

基于直线特征的摄像机镜头畸变标定方法

张 敏^{1,2} 金龙旭¹ 李国宁¹ 武奕楠¹ 韩双丽¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在多视域广角成像系统中,为了保证后续图像拼接的质量,必须对从广角镜头所获得的畸变图像进行校正。利用图像中直线特征的畸变标定方法,并且提出一种带权重因子的弯曲测度指标函数,离图像中心不同距离的曲线给予不同的权重值,作为求解最终畸变参数的目标函数。在最小化目标函数过程中,求解出最优畸变系数。并基于工程实例,分别利用传统基于直线特征的畸变校正方法与本文方法对目标图像进行畸变校正。实验结果表明,本文方法仅仅利用单幅图像就能获得高精度的畸变标定,在噪声水平小于2 pixel时,对应坐标的均方根误差能控制在0.3 pixel以内。同时该方法操作简单、方便、易于实现。

关键词 机器视觉; 畸变标定; 直线特征; 径向畸变; 视场角

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0615001

Camera Distortion Calibration Method Based on Straight Line Characteristics

Zhang Min^{1,2} Jin Longxu¹ Li Guoning¹ Wu Yinan¹ Han Shuangli¹

¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract In the multi-view and wide-angle imaging system, in order to guarantee the quality of subsequent image mosaic, the distorted image obtained from the wide-angle camera must correct. The linear characteristics in the image is utilized to correct the distortion and a bending measurement function is put forward with weight factor that gives each curve line the different weight values in accordance with the distance from the image center as the object function for obtaining the final distortion coefficients. The optimal distortion coefficients is obtained by minimizing the objective function. And based on the engineering examples, are used respectively the traditional distortion correction method based on linear characteristics and the proposed method to correct the target distort image. Experimental results show that the proposed method can only use single image to obtain high accuracy distortion calibration coefficient, under the condition that the noise level is less than 2 pixel, the root mean square error of the corresponding coordinates within 0.3 pixel. At the same time, the proposed method is simple, convenient and easy to implement.

Key words machine vision; distortion correction; linear characteristic; radial distortion; field angle

OCIS codes 150.1488; 100.2000; 150.1135; 040.1490

1 引 言

在多视域广角成像系统中,为了获得全景图像,需对从不同方位广角相机所获得的图像进行拼接。在实际应用中,广角镜头所获得的图像,其边缘部分 往往会发生严重的非线性光学畸变。为了保证图像的拼

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2015-01-06

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20126016)

作者简介: 张 敏(1990—),女,博士研究生,主要从事光电成像与图像处理方面的研究。E-mail: ciompzhangmin@163.com

导师简介: 金龙旭(1965—),男,博士,研究员,主要从事空间相机智能控制系统方面的研究。E-mail: Jinlx@ciomp.ac.cn

接质量,必须对从广角相机所获得的畸变图像进行校正,而校正精度将直接影响后续图像拼接的质量与精度。所以对广角相机所获得的畸变图像进行校正显得尤为重要^[1]。

目前图像畸变校正方法有两种:

1) 通过对摄像机进行标定,将畸变参数与摄像机内外参数一并进行求解。在摄像机标定过程中获得畸变参数,其目前比较成熟。摄像机标定技术分为传统摄像机标定法^[2-4]和摄像机自标定法^[5-6]。传统摄像机标定法将图像畸变参数的求解与摄像机的内外参数的求解混合在一起,并且需要高精度的标定靶标。可用于任意的摄像机模型,标定精度高,但其标定过程极其复杂。这种方法在已知靶标情况下,需要在畸变前后的图像中找到对应的控制点对,控制点对的提取直接影响后续畸变校正的精度^[7-10]。其典型算法有 Tsai^[11]的两步法以及 Zhang 等^[12]的基于平面靶标的标定方法。摄像机自标定法而在获取畸变参数的过程中不需要标定物,仅利用摄像机拍摄的多幅图像同名点的对应关系来标定相机参数。该方法灵活性较强,但对初值和噪声都很敏感,未知参数较多,稳健性不足。

2) 摄像机的非量测畸变校正方法,不需要高精度的标定模板,并且将畸变参数的求解与摄像机的内外参数的标定过程相分离。该方法充分地利用了投影几何不变性或者不变量。在这些不变量中,直线段对成像畸变具有很好的度量能力,因此得到了广泛应用^[13-15]。Moumen 和 Devernay 提出了利用直线特征的畸变校正方法,将图中曲线上各点映射到对应的直线上,求解出最优畸变系数^[16-17]。陈天飞等^[18]利用单参数除式畸变模型校正镜头畸变,通过 Levenberg-Marguardt 非线性优化算法对提取的特征曲线进行圆弧拟合,标定出畸变系数及畸变中心。张靖等^[19]利用直线段畸变而成的曲线,连接每条曲线的两个端点形成闭合曲线,把曲线面积的平方和作为畸变度量,并且用遗传算法进行寻优,但算法极其复杂。

本文基于一种直线特征的非线性畸变校正方法,并且在此基础上提出了一种带权重因子的弯曲测度指标函数。随着像素离图像中心越来越远,畸变会随之增大,靠近图像中心的直线弯曲程度小,远离图像中心的直线弯曲程度大。在构造弯曲测度指标函数时,给予离图像中心不同距离的直线不同的权重值,作为求取最终畸变参数的目标函数,提高了畸变校正精度。

2 摄像机的成像模型

2.1 线性针孔模型

如图 1 所示,摄像机系统的成像模型可由四个坐标系表示,分别为世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 、摄像机坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) 、图像物理坐标系 (x, y) 、图像像素坐标系 (u, v) 。世界坐标系与摄像机坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{T} 为平移矩阵。

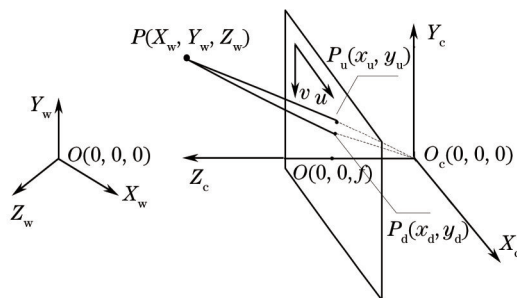


图 1 摄像机成像模型

Fig.1 Imaging model of camera

考虑没有畸变的理想成像模型情况,即针孔成像模型,世界坐标系中的一点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 通过理想的光学镜头成像在图像坐标系的 $P_u(x_u, y_u)$ 处,点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在摄像机坐标系中的坐标为 $P(X_c, Y_c, Z_c)$, f 为摄像机的有效焦距,则有

$$\begin{cases} x_u = f \frac{X_c}{Z_c} \\ y_u = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 镜头畸变模型

在实际的摄像机成像过程中,由于存在镜头畸变,成像过程并不满足针孔模型,使得实际像点位置 $P_d(x_d, y_d)$ 偏离理想像点位置 $P_u(x_u, y_u)$ 。光学镜头的几何畸变可分为径向畸变、偏心畸变,薄棱镜畸变。径向畸变是由光学镜头径向曲率变化引起的,离光学中心越远,图像点沿径向移动的变形量越大。由于存在装配误差,光学镜片的光轴不会完全共线,从而产生了偏心畸变。薄棱镜畸变是由镜头设计及生产和电荷耦合器件(CCD)感光元件阵列制造误差引起的图像变形。通常情况下,径向畸变比其他两种畸变大得多,这里只讨论以径向畸变为主的非线性几何畸变模型,忽略偏心畸变与薄棱镜畸变。在只考虑径向畸变时,采用 Brown 提出的多项式畸变校正模型^[20],只保留径向畸变项,可表示为

$$x_u = x_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 + \dots), \quad (3)$$

$$y_u = y_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6 + \dots). \quad (4)$$

假设畸变中心在图像的中心, $P_u(x_u, y_u)$ 为无畸变点, $P_d(x_d, y_d)$ 为有畸变点,其中 $r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$, $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$ 。

由像差理论可知,高阶畸变系数对畸变量的影响相对于低阶畸变系数要小很多,因此通常忽略高阶部分。畸变系数选取过多会导致计算量过大,而且计算精度也无明显改进,因此,畸变模型中只考虑前两项径向畸变系数,(3)式和(4)式可简化为

$$x_u = x_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4), \quad (5)$$

$$y_u = y_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4). \quad (6)$$

3 畸变校正原理及流程

3.1 畸变校正原理

在理想的摄像机成像模型中,三维空间的直线投影到二维图像平面上仍然是直线。而实际投影过程中,由于存在镜头径向畸变,三维空间的直线投影到二维空间中变成了曲线。因此,必须寻找畸变校正函数使得曲线上的点都映射到直线上。从相机的一个视角出发获得单幅图像,利用边缘处理技术提取图像中的曲线,在使得曲线上的点逼近到直线上的过程中获得畸变校正系数。为了获得准确的畸变校正系数,必须把在三维空间中原来就是曲线,投影到图像平面仍然是曲线的一些离群值剔除。

3.2 畸变校正流程

3.2.1 利用边缘处理技术提取图像中的曲线

利用 Canny 边缘检测算子提取图像的边缘信息^[21]。经过 Canny 边缘检测算子所获得的边缘,可能会出现边缘断裂、边缘闭合、短边缘的情况。由于短边缘所包含的信息量较少,所以把边缘长度小于 50 pixel 的曲线予以剔除。接下来对边缘断裂处的像素进行链接处理。对曲线上的每一个点寻找其 8 邻域像素点,选取水平、垂直和 4 个对角的方向算子为

$$r = [1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1], \quad (7)$$

$$c = [0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1]. \quad (8)$$

利用(7)式和(8)式对提取的边缘线段进行粗略的链接。计算出每一条线段的方向,任意选取一条线段和其它的线段作比较,若两条线段之间的夹角小于阈值 θ ,同时两条线段端点之间的距离小于阈值 R ,则可以对这两条线段进行链接,如图 2 所示。

L_2 和 L_3 与 L_1 之间的夹角小于给定的阈值 θ ,但是 L_3 与 L_1 端点之间的距离 ρ_2 大于给定的阈值 R 。而 L_4 与 L_1 之间的夹角 α_3 大于 θ 。因此 L_1 与 L_2 之间可以进行有效的链接。在图像中已经提取出 M 个长曲线 $L_m (m = 1, 2, \dots, M)$,每一条曲线上都有 N_m 个畸变点 $P_{d,n}(x_{d,n}, y_{d,n})$ 。

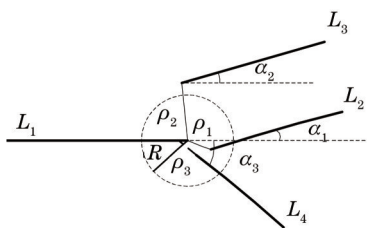


图2 边缘线段连接示意图

Fig.2 Linkage schematic diagram of edge segment

3.2.2 离群值的剔除

为了准确的校正图像畸变,需要在图像中寻找最可能是空间直线形成的投影曲线,在物空间原来是曲线的线段应该予以剔除。采用RANSAC算法剔除离群值。在提取的一系列 L_m 曲线中随机选择一条,利用该曲线求取畸变校正系数。基于理想情况下,通过畸变校正函数:

$$x_{u,n} = x_{d,n}(1 + k_1 r_{d,n}^2 + k_2 r_{d,n}^4), \quad (9)$$

$$y_{u,n} = y_{d,n}(1 + k_1 r_{d,n}^2 + k_2 r_{d,n}^4), \quad (10)$$

将曲线上的所有畸变点 $P_{d,n}(x_{d,n}, y_{d,n})$ 都映射到无畸变点 $P_{u,n}(x_{u,n}, y_{u,n})$ 。并且所有的无畸变点 $P_{u,n}(x_{u,n}, y_{u,n})$ 都应该位于一条直线上。因此利用无畸变点 $P_{u,n}(x_{u,n}, y_{u,n})$ 拟合出一条与之相关的直线 $l_m: y = ax + b$ 。

定义目标函数为

$$R = \sum_{n=1}^N (y_{u,n} - ax_{u,n} - b)^2, \quad (11)$$

式中 $n = 1, 2, 3 \dots m$ 。

根据最小二乘原理应使上述目标函数最小,故有:

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial a} = -2 \sum_{n=1}^N (y_{u,n} - ax_{u,n} - b)x_{u,n} \\ \frac{\partial R}{\partial b} = -2 \sum_{n=1}^N (y_{u,n} - ax_{u,n} - b) \end{cases} \quad (12)$$

可求解拟合系数 a 、 b 为

$$a = \frac{N \sum_{n=1}^N x_{u,n} - \left(\sum_{n=1}^N x_{u,n} \right) \left(\sum_{n=1}^N y_{u,n} \right)}{N \sum_{n=1}^N x_{u,n}^2 - \left(\sum_{n=1}^N x_{u,n} \right)^2}, \quad (13)$$

$$b = \frac{\left(\sum_{n=1}^N x_{u,n}^2 \right) \left(\sum_{n=1}^N y_{u,n} \right) - \left(\sum_{n=1}^N x_{u,n} \right) \left(\sum_{n=1}^N x_{u,n} y_{u,n} \right)}{N \sum_{n=1}^N x_{u,n}^2 - \left(\sum_{n=1}^N x_{u,n} \right)^2}. \quad (14)$$

拟合直线 l_m 是关于 k_1, k_2 以及畸变点 $P_d(x_d, y_d)$ 的函数。将直线 l_m 表示成法线式方程:

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha - d_0 = 0, \quad (15)$$

式中 $\cos \alpha = \frac{-a}{\sqrt{a^2 + 1}}$, $\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}}$, $d_0 = \frac{b}{\sqrt{a^2 + 1}}$ 。

通常情况下,基于理想的 k_1, k_2 值,所有的 N_m 个无畸变点应全部位于直线 l_m 上。但实际情况下,由于 k_1, k_2 值估计的不准确,无畸变点和其相关拟合直线之间具有一定的偏差如图3所示。距离偏差定义为

$$e_n = x_{u,n} \cos \alpha + y_{u,n} \sin \alpha - d_0. \quad (16)$$

构造目标函数,定义为

$$e = \sum_{n=1}^N (e_n)^2 = \left(x_{u,n} \cos \alpha + y_{u,n} \sin \alpha - d_0 \right)^2, \quad (17)$$

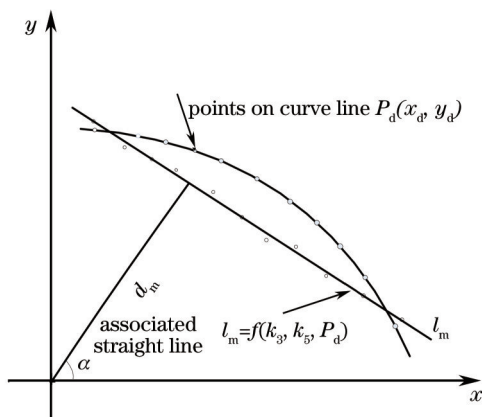


图3 曲线拟合到直线的过程

Fig.3 Process of curve line fitting to the straight line

通过 Levenberg-Marguardt^[22]优化算法,在最小化目标函数 e 的过程中,求解出畸变系数 k_1, k_2 。

用此求解得到的 k_1, k_2 畸变参数计算其余曲线上无畸变点到其相关拟合直线的距离偏差 e_n ,该偏差可由(16)式求得。若其余曲线上有超过 40% 的无畸变点到其拟合直线的偏差大于给定的 e_m ,那么这条曲线被认定为离群曲线。如果此 k_1, k_2 值产生过多的离群曲线,那么这条随机选择的曲线被定义为离群曲线,予以舍弃。随机的选取下一条新曲线,再重新估计 k_1, k_2 直到求得符合要求的 k_1, k_2 。具有理想 k_1, k_2 值的曲线 $L_i(i=1, \dots, I)$,用来做最终的畸变系数的估计。

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{N_n} e_n \rightarrow \min. \quad (18)$$

3.2.3 构造弯曲测度函数及优化估计算法

根据相机镜头的成像规律,镜头畸变会随着视场的增加而变大,靠近图像中心的直线弯曲程度小,远离图像中心的直线弯曲程度大。本文算法利用了权重值 t_m ,该权重值取决于曲线 L_m 到图像中心的距离。靠近图像中心的曲线权重小,远离图像中心的曲线权重比较大。选取阈值权重为

$$t_m = \frac{2d_m}{\sqrt{w^2 + h^2}}, \quad (19)$$

式中 w 为图像的宽度, h 为图像的高度, d_m 为图像中心到所拟合直线 l_m 的垂直距离。依据曲线到图像中心不同的距离,设置不同的权重。利用 3.2.2 节中通过离群值剔除算法得到的 N 条理想曲线段,对权重值进行归一化处理:

$$t'_1 = \frac{t_1}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N}, \quad t'_2 = \frac{t_2}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N}, \quad \dots \quad t'_N = \frac{t_N}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_N},$$

构造弯曲测度指标函数进行寻优:

$$e_{\text{final}} = \min\left\{\sum_{i=1}^N F(k_1, k_2)\right\} = \min\left\{\sum_{i=1}^N (t'_1 e_1 + t'_2 e_2 + t'_3 e_3 + \dots + t'_N e_N)\right\}. \quad (20)$$

对(20)式的目标函数进行优化,即可求出最终的畸变参数。本文算法能够很好的抑制噪声,而经过距离修正后的弯曲测度函数,能够更合理的分配权重,从而优化了标定结果。畸变校正流程图如图 4 所示。

4 实验结果与分析

4.1 标准图像仿真实验与分析

4.1.1 不同噪声水平

为了验证畸变系数标定算法的可靠性,分别对标准仿真图像以及真实图像进行了一系列的实验。首先对标准图像进行仿真实验与分析,由于标准图像能够提供准确的直线位置、畸变参数与畸变中心,可以进行定量的分析。原始标准图像大小为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,如图 5(a)所示。利用单参数除式(DM)模型和已知真实的畸变参数 $\lambda_{\text{true}} = -1.0 \times 10^{-6}$ 、畸变中心 $p_{\text{true}} = (320, 240)$ 对原始标准图像进行畸变处理,得到畸变图像,如图 5(b)所示。

为了模拟提取特征曲线时存在误差的情况,在畸变图像上的每个像点位置加入均值为0、标准偏差为 σ 的高斯噪声。 σ 取值范围为0~3 pixel。在不同的噪声水平下,进行20次的随机实验,消除随机性的影响。

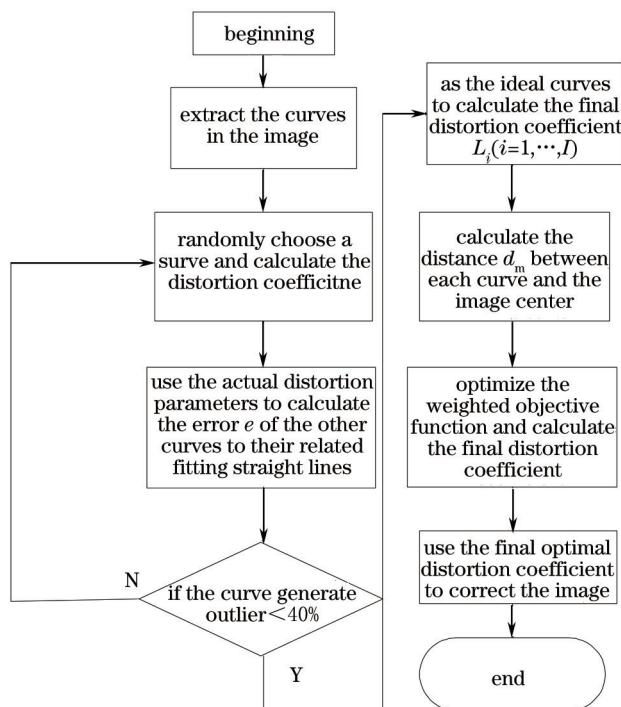


图4 畸变校正流程

Fig.4 Flow chart of distortion correction

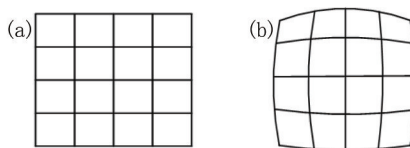


图5 标准图像与畸变图像。(a) 标准图像; (b) 畸变图像

Fig.5 Synthetic image and distorted image. (a) Synthetic image; (b) distorted image

由于原始真实的标准图像中每个像素点的位置坐标能够准确无误的求取出来,采用原始图像和校正图像对应坐标点的坐标残差的均方根(RMS)误差作为校正效果衡量标准,可表示为

$$D_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(\hat{x}_{ij} - x_{ij})^2 + (\hat{y}_{ij} - y_{ij})^2]}{m \times n}} \quad (21)$$

不同算法得到的对应坐标的RMS误差与噪声水平的关系曲线如图6所示

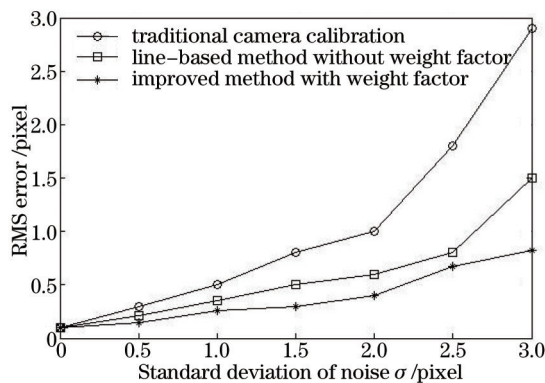


图6 RMS误差与不同噪声水平关系

Fig.6 Relationship between RMS error and various noise

从图6的仿真结果可以看出,传统的摄像机标定方法在噪声水平较小时,也能够得到很好的标定精度。但是当噪声水平超过2 pixel时,随着噪声水平的增加,RMS误差急剧增加。基于直线特征的畸变标定方法仅利用图中直线段经畸变后的成像曲线直接进行拟合求取畸变参数,无论在低噪声区,还是高噪声区,算法的稳定性和精度都有很大程度的提高。在噪声水平小于2 pixel时,标定精度达到0.5 pixel以内。而带权重因子的校正算法,使得标定精度得到进一步的提高,得到了更加准确的结果。在噪声水平小于2 pixel时,对应坐标的RMS误差能控制在0.3 pixel以内。与传统的基于直线特征的畸变标定方法相比,RMS的精度提高了0.2 pixel。仿真结果表明,本文算法是可行的,有效且具有较高的稳定性和精度。

4.1.2 不同的 λ 值

在固定噪声水平 $\sigma = 1$ pixel,畸变系数 λ 取不同值的情况下,从桶形畸变到枕形畸变,固定图像中心为 $p_{true} = (320, 240)$ 。在不同的 λ 水平下,进行20次的随机实验,消除随机性的影响。同样采用原始图像和校正图像对应坐标点的坐标残差的RMS误差作为校正效果衡量标准,得到如图7所示的仿真曲线图。

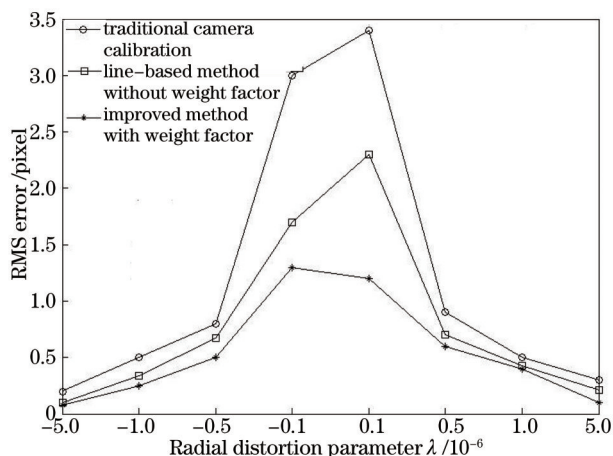


图7 RMS误差与不同 λ 之间的关系

Fig.7 Relationship between RMS error and various λ

从图7的仿真结果可以看出,本文算法对于畸变参数 λ 绝对值适中 ($\lambda = \pm 1.0 \times 10^{-6}$) 或者较大值时,具有较好的校正结果。当畸变参数绝对值变小时,原始图像和校正图像对应坐标点的RMS误差较大,算法在一定程度上会失效。当畸变较小时,特征曲线的提取受噪声影响明显,进而影响对畸变参数的估计。

4.2 实际的图像

实验中使用的摄像机型号为Nikon D7000,其像素大小为2048 pixel \times 1536 pixel。镜头采用尼克尔 AF-S DX 10~24 mm f/3.5~4.5G ED,视角范围为 $61^\circ \sim 109^\circ$ 。焦距固定为10 mm,视场角为 109° 。为了验证本文算法的校正精度与稳定性,进行了大量的实验,并且选取其中一组实际图像进行分析。

将本文方法分别与传统摄像机标定法以及基于直线特征的畸变标定方法进行对比实验。传统摄像机标定法采用由Jean-Yves Bouguet开发的Camera calibration toolbox工具箱实现摄像机的标定,进而在摄像机标定过程中求出畸变参数。该方法对一幅棋盘格模板从不同方位和不同姿态采集图像,利用该工具箱自动提取特征点。在基于直线特征的畸变标定方法中,利用边缘检测算法提取图像的边缘信息,经过边缘检测算法所获得的边缘,可能会出现边缘断裂、边缘闭合、短边缘的情况。由于短线段所包含的信息量较少,受噪声影响较大。所以把边缘长度小于50 pixel的曲线予以剔除。对实际的畸变图像进行三组实验得出标定结果如表1所示,原始图像和畸变校正后的图像如图8所示。

表1 实验标定数据

Table 1 Experimental calibration data

Method	$k_1/10^{-7}$	$k_2/10^{-12}$	Average distance /pixel
Traditional line-based method	4.9106	2.5137	0.32
Optimal algorithm with weight factor	4.4972	2.1749	0.47
Traditional camera calibration	4.4809	2.1305	0.49

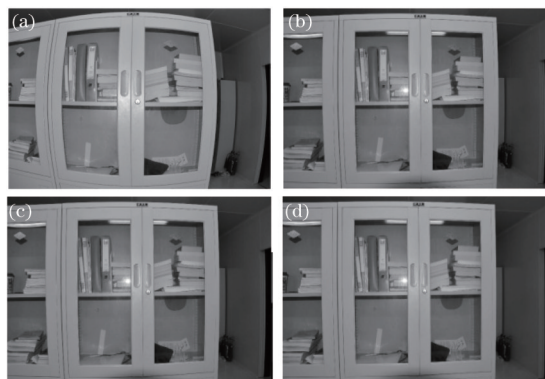


图 8 原始图像与校正后的图像。(a) 原始图像; (b) 传统摄像机标定方法; (c) 未带权重因子; (d) 带权重因子

Fig.8 Original image and after correction image. (a) Original image; (b) traditional camera calibration;

(c) correct image without weight factor; (d) correct image with weight factor

从图 8(d)中可以看出,图像的边缘已经得到了很好的恢复,已经变成了直线。图 8(b)和图 8(c)的两种方法得到的校正结果没有太大区别。为了验证实验结果的精确性,做进一步的定量分析。由于真实图像的理想位置很难获得,不能够使用类似于(21)式的评估方法。所以对于实际图像的畸变校正效果可以采用对边缘曲线的直线度进行评估。在畸变校正后的图像中,提取图像最外侧的 10 条边缘曲线,进行直线拟合。若图像无畸变,则曲线上的点到拟合直线的距离应该为零。所以可以用边缘曲线上的点到拟合直线的平均距离作为畸变校正效果的衡量标准。从表 1 数据和图 8 校正结果可以看出,本文的算法与传统摄像机标定方法以及基于直线特征的畸变标定方法相比,精度有所提高。

5 结 论

根据三维空间的直线投影到二维空间仍然是直线的成像原理进行畸变校正,并提出一种带权重因子的弯曲测度指标函数。随着像素离图像中心越来越远,畸变会随之增大,离图像中心不同距离的直线要给予不同的权重值,才能使畸变校正更加准确。该方法避免了摄像机标定过程中内外参数求解的复杂过程,以及高精度的标定模板,仅需单幅图像上的直线段即可完成畸变标定。实验结果表明,与传统的基于直线特征的畸变标定方法相比,RMS 的精度提高了 0.2 pixel。

参 考 文 献

- 1 Lan Haibin, Wang Ping, Long Teng. Nonlinear aberration correction of lens in image mosaic[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1196-1202.
兰海滨,王平,龙腾. 图像拼接中相机镜头非线性畸变的校正[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1196-1202.
- 2 Bu Penghui, Zhao Hong, Gu Feifei, *et al.*. A full automatic camera calibration method based on planar target[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015004.
卜鹏辉,赵宏,谷飞飞,等. 一种基于平面靶标的全自动标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015004.
- 3 Wu Fanlu, Liu Jianjun, Ren Xin, *et al.*. Deepspace exploration panoramic camera calibration technique based on circular markers[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1115002.
吴凡路,刘建军,任鑫,等. 基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1115002.
- 4 Liu Zhen, Shang Yanna. Novel calibration method for stereo vision sensor using flexible target[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0315001.
刘震,尚砚娜. 立体视觉传感器的一种灵活靶标新标定方法[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0315001.
- 5 Hu Zhanyi, Wu Fuchao. A review on some active vision based camera calibration techniques[J]. Chinese Journal of Computer, 2002, 25(11): 1149-156.
胡占义,吴福朝. 基于主动视觉摄像机标定方法[J]. 计算机学报, 2002, 25(11): 1149-156.
- 6 S D Ma. A self-calibration technique for active vision systems[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114-120.

- 7 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu, *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1440–1442.
余 俊,林家明,杨建宇,等.基于新型靶的CCD摄像系统畸变测量与校正[J].*光学学报*, 2007, 27(8): 1440–1442.
- 8 Xu Yong, Guo Pengyu, Long Gucan, *et al.*. Research on fully automatic camera calibration method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612007.
许 勇,郭鹏宇,龙古灿,等.摄像机全自动标定方法研究[J].*光学学报*, 2013, 33(6): 0612007.
- 9 Xu Fang, Liu Jinghong, Wang Xuan. Distortion correction method for CCD image based on calibration[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(4): 633–640.
徐 芳,刘晶红,王 宣.基于标定的CCD图像畸变校正方法研究[J].*液晶与显示*, 2013, 28(4): 633–640.
- 10 Su Chengzhi, Wang Enguo, Hao Jiangtao, *et al.*. Distortion correction for images in planar metrology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(1): 161–166.
苏成志,王恩国,郝江涛,等.平面几何测量中的图像畸变校正[J].*光学精密工程*, 2011, 19(1): 161–166.
- 11 R Y Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[C]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323–344.
- 12 Z Y Zhang. A flexible new technique for camera calibration[C]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 11(22): 1330–1334.
- 13 Zheng Yi, Liu Shangqian. Line-based nonlinear distortion correction of a camera calibration image[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(6): 1129–1133.
郑 毅,刘上乾.利用直线特征的定标图像非线性畸变校正[J].*仪器仪表学报*, 2007, 28(6): 1129–1133.
- 14 Zhou Fuqiang, Cai Feihua. Camera calibration method based on non-metric distortion correction[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(8): 228–232.
周富强,蔡斐华.基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J].*机械工程学报*, 2009, 45(8): 228–232.
- 15 Zhou Ziqing, Zhao Peng, Li Bo, *et al.*. Nonmetric lens distortion calibration based on collinear vectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1015001.
周子卿,赵 鹏,李 勃,等.基于共线向量的非量测镜头畸变校正[J].*光学学报*, 2014, 34(10): 1015001.
- 16 F Devermay, OFaugeras. Straight lines have to be straight-automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments[J]. *Machine Vision and Applications*, 2001, 13(1): 14–24.
- 17 M Ahmed, A Farag. Non-metric calibration of camera lens distortion: Differential methods and robust estimation[C]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2005, 14(8): 1215–1230.
- 18 Cheng Tianfei, Ma Mu, Li Peng, *et al.*. A camera calibration method based on non-metric distortion correction[J]. *Control and Decision*. 2012, 27(2): 243–247.
陈天飞,马 牧,李 鹏,等.一种基于非量测畸变校正的摄像机标定方法[J].*控制与决策*, 2012, 27(2): 243–247.
- 19 Zhang Jing, Zhu Dayong, Zhang Zhiyong. Nonmetric calibration of camera lens distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1552–1557.
张 靖,朱大勇,张志勇.摄像机镜头畸变的一种非量测校正方法[J].*光学学报*, 2008, 28(8): 1552–1557.
- 20 C B Duane. Close-range camera calibration[J]. *Photogramme Eng*, 1971, 37(8): 855–866.
- 21 Zhang Yujin. *Image Engineering(II)-Image Analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005, 75–86.
章毓晋. *图像工程(中册)图像分析*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005, 75–86.
- 22 J J More. *The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory*[M]. Berlin, Heidelberg: Numerical Analysis, 1978:105–116.

栏目编辑: 苏 岑