

一种线阵相机镜头畸变的标定方法

方素平, 夏晓华, 肖燕, 郭瑞

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为实现线阵相机中镜头畸变的精确标定, 提出了一种新的标定模型, 并在实际应用中对标定模型进行了简化。根据等间距共线特征点的成像特性, 通过比较两种畸变算法的差异, 用非线性优化方法实现了镜头畸变参数的标定。实验结果表明, 简化模型的标定结果与标准模型的标定结果相一致, 标定后相邻特征点之间的距离变得更为均匀, 校正后图像的最大形变量不高于 0.5 像素, 校正精度不低于 $9\ \mu\text{m}$, 与传统的标定方法相比, 该标定方法具有较好的稳定性。

关键词: 镜头畸变; 线阵相机; 非线性优化

中图分类号: TP206 **文献标志码:** A **文章编号:** 0243-987X(2013)01-0011-04

Lens Distortion Calibration Method for Linear Array Cameras

FANG Suping, XIA Xiaohua, XIAO Yan, GUO Rui

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To accurately calibrate the lens distortion in linear array cameras, a simplified distortion model for the actual application is proposed, and a new corresponding calibration method is suggested to guarantee the stability of calibration results. The imaging characteristic of equidistant collinear feature points is used to calculate the distortion and nonlinear optimization is used to calibrate the distortion parameters. The experiments show that the calibration results of the simplified model are consistent with ones of the normal model. In the calibrated image, the distribution of feature points gets uniform, the maximum distortion is not more than 0.5 pixels and the correction accuracy is not lower than $9\ \mu\text{m}$. Compared with the traditional calibrations, the newly introduced method has better robustness.

Keywords: lens distortion; linear array camera; nonlinear optimization

线阵相机以其分辨率高、测量精度好、抗干扰性强^[1-2]等优势, 在无接触实时测量系统、文物高清数字化领域中获得了广泛应用。在实际应用中, 镜头畸变的存在使得图像采集系统的成像质量下降, 图像的几何精度变差, 测量系统的误差增加。因此, 为了提高测量系统的测量精度、改善线阵相机成像的质量, 需要对相机的镜头畸变进行标定和补偿。

尽管线阵 CCD 可视为面阵 CCD 的一个特例^[3], 但其标定方法却比面阵 CCD 复杂^[4], 两者对同一景物获取的图像也有本质上的区别。线阵 CCD

图像在同一列像素的畸变量相同, 但面阵 CCD 图像在同一列像素的畸变量却不同。对于具有 n 行像素的图像, 线阵 CCD 图像中有 n 个主点, 而面阵 CCD 图像却只有唯一主点, 因此传统面阵相机镜头畸变的标定方法并不适用于线阵相机。目前, 线阵相机镜头畸变的标定多采用多项式拟合法^[5]、精密测角法^[6]等方法, 但线阵相机的畸变模型缺乏客观的物理依据, 面阵相机由于内参数与外参数之间的耦合关系, 有时会出现错误的结果^[7-8]。针对上述问题, 本文根据线阵相机镜头畸变的特点, 导出了适用于

收稿日期: 2012-06-17。 作者简介: 方素平(1962—), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 西安交通大学与日本京都大学合作项目。

网络出版时间: 2012-10-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121029.1701.007.html>

线阵相机的镜头畸变模型,提出了一种新的标定方法,并通过实验进行了验证。

1 畸变模型的推导

由于线阵 CCD 可视为面阵 CCD 的一个特例^[3],因此可以从面阵相机的镜头畸变模型出发,推导适用于线阵相机的镜头畸变模型。

面阵相机的镜头畸变由镜头的径向曲率缺陷引起的径向畸变、光心不共线引起的离心畸变,以及由相机装配问题引起的薄棱镜畸变组成,在 x 、 y 方向的畸变分量为^[7,9]

$$\left. \begin{aligned} \delta_x(x, y) &= k_1 x(x^2 + y^2) + p_1(3x^2 + y^2) + \\ &\quad 2p_2 xy + s_1(x^2 + y^2) + O[(x, y)^4] \\ \delta_y(x, y) &= k_1 y(x^2 + y^2) + p_2(3y^2 + x^2) + \\ &\quad 2p_1 xy + s_2(x^2 + y^2) + O[(x, y)^4] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x 、 y 分别为成像平面坐标系下的横纵坐标; δ_x 、 δ_y 分别为镜头畸变在 x 、 y 方向的分量; k_1 为径向畸变系数; p_1 、 p_2 为离心畸变系数; s_1 、 s_2 为薄棱镜畸变系数; $O[(x, y)^4]$ 为镜头畸变的高阶小量。

对于线阵相机,式(1)中的 y 值是固定不变的,记为 y_0 ,其物理意义为主点到线阵 CCD 的距离,略去高阶小量,可得

$$\left. \begin{aligned} \delta_x(x) &= (p_1 y_0^2 + s_1 y_0^2) + (k_1 y_0^2 + 2p_2 y_0)x + \\ &\quad (3p_1 + s_1)x^2 + k_1 x^3 \\ \delta_y(x) &= (k_1 y_0^3 + 3p_2 y_0^2 + s_2 y_0^2) + 2p_1 y_0 x + \\ &\quad (k_1 y_0 + p_2 + s_2)x^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中常数项与一次项的作用分别是对图像的平移与放缩,对图像的畸变无影响,因此线阵相机的镜头畸变标准模型为

$$\left. \begin{aligned} \delta_x(x) &= ax^2 + bx^3 \\ \delta_y(x) &= cx^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$a = 3p_1 + s_1; b = k_1; c = k_1 y_0 + p_2 + s_2$$

式中: a 、 b 、 c 为待标定的畸变系数。在实际应用中,离心畸变与薄棱镜畸变对镜头畸变的贡献量较小,可以忽略^[10]。由于主点到线阵 CCD 的距离也较小,因此模型可简化为

$$\left. \begin{aligned} \delta_x(x) &= bx^3 \\ \delta_y(x) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在后续的标定方法中,不失一般性,采用式(3)作为标定模型。

2 标定原理及方法

选取一块具有等间距共线特征点的标定板(如棋盘格标定板),用线阵扫描相机获取标定板的正对图像,并获取特征点的像素坐标。根据针孔成像模型,图像中的特征点也是等间距共线的。

根据线阵相机的镜头畸变模型,横向畸变量可表示为

$$\delta_x(u) = a(u - u_0)^2 + b(u - u_0)^3 \quad (5)$$

式中: u 为像素横坐标; u_0 为畸变中心的像素横坐标。由于标定前畸变中心 o 的坐标未知,以图像中间位置附近某特征点 o' 为参考点,则横向相对畸变量可表示为

$$\delta'_x(u) = a(u - u_0)^2 + b(u - u_0)^3 - a(u_{o'} - u_0)^2 - b(u_{o'} - u_0)^3 \quad (6)$$

式中: $u_{o'}$ 为点 o' 的像素横坐标。

若已知在针孔模型下相邻特征点之间的横向像素距离 d_u ,则横向相对畸变量亦可表示为

$$\delta''_x(u) = u - (u_{o'} + nd_u) \quad (7)$$

式中: n 为以 o' 为参考点沿 u 轴正方向的第 n 个特征点。定义函数

$$F_x(a, b, d_u, u_0) = \left[\frac{\sum [\delta'_x(u) - \delta''_x(u)]^2}{N - 1} \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中: N 为共线特征点的个数。将镜头横向畸变标定问题转化为式(8)的非线性优化问题,则

$$F_x(a^*, b^*, d_u^*, u_0^*) = \min F_x(a, b, d_u, u_0) \quad (9)$$

式(9)可通过以下步骤进行求解。

步骤1 u_0 、 d_u 的初始化。由于畸变中心在图像的中心附近且该处的畸变量较小,因此 u_0 、 d_u 的初始值可分别取为图像中心的像素横坐标和该处相邻特征点之间的距离。

步骤2 a 、 b 的初始化。根据步骤1确定的参数值及式(7)计算相对畸变量,用3次多项式拟合该畸变数据,将拟合结果的2次项系数和3次项系数分别作为 a 、 b 的初始值。

步骤3 优化结果的计算。根据上述初始化参数,用 Powell 法寻找式(9)的最优解。

同理,对于纵向镜头畸变,其相对畸变量可表示为

$$\delta'_y(v) = c(v - v_0)^2 - c(v_{o'} - v_0)^2 \quad (10)$$

$$\delta''_y(v) = v - (v_{o'} + nd_v) \quad (11)$$

式中: v 为像素纵坐标; $v_{o'}$ 为参考点 o' 的像素纵坐标; d_v 为相邻特征点之间的纵向像素距离。

定义函数

$$F_y(c,d_v)=\left[\frac{\sum[\delta_y''(u)-\delta_y'(u)]^2}{N-1}\right]^{1/2}\tag{12}$$

将镜头纵向畸变标定问题转化为式(12)的非线性优化问题,则

$$F_y(c^*,d_v^*)=\min F_y(c,d_v)\tag{13}$$

式(13)的求解方法与式(9)的求解方法类似。

3 实验验证与结果分析

为验证本文提出的标定模型与标定方法,采用日本 NED 的 NUCLi7300 线阵相机、罗顿斯德的 Grandagon-N 镜头作为实验对象。线阵相机的分辨率为 $7\,300\times 3$ 像素,像元尺寸为 $10\,\mu\text{m}\times 10\,\mu\text{m}$,镜头的焦距为 90 mm。标定板的规格为 $300\,\text{mm}\times 300\,\text{mm}$,样式为棋盘格,精度为 $2\,\mu\text{m}$,相邻角点之间的距离为 10 mm。

实验中随机选取了标定板的三幅线阵扫描图像,分别如图 1~图 3 所示。采用亚像素角点提取算法提取白色直线上的角点,并通过本文提出的方法对镜头畸变进行标定,标准模型的标定结果如表 1 所示。为验证简化模型的合理性,对线阵相机镜头畸变的简化模型进行了标定,结果如表 2 所示。为了便于比较,实验又采用了目前广泛使用^[7]的基于直线仍然为直线的标定方法^[8]对畸变进行了标定,结果如表 3 所示。为验证标定结果的准确性,实验比较了标定前后相邻特征点之间距离的方差,结果如表 4 所示。

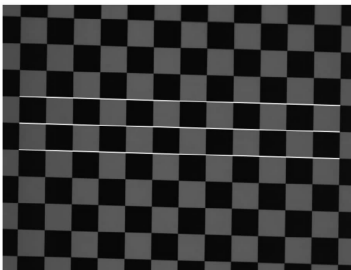


图 1 标定板的实验图像 1

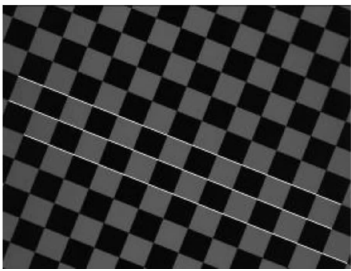


图 2 标定板的实验图像 2

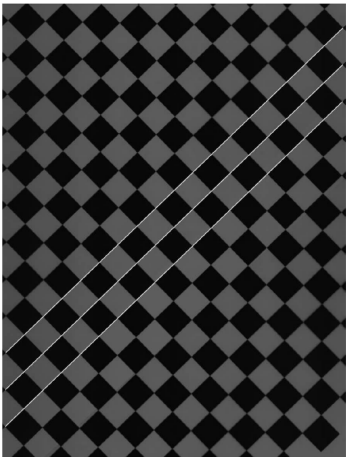


图 3 标定板的实验图像 3

表 1 标准模型的标定结果

参数	图像 1	图像 2	图像 3
<i>a</i>	9.359×10^{-10}	0.487×10^{-10}	0.800×10^{-10}
<i>b</i>	1.510×10^{-10}	1.594×10^{-10}	1.463×10^{-10}
<i>d_u</i>	557.60	519.86	397.09
<i>u₀</i>	3 700	3 650	3 722
<i>F_x</i>	0.158 3	0.177 8	0.170 4
<i>c</i>	-2.71×10^{-8}	-3.74×10^{-8}	10.42×10^{-8}
<i>d_v</i>	15.34	207.49	382.18
<i>F_y</i>	0.235 8	0.605 1	0.652 7

表 2 简化模型的标定结果

参数	图像 1	图像 2	图像 3
<i>b</i>	1.510×10^{-10}	1.594×10^{-10}	1.463×10^{-10}
<i>d_u</i>	557.60	519.86	397.09
<i>u₀</i>	3 698	3 650	3 722
<i>F_x</i>	0.158 3	0.177 8	0.170 4

表 3 传统方法的标定结果

参数	图像 1	图像 2	图像 3
<i>a</i>	7.45×10^{-9}	-2.30×10^{-6}	9.01×10^{-9}
<i>b</i>	1.793×10^{-10}	6.11×10^{-11}	1.160×10^{-10}
<i>c</i>	-1.63×10^{-9}	-9.39×10^{-7}	-7.96×10^{-9}
<i>u₀</i>	2 101	2 590	3 746

表 4 标定前后相邻特征点距离的方差比较

状态	方差		
	图像 1	图像 2	图像 3
标定前	0.738 8	0.742 2	0.437 6
标定后	0.018 0	0.029 3	0.021 7

由表1可以看出,畸变系数 b 的标定结果比较稳定,畸变系数 a 、 c 的标定结果不稳定,原因是 a 、 c 对镜头畸变的贡献值较小,因此可以忽略。标定板的精度决定了 a 、 c 引起的畸变量最大值(图像两侧的畸变量)在一个像素附近波动。对比表1、表2可知,标准模型与简化模型的标定结果基本一致,尤其是与参数 b 的标定结果完全吻合。考虑到 a 、 c 对标定结果不产生实质性的影响,因此在实际应用中,可采用简化模型对镜头畸变进行标定。

由表3可以看出,由于实验中待标定的镜头畸变量较小,直线仍然为直线的传统标定方法的标定结果不稳定,而本文提出的方法则在该方面表现出了较好的特性。由表4可以看出,标定后相邻特征点之间的距离变得更为均匀,校正后图像的最大形变量不高于0.5像素,校正精度不低于 $9\mu\text{m}$ 。

4 结 论

本文根据线阵相机的特点提出了线阵相机的镜头畸变模型,该模型包含了径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变,并根据实际需要对模型进行了简化。实验结果表明,简化模型可以保证标定的精度要求。除此之外,本文根据畸变模型提供了一种新的标定方法,经该方法校正后的图像相邻特征点之间的距离变得更为均匀,图像的最大形变量不高于0.5像素,校正精度不低于 $9\mu\text{m}$,与传统的标定方法相比,本文的标定方法具有较好的稳定性。

参考文献:

- [1] 吴国栋,韩冰,和煦.精密测角法的线阵CCD相机几何参数实验室标定方法[J].光学精密工程,2007,15(10):1628-1632.
- WU Guodong, HAN Bing, HE Xu. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1628-1632.
- [2] 孙航,耿爱辉,张海波,等.基于线阵CCD的精密测角系统[J].嵌入式系统应用,2009,29:61-62.

SUN Hang, GENG Aihui, ZHANG Haibo, et al. Precision angle-measuring system based on linear CCD [J]. Control & Automation, 2009, 29: 61-62.

- [3] HORAUD R, MOHR R, LORECKI B. Linear-camera calibration [C]// Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1992: 1539-1544.
- [4] 斯蒂格,尤里奇,威德曼.机器视觉算法与应用:双语版[M].杨少荣,译.北京:清华大学出版社,2008:261-267.
- [5] 黄品松,徐杜,蒋永平,等.零件尺寸图像检测数据处理与高精度检测方法[J].计算机系统应用,2011,20(9):248-251.
- HUANG Pinsong, XU Du, JIANG Yongping, et al. Methods of data processing and high accurate detection for image detection of part sizes [J]. Computer Systems & Applications, 2011, 20(9): 248-251.
- [6] 刘波,贾继强,丁亚林.基于测角法的CCD航测相机实验室几何标定[J].激光与红外,2010,40(3):298-301.
- LIU Bo, JIA Jiqiang, DING Yalin. Geometric calibration with angle measure for CCD aerial photogrammetric camera in laboratory [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(3): 298-301.
- [7] WANG Jianhua, SHI Fanhuai, ZHANG Jing, et al. A new calibration model of camera lens distortion [J]. Pattern Recognition, 2007, 41: 607-615.
- [8] DEVERNAY F, FAUGERAS O. Straight lines have to be straight [J]. Machine Vision and Applications, 2001, 13: 14-24.
- [9] 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.
- [10] AHMED M, FARAG A. Nonmetric calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(8): 1215-1230.

(编辑 管咏梅)