 138—140.
- [6] ZHOU Guo-Qing. The Intrinsic and extrinsic factor of CCD calibration; distortion model and signal to noise ratio[J]. *Acta Electronica Sinica* (周国清.论 CCD 相机标定的内外因素畸变模型与信噪比. *电子学报*). 1996, 4(11): 12—17.