

# 基于直线约束的非量测数码相机标定

杨朝辉

(苏州科技学院 环境科学与工程学院, 苏州 215011)

**摘要:**提出一种非量测数码相机标定的直接方法。该方法基于直线约束条件,即在正确进行畸变纠正后,物方空间的三维直线投影到像片平面上也应该是一条直线。为了将畸变直线纠正成理想直线,利用畸变模型对其进行畸变纠正,并采用 Levenberg-Marquardt 算法对非线性方程组进行求解,解出符合条件的最佳畸变参数。实验结果证明该方法具有较强的鲁棒性与实用性。

**关键词:**相机标定;畸变;直线约束;非量测相机

**doi:**10.3969/j.issn.1000-3177.2010.05.017

**中图分类号:**TP79      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-3177(2010)111-0076-04

## Calibration of Non-metric Digital Camera Based on Line Constraint

YANG Zhao-hui

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011)

**Abstract:** This paper addresses the problem of calibrating lens distortion of non-metric digital camera. Our approach is based on the line constraint condition, which means the straight line in 3D world must be projected as straight line in the image plane, if the lens distortion is compensated correctly. And a distortion measure is presented that can be optimized using non-linear Levenberg-marquardt algorithm to find the best distortion parameters that straighten curved lines. The given results show the significant improvement of robustness and practicability of the method.

**Key words:** camera calibration; distortion; line constraint; non-metric camera

### 1 引言

随着 CCD 技术的发展,非量测数码相机在摄影测量中得到了越来越广泛的应用。相对于量测相机,非量测相机有镜头畸变大、内方位元素未知、CCD 面阵存在畸变等缺点,导致成像有较大程度的变形。为了在实际应用中减少畸变并提高精度,必须对其进行相机标定。相机标定是指检查和校准相机内方位元素和光学畸变参数的过程,也是从二维图像获取三维信息必不可少的步骤<sup>[1]</sup>。相机标定方法主要分为 3 类:①三维控制场检校法<sup>[2]</sup>,实验场一般由已知物方空间坐标的标志点构成。这类方法精度高,但在实际应用中受到一定的场地限制;②不需

要已知参照物而借助相邻图像间对应关系的自定标方法<sup>[3~4]</sup>,这类方法方便快捷,但需要同时考虑多张影像;③直接利用单张图像中物体的几何约束条件<sup>[5~6]</sup>,这类方法基本上不需要外部条件,实用性强,主要应用于水利水电、地形测量和建筑物三维建模等对精度要求并不高的领域。

本文方法属于第三类,即利用影像中的直线约束条件来求解畸变参数,直接完成相机的标定。

### 2 相机畸变模型

相机光学畸变差是影响像点坐标质量的一项重要误差。光学畸变主要包括径向畸变和离心畸变两类。径向畸变使构像点沿向径方向偏离其准确位

收稿日期:2009-08-23

修订日期:2009-09-21

基金项目:苏州科技学院开放实验室建设项目(2008YKB-02),苏州科技学院实验教学改革与建设项目(2009YA01)。

作者简介:杨朝辉(1976~),男,讲师,博士生,主要研究方向:数字摄影测量与遥感图像处理。

E-mail: yzhac@163.com



置;而离心畸变是由于镜头光学中心和几何中心不一致引起的误差,它使构像点在向径方向和垂直于向径方向都偏离其正确位置。与径向畸变相比,离心畸变较小可以忽略不计<sup>[7]</sup>。实验表明,对小像幅的普通数码相机可仅取  $k_1$ ;对某些变形较大的相机,则需取 5 个系数 ( $k_1, \dots, k_5$ );而对于一般的家用数码相机,取  $k_1, k_2$  两个畸变参数即可满足精度要求。因此本文所使用的相机畸变模型如下

$$\begin{cases} x_u = x_d + x_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) \\ y_u = y_d + y_d(k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(x_d, y_d)$  为畸变图像的像片坐标,  $(x_u, y_u)$

为畸变纠正图像的像片坐标,  $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ 。  $k_1, k_2$  即为需要求解的相机畸变参数。

### 3 本文的相机标定方法

本文方法主要分为 3 大步骤:首先利用改进的 Canny 算子与 Hough 变换将图像中对应物方空间直线的畸变直线提取出来,并按一定的间隔提取畸变直线上的畸变点;然后在满足直线约束的条件下利用相机畸变模型对畸变点进行纠正;最后用非线性 Levenberg-Marquardt 算法解出满足直线约束条件下的最优畸变参数。

#### 3.1 畸变直线检测与提取

(1)使用基于 ROC 分析技术的 Canny 算子提取待处理图像的边缘二值图

Canny 算子满足信噪比、定位精度、单边缘响应 3 个判断准则,提取的边缘所在位置灰度变化快、起伏大,因此 Canny 算子可以提取稳定的直线边缘。但 Canny 算子的两个阈值对最终提取结果有很大的影响。基于此,本文使用基于 ROC 分析技术的自适应阈值 Canny 算子<sup>[8]</sup>。首先由不同参数组合的 Canny 算子计算图像的多个边缘提取图,并逐像素进行统计,得到边缘像素相关图;然后采用 ROC 曲线分析技术折衷正确检测率与虚警率,找到最佳的关联阈值,从而找出理想的边缘提取图。

#### (2)利用 Hough 变换提取近似直线

Hough 变换具有明确的几何解析性,抗干扰能力强,对被检测图像的噪声不敏感,因此本文使用改进的 Hough 变换提取候选的畸变直线。由于畸变的原因,图像中的畸变直线并不是严格的直线,而是表现为一定弧度的曲线。为了能够提取出这类畸变直线,可以适当放大  $\rho, \theta$  的间隔,保证对近似直线提取有一定的鲁棒性。然后对像素高度集中的地方检

验其累加器单元的数目,对其排序并设置合理的阈值,从而在消除较短的畸变直线的同时保留较长的畸变直线。

#### (3)检验选择单元的像素之间的连续性

由于一条长的畸变直线可能是由多个间断的短畸变直线构成,因此对同一方向的短畸变直线端点进行连续性判断,即通过计算前一条短畸变直线的尾端点与后一条短畸变直线的首端点的距离来判断是否连续。如果尾端点和它最接近的相邻首端点之间的距离在设置的阈值内,则认为点之间为连续的,从而将不连续的短畸变直线连接成为长的畸变直线。

#### 3.2 直线约束条件

使用上述的畸变直线检测方法,从原始影像中共提取出  $M$  条畸变直线  $L_m (m=1, \dots, M)$ , 每条畸变直线可选取  $N$  个离散点  $p_{d,n} (n=1, \dots, N)$ , 其坐标用  $(x_{d,n}, y_{d,n})$  表示。由于每条畸变直线都对应着物方空间的真实直线,因此可令点  $p_{d,n}$  畸变纠正后的对应点为  $p_{u,n}$ , 其坐标用  $(x_{u,n}, y_{u,n})$  表示。则式(1)改为

$$\begin{cases} x_{u,n} = x_{d,n} + x_{d,n}(k_1 r_{d,n}^2 + k_2 r_{d,n}^4) \\ y_{u,n} = y_{d,n} + y_{d,n}(k_1 r_{d,n}^2 + k_2 r_{d,n}^4) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $(x_{d,n}, y_{d,n})$  为畸变直线上离散点的像片坐标,  $(x_{u,n}, y_{u,n})$  为相应点畸变纠正后的像片坐标,  $r_{d,n} = \sqrt{x_{d,n}^2 + y_{d,n}^2}$ 。  $k_1, k_2$  即为需要求解的相机畸变参数。

对于任意一条畸变直线,都对应着物方空间的一条直线,因此在正确完成畸变纠正的条件下,  $N$  个点  $p_{u,n}$  应该在一条直线上(图 1)。本文利用这一约束条件,采用线性回归预测畸变纠正后的直线  $\Lambda_m$ , 即采用海赛正规形式,用 3 个未知量  $n_x, n_y, d_0$  表示  $\Lambda_m$ <sup>[9]</sup>

$$\Lambda_m: \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - d_0 = 0 \quad (3)$$

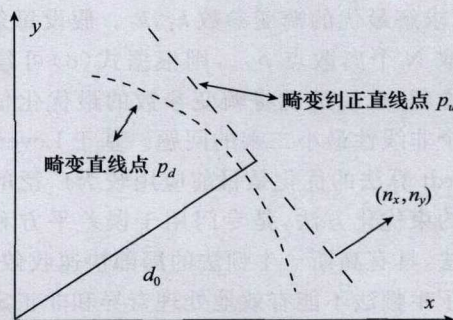


图 1 畸变直线纠正关系图



先计算下列 5 个统计变量

$$E_x = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_u} x_{u,n}, E_y = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_u} y_{u,n},$$

$$E_{xx} = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_u} (x_{u,n})^2, E_{yy} = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_u} (y_{u,n})^2,$$

$$E_{xy} = \frac{1}{N_m} \sum_{n=1}^{N_u} x_{u,n} y_{u,n}$$

当  $E_{xx} - E_x^2 \geq E_{yy} - E_y^2$ , 直线表示为

$$\Delta_m: y = ax + b \quad (4)$$

$$\text{式中: } a = \frac{E_{xy} - E_x E_y}{E_{xx} - E_x^2}, b = \frac{E_{xx} E_y - E_x E_{xy}}{E_{xx} - E_x^2}$$

由此可得到变量

$$n_x = \frac{-a}{\sqrt{a^2+1}}, n_y = \frac{1}{\sqrt{a^2+1}}, d_0 = \frac{b}{\sqrt{a^2+1}} \quad (5)$$

当  $E_{xx} - E_x^2 < E_{yy} - E_y^2$ , 直线表示为

$$\Delta_m: x = cy + d \quad (6)$$

$$\text{式中: } c = \frac{E_{xy} - E_x E_y}{E_{yy} - E_y^2}, d = \frac{E_{yy} E_x - E_y E_{xy}}{E_{yy} - E_y^2}$$

同样得到变量

$$n_x = \frac{1}{\sqrt{c^2+1}}, n_y = \frac{-c}{\sqrt{c^2+1}}, d_0 = \frac{d}{\sqrt{c^2+1}} \quad (7)$$

综上所述, 畸变纠正直线  $\Delta_m$  是关于畸变参数  $k_1, k_2$  与畸变直线上的离散点  $p_{d,n}$  的函数, 当畸变参数  $k_1, k_2$  被正确求解时,  $p_{d,n}$  对应的畸变纠正点  $p_{u,n}$  必然在同一条直线上, 也就是说满足式(3)。

### 3.3 畸变参数求解

为了正确求解畸变参数, 设每个畸变直线点畸变纠正后的残差为  $\epsilon_n$ , 则由公式(3)可定义误差方程

$$\epsilon_n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_{u,n} \\ y_{u,n} \end{bmatrix} - d_0 \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N (\epsilon_n)^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

误差方程实际上是关于  $k_1, k_2$  和畸变直线  $L_m$  上畸变点  $p_{d,n}$  的非线性函数。当满足式(9)的条件时, 即可求解最优的畸变参数  $k_1, k_2$ 。假设每条畸变直线选取  $N$  个离散点  $p_{d,n}$ , 则根据式(8)可建立  $N$  个误差方程, 也就是说将畸变参数的最优化估计转化为一个非线性最小二乘的问题。基于 Levenberg-Marquardt 算法的优化是目前应用较为广泛的一种无条件约束优化方法, 是专门用于误差平方和最小化的方法, 具有高斯-牛顿法的局部快速收敛特性, 并克服了牛顿法不能有效地处理奇异和非正定矩阵及对初始点要求比较苛刻的缺点。因此, 本文采用 LM 算法求解上述非线性误差方程组。由于 LM 算

法是迭代求解的过程, 因此可在第一次迭代求解时令  $k_1, k_2$  的初值为 0。

如果要对提取出的  $M$  条畸变直线同时求解, 则定义误差方程为

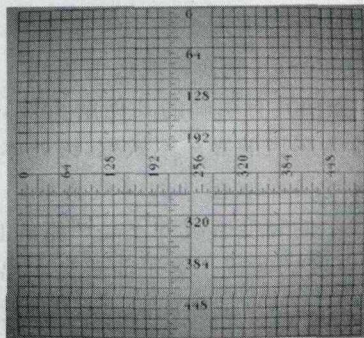
$$\sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^N (\epsilon_n)^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

根据式(8)共建立  $M \times N$  个误差方程, 并通过 Levenberg-Marquardt 算法求解出上述非线性方程组的最优解, 即畸变参数  $k_1, k_2$ 。

## 4 实验结果与分析

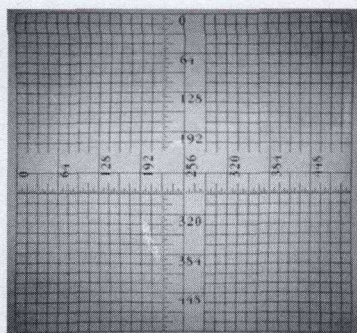
实验采用佳能公司生产的普通家用型数码相机 PowerShot A710 IS, 拍摄图像大小为  $2048 \times 1536$  像素, 焦距为 5.8mm。为了验证该方法的几何精度, 使用坐标格网尺在硬板上每隔 16mm 绘一条格网线, 形成如图 2(a)所示的格网图形。将相机近似垂直于格网图形进行拍摄, 并尽量使摄影光线中心经过格网图形中心。

将 Canny 边缘检测图进行 Hough 变换, 保留主要的畸变直线, 并将同一方向的间断畸变直线进行连接, 提取出 30 横 30 纵共 60 条畸变直线; 每条畸变直线格网间隔采集 30 个离散畸变点, 这样由式(2)与式(8)共建立  $60 \times 30 = 1800$  个误差方程。采用 LM 算法求解此非线性方程组, 最终得到最优化的畸变参数  $k_1 = 1.92 \times 10^{-7}, k_2 = -4.10 \times 10^{-13}$ 。利用解出的畸变参数, 对原始图像使用式(1)进行畸变纠正, 得到图 2(b)所示的畸变纠正图像。将畸变纠正前后的影像作比较, 即可求出每个格网交叉点的实际畸变偏移量, 并采用图 2(c)表示的平面图形式与图 2(d)表示的立体图形式来表达。由图 2 可知, 在像片的不同位置标定的精度不均匀, 离像片中心距离越近, 畸变越小, 反之则畸变越大, 呈典型的桶形变形。在所有的格网点中, 最大偏移误差为 19.1 像素, 位于像片边角处; 最小偏移误差为 0.2 像素, 基本位于像片中央。

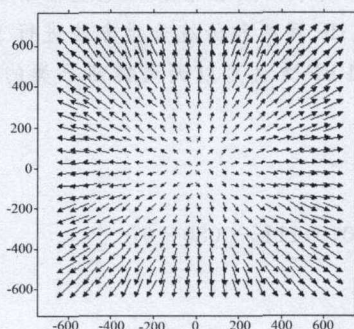


(a) 原始图像

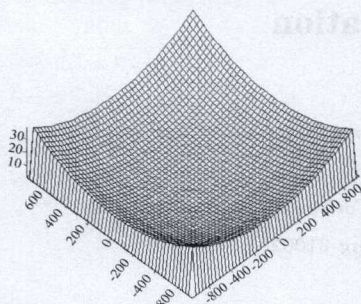




(b) 畸变纠正图像



(c) 畸变偏移量平面图



(d) 畸变偏移量立体图

图2 控制格网图像实验

最后用真实影像作实验,实验结果见图3。其中图3(a)为拍摄的原始影像,由于畸变的原因,书

柜的边缘直线大多呈曲线状;图3(b)是使用改进Canny边缘检测算子提取的边缘二值图;将同一方向的不连续畸变直线进行连接,提取出如图3(c)所示的三横六纵共9条主要畸变直线;利用畸变直线建立误差方程解出畸变参数,并对原始图像进行畸变纠正,得到图3(d)所示的畸变纠正图像。

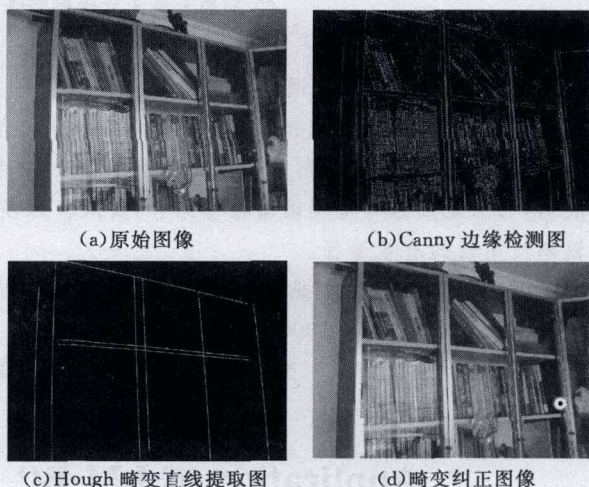


图3 真实图像实验

## 5 结束语

本文利用物方空间的三维直线在像片上的理想投影也应是一条直线这一直线约束条件,对非量测数码相机进行直接标定。从图像中提取出畸变直线点,利用相机畸变模型对其进行畸变纠正,并在满足直线约束条件下用 Levenberg-Marquardt 算法解出畸变参数  $k_1$  与  $k_2$ 。该方法利用单张图像上物体的直线信息直接求解畸变参数,不需要外部的控制点信息,也不需要解出相机内外方位元素。实验结果证明该方法的可行性。该方法在精度要求不高的建筑物三维建模与建筑物表面纹理处理方面有着广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 张永军,张祖勋,张剑清. 利用二维 DLT 及光束法平差进行数字摄像机标定[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2002,27(6):566—571.
- [2] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965—980.
- [3] 靳志光,卫建东,张冠宇,蒲亭汀. 基于 LCD 的相机标定新方法[J]. 遥感信息,2008(1):87—90.
- [4] Sawhney H S, Kumar R. True multi-image alignment and its application to mosaicing and lens distortion correction [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(3): 235—243.
- [5] Heuvel F A. Estimation of interior orientation parameters from constraints on line measurements in a single image[C]// International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 1999, 32(5W11): 81—88.
- [6] Devernay F, Faugeras O. Straight lines have to be straight [J]. Machine Vision and Applications, 2001(13): 14—24.
- [7] 刘松林,韦华. 基于基本矩阵的相机畸变差校正方法研究[J]. 遥感信息,2009(3):7—10.
- [8] 杨朝辉,陈鹰. 基于 ROC 分析的 Canny 算法在景象匹配中的应用[J]. 计算机应用,2009,29(4):1193—1196.
- [9] Thormaehlen T, Broszio H, Wassermann I. Robust line-based calibration of lens distortion from a single view[C]//Proc of Mirage, Rocquencourt. 2003:105—112.