文章编号:1007-2780(2013)04-0633-08

基于标定的 CCD 图像畸变校正方法研究

徐 芳[1,2],刘晶红[1*],王 宣[1]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室,
吉林 长春 130033, E-mail: smilefang2012@163.com;
2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 为得到拍摄获取的 2D 图像信息与其对应 3D 空间物体信息之间准确的对应关系,减小因 CCD 相机镜头畸变对图像的影响,该文建立了正确的数学校正模型,采用基于 MATLAB 的 Camera Calibration Toolbox 工具箱对相机进行标定,得到由相机内部参数和外部参数组成的投影矩阵,从而完成对畸变图像进行校正处理。在标定与求解过程中,对每一步骤中的操作进行详细说明与分析,不断优化数据结果,同时调用空间立体图像模型,使实验数据表现更直观。利用得到的实验数据对由同一相机拍摄的图像进行校正验证,实验结果表明畸变图像得到了很好的还原。整体来说该方法简单、快速、直观并准确,实用性很强。

关 键 词: 摄像机标定;内部参数;外部参数;畸变校正

中图分类号: TP317.4 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3788/YJYXS20132804.0633

Distortion Correction Method for CCD Image Based on Calibration

XU Fang[1,2], LIU Jing-hong[1*], WANG Xuan[1]

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*, *E-mail: smilefang2012@163.com*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In order to obtain an accurate correlation between the 2D image information obtained by filming and the information of its corresponding 3D object, and to reduce the effect that the distortion of CCD camera lens has on the image, a correct mathematical model is set up. Based on the MATLAB camera calibration toolbox, the projection matrix consisting of the camera's internal and external parameters is obtained. Thus, the correction process of the distorted image is completed. In the process of calibration and solving, detailed description and analysis of each step in operation is given, the data results are constantly optimized, and by simultaneously calling the space stereo image model, the experimental data is more directly presented. The verification of the correction of the image captured by the same camera, using experimental data, is made. The experimental results indicate that the distorted image has been effectively restored. Overall, the proposed method is simple, time-efficient, direct, accurate and of significant utility.

Key words: camera calibration; internal parameter; external parameter; distortion correction

收稿日期: 2013-01-07; **修订日期**: 2013-05-13

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(No. 201204515)

作者简介: 徐芳(1987—),女,山东临沂人,硕士研究生,主要从事基于 FPGA 的图像畸变校正研究。

*通信联系人,E-mail: liu1577@126.com

1 引 言

CCD(charge-coupled device,电荷耦合器件)是图像传感器的一种,可以把通过光学镜头投影到其上的景物可见光信号转换为成比例的电荷包,形成电荷图像,并可将电荷图像输出成为电压视频图像,应用于高质量图像数据的获取。当代,随着人们对可视化和信息化程度要求的提高,采用广角镜头的 CCD 相机成像系统设计在航空航天、医疗影像、工业、办公管理以及各种场合的监视系统等领域被广泛应用,以获取大范围的视场和精准高效的视觉信息。但在 CCD 相机实际工作过程中,由于光学系统的设计、加工和装调所致,会出现畸变现象,使得成像时,拍摄获得的 2D 图像信息往往不能完全准确地反应 3D 空间实际目标模型信息,从而不利于我们对目标的辨认、分析和判断。为获取空间物体模型表面点的三维几何位置与其图像中对应像素点的准确关系[1],就需要我们建立摄像机成像的几何模型,并在此基础上进行分析和摄像机标定。

摄像机标定一直都是图像测量与机器视觉应用中非常基础和重要的部分,即建立摄像机图像像素位置与模板场景点位置之间的对应关系,由已知特征点的图像坐标求解摄像机的模型参数。现在已有多种标定方法,主要分为传统摄像机标定法和摄像机自标定法[2-3]。传统的标定利用已知的景物结构信息进行,按其思路可有如下方法:DLT 方法、R. Tsai 的 RAC 方法、张正友的平面标定方法、孟胡的平面圆标定方法、吴毅红等的平行圆标定方法,传统标定方法可用于任意的摄像机模型,标定精度高,但是标定过程复杂,且需要高精度的已知结构信息;摄像机自标定方法不依赖于标定参照物,仅依靠摄像机在运动过程中周围环境多幅图像之间的关系进行标定,灵活方便,但是精度不是很高,鲁棒性不足。该文在已有的相关理论基础上,基于 MATLAB 使用 camera calibration toolbox 工具箱实现了摄像机标定[4],并对整体的标定原理及标定过程进行详细描述,最后对标定的摄像机内外参数值,及其投影误差进行分析。整体来说,该方法简单、实用、快速,可获得理想的效果和准确度,有效地提高了开发效率。

2 标定原理及过程

2.1 相机投影矩阵与镜头畸变模型

为了描述相机的成像几何关系,需要对相机进行数学建模,通常采用针孔模型,也称为线性模型,这种模型是一个(退化的)摄影变换。三维场景分析使用如下坐标系来描述: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),空间一物点 Q 经成像后落在图像平面上 q 的位置处。

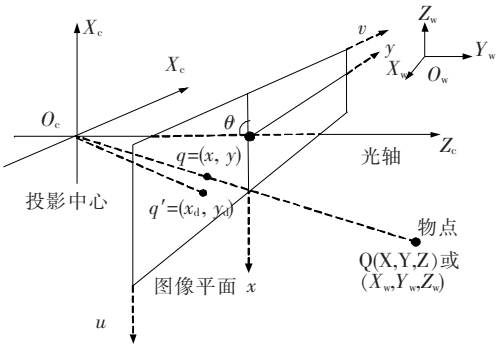


图 1 摄像机标定模型

Fig. 1 Camera calibration model

上述模型在数学上是三维空间到二维平面的中心投影[5-6],可由一个 3×4 矩阵$[R,t]$来描述,表示如式(1):

$$[R,t]=\begin{bmatrix} r_{11},r_{12},r_{13},t_x \\ r_{21},r_{22},r_{23},t_y \\ r_{31},r_{32},r_{33},t_z \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中,$[R,t]$为相机外部参数矩阵,R 是旋转正交矩阵,所以可认为只含 3 个自由度,t 为平移向量含 3 个变量,外部参数矩阵将摄像机坐标系与世界坐标系对应起来,描述摄像机相对于固定标定模板的方位或者标定模板围绕摄像机地运动。

在相机拍摄过程中,物体某个表面点的反射光也被采集,并存储在二维图像中,图像上每一像素点的亮度值与其强度有关,而图像点在图像平面上的位置仅与空间物体的相对方位和相机的内部结构有关,相机的内部结构是由相机的内部参数所决定的,我们可用式(2)$\boldsymbol{M}$ 矩阵表示。

$$\boldsymbol{M}\begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，c_x 和 c_y 是相机光轴与图像平面的交点，为投影中心，我们称为主点；γ 是 u 轴和 v 轴不垂直因子，一般为 0；设 d_x 和 d_y 是单个像素在成像仪 X 与 Y 方向上的物理尺寸，$s_x=1/d_x$，$s_y=1/d_y$ 是单位长度的像素个数，则 f_x 与 f_y 可由如下两式表示：$f_x=f\times s_x$，$f_y=f\times s_y$，分别定义为在 X 与 Y 方向的等效焦距；c_x，c_y，γ，f_x，f_y 不依赖摄像机的位置和偏向，称为摄像机的内参数，摄像机标定也就是求解 $\boldsymbol{M}$ 矩阵的过程。

对于镜头的畸变[7]，我们设理想图像点坐标为 $q(x,y)$，畸变后移动到 $q'(x_d,y_d)$ 点的坐标位置，二者关系可用 Hoek-Brown 模型[8]描述如下：

$$x = x_d(1+k_1r_d^2+k_2r_d^4+k_3r_d^6)+\left[p_1(3x_d{}^2+y_d^2)+2p_2x_dy_d\right] \quad (3)$$

$$y = y_d(1+k_1r_d^2+k_2r_d^4+k_3r_d^6)+\left[p_2(x_d{}^2+3y_d{}^2)+2p_1x_dy_d\right] \quad (4)$$

其中，$r_d^2=x_d^2+y_d^2$，此处考虑径向和离心畸变，第一个括号内的值称为径向畸变量，由光学镜头径向曲率变化引起，离光学中心越远，图像点沿径向移动的变形量越大；第二个括号内的值称为离心畸变量，来自于整个摄像机的组装过程，是指摄像机镜头的主光轴偏离图像中心，从而使显示的畸变图像关于中心点不对称。式子中的 k_1，k_2，k_3 称为径向畸变系数，p_1，p_2 称离心畸变系数。

2.2　相机标定

对于上述相机内外部参数和畸变系数的求解，可以通过相机标定工具箱(camera calibration toolbox)对模板进行标定获得，该工具箱由 Jean-Yves Bouguet 开发，其提供了各种例程及标定方法，用户接口方便灵活，可视化效果好，而且该工具箱的 C 源码在开源计算机视觉库中开放，为深入学习进行二次开发提供了理想的条件。借助该工具箱可以提取棋盘模板的角点，从而计算 n 幅不同图像中每幅图像多个角点之间的投影转换关系[9]，然后通过内封闭法求解出相机的 5 个内部参数和 6 个外部参数，最后利用 Levenberg-Marquardt[10]算法优化所有的参数。

本文实现了对 SONY 型号的 CCD 相机进行标定，因为相机是 PAL 制式的，所以需要一个帧捕捉卡连接到计算机，在本实验中用到的是美如画 UC580 的视频采集盒对采集的模拟信号进行 A/D 转换，将转换后的数字图像信号输送给计算机进行图形显示与算法处理。整体的图像采集与处理的外观硬件装置如图 2 所示。

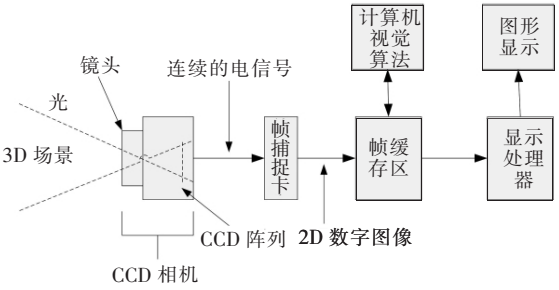
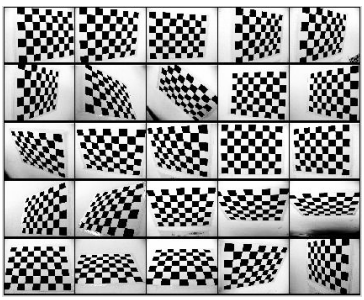


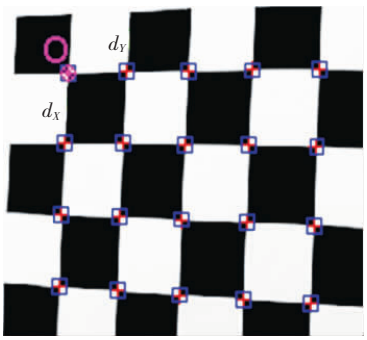
图 2　图像采集与处理的系统装置

Fig. 2　Image acquisition and processing system device

在 CCD 相机、视频采集盒和计算机之间连接好后，调通计算机软件即可进行图像采集与处理。本实验采用的标定模板图样是一张由 Auto CAD 制作的棋盘格图纸，采集了同一张标定模板图片的 35 幅不同位置和姿势的图像，从中选取 25 幅成像清晰、亮度与对比度好的图像进行实验，现标定过程如下，调用 calib_gui. m 函数，读入 25 幅图像，显示如图 3 中的(a)所示。



(a) Read images



(b) Corner extraction of the 9th image

图 3　读入图像与角点提取

Fig. 3　Read images and corner extraction

读入的图像会被自动下载进工具箱中进行角点提取[11]。角点提取过程如图 3 中的(b)所示，当处理大量的图像时，利用该工具箱是特别方便

的，因为用户不需手工地计算模板中 x 和 y 方向的小方格数量，也不需要手工提取每一个角点；然而在极少数的情况下，比如鱼眼镜头，可能会出现小方格数量计算不准确，在本实验中，使用的镜头比较适合角点自动提取，所以无需考虑这种情况。在角点提取之前，需要先标记采集的模板图像边缘，我们在棋盘图像中的 4 个边缘处，精确标出 4 个角点，注意误差尽量不超过五个像素，否则一些角点的提取可能会偏差较大。然后，输入每个角点检测器的窗口大小及黑白棋盘格的尺寸，图像的角点就会自动被提取出来了，提取精度大约为 0.1 个像素。有时会发现预测的角点与真实图像的角点不足够接近，这是因为存在镜头畸变，为了可以有效地提取角点，就需预测镜头的畸变系数，此时手工估计输入畸变系数 K_c 向量的第一个值，重新修正角点位置，不断重复多次，直到达到理想的角点提取效果。如果镜头畸变情况很严重，那么在自动角点提取之后，手工进行修正工作就很重要了，当然进行修正是非常耗时的一件事，所以当尝试其他方法不好用的时候可以考虑进行手工修正畸变系数。

角点提取之后，就可以进行相机标定了。标定过程分为两步：(1)初始化，此时设为理想状态，没有考虑任何相机畸变，且单个像素点在成像仪上是正方形的；(2)非线性优化，对所有的标定参数进行最小二乘优化以使投影误差最小，在本文的计算过程中，有 160 个参数需要被优化：10 个相机内参数和 150 个相机外参数，其中内参数包括：x，y 方向的有效焦距，图像中心，畸变系数。在第一次标定后，初始的标定参数和结果就会得出，同时对 25 幅图像优化标定结果和算法的梯度下降迭代收敛次数也会给出。

在第一次标定后，投影误差值仍然很大，不能作为模型复杂度的判断，在第 3 部分实验结果中，我们从角点投影误差图里也会发现，各图像角点分散范围不同，如果分散范围比较大，那么可能是因为多幅图像中的角点提取不精确所致，我们需要对图像中的角点重投影进行误差修正，然后我们再一次优化之前标定的结果，不断反复，以得到最佳效果。我们还可以根据镜头的畸变程度，在角点查找时选择不同的角点检测器窗口大小，从而提高标定精度。

3 实验结果与分析

在第一次相机标定后，通过初始化和非线性优化两个步骤，我们可得相机标定内参数和外参数。

在内参数矩阵中，设像素的有效焦距被存储在 2×1 向量 fc 中，图像投影中心被存储在 2×1 向量 cc 中，图像平面像素坐标不垂直因子存储在向量 γ 中，图像畸变系数(此处只考虑径向畸变和离心畸变，分别为 k_1，k_2，P_1，P_2，k_3 五个参量)存储在 5×1 向量 kc 中，并对获得的数据基于最小二乘准则进行优化，使得像点的反投影误差最小。得到的实验数据如表 1 和表 2。其中，初始化后得到的畸变系数向量值 kc=[0.000 00　0.000 00　0.000 00　0.000 00　0.000 00]，优化后的畸变系数向量值 kc=[−0.266 04　−0.321 01　−0.000 31　−0.000 16　0.000 00]，计算误差值 $\pm\Delta kc$，对应为[0.024 16　0.122 95　0.001 18　0.001 22　0.000 00]。

在优化过程中，各方程求解的梯度下降迭代收敛速度与初始化过程标定数值有一定关系，本次标定 matlab 程序显示的迭代次数为 13 次。对于投影误差的分析，通过图 4 调用的投影误差图可直观地显示出来，我们会发现多幅图像的投影误差以不同颜色的小十字线形式交错在一起，一目了然，非常清晰，当一幅或者多幅图像的角点提取不理想时，我们可以从图中发现该图像对应的某种颜色的小十字线分布范围很大，也表示该图像的某个角点的投影误差是很大的。

在上面的标定结果中，我们会发现投影误差很大而不能很好地判断模型复杂度，这主要是因

表 1 初始化后的标定参数

Table 1 Calibration parameters after initialization

参 数	X 方向	Y 方向
Focal Length (fc)	855.192 04	855.192 04
Principal point (cc)	359.500 00	287.500 00
Skew (γ)	0.000 00	90.000 00

表 2　优化后的标定参数

Table 2　Calibration results after optimization (with uncertainties)

参　数	X 方向	Y 方向
Focal Length (fc)	846.205 07	894.321 74
$\pm\Delta fc$	4.191 29	4.390 98
Principal point (cc)	347.556 44	313.024 35
$\pm\Delta cc$	3.087 67	2.465 76
Skew (γ)	0.000 00	0.000 00
$\pm\Delta\gamma$	0.000 00	0.000 00

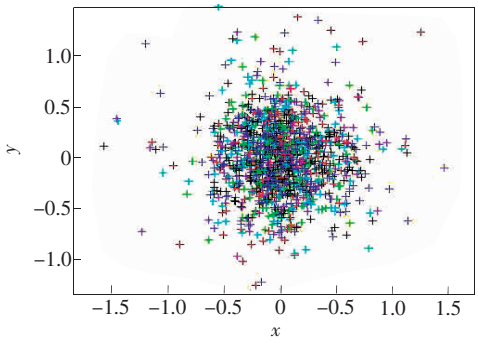


图 4　投影误差图

Fig. 4　Reprojection error

为多幅图像角点提取不精确所致，正如本文第二部分所提到的，通过控制多次连续标定和重投影，误差会被逐渐减小，在这些步骤之后，我们再次得到标定参数如下面的表 3 所示，此次标定，需要 4 次迭代就可得出结果，投影误差减小很多，结果相对比较理想。其中多次优化后的畸变系数向量值 kc=[0.280 11　0.316 67　0.001 02　0.000 11　0.000 00]。计算误差值$\pm\Delta kc$，对应为[0.024 16　0.122 95　0.001 18　0.001 22　0.000 00]。

下面分析相机外部参数，调用工具箱里相机外参数求解函数，我们选择显示第 9 幅标定模板相对于摄像机坐标系的方位，得到其平移向量、旋转向量和旋转矩阵，如表 4 所示。

我们也可以用三维空间模型来直观地显示相机与标定模板的几何关系，如图 5(a)中所示，标

表 3　优化后的标定参数

Table 3　Calibration results after optimization (with uncertainties)

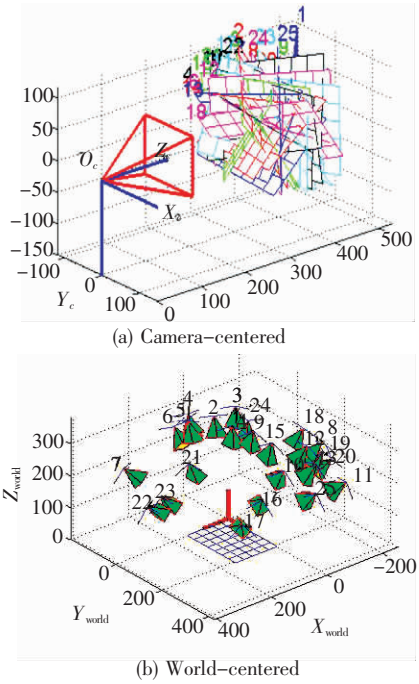
参　数	X 方向	Y 方向
Focal Length (fc)	848.408 07	863.071 74
$\pm\Delta$fc	1.352 11	1.562 10
Principal point (cc)	351.877 91	302.834 46
$\pm\Delta$cc	2.644 33	2.431 86
Skew (γ)	0.000 00	0.000 00
$\pm\Delta\gamma$	0.000 00	0.000 00

表 4　外部参数

Table 4　Extrinsic parameter

Translation vector (Tc_ext)	Rotation vectort (omc_ext)	Rotation matric (Rc_ext)		
−78.251 911	−2.009 496	−0.047 213	0.959 583	−0.277 437
−89.462 087	−2.114 557	0.998 542	0.052 618	0.012 066
418.447 256	0.271 333	0.026 177	−0.276 463	−0.960 66

于红色金字塔处的坐标系(O_c,X_c,Y_c,Z_c)是摄像机坐标系,金字塔的 4 条边所在的直线对应着相机的有效视场边界,不同颜色的网格状平面代表以相机为参考中心,标定模板的不同位置和方向角。在图 5(b)中,是在世界坐标系下,相机的不同位置和方向视图,绿色的小椎体即为相机。

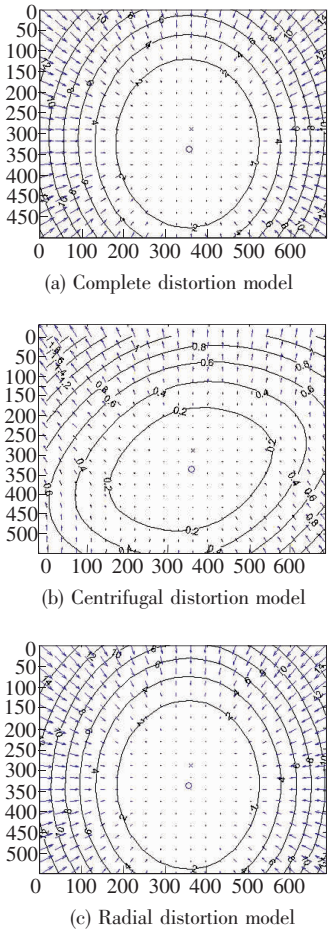


(a) Camera-centered

(b) World-centered

图 5 三维空间模型

Fig. 5 Three-dimensional model



(a) Complete distortion model

(b) Centrifugal distortion model

(c) Radial distortion model

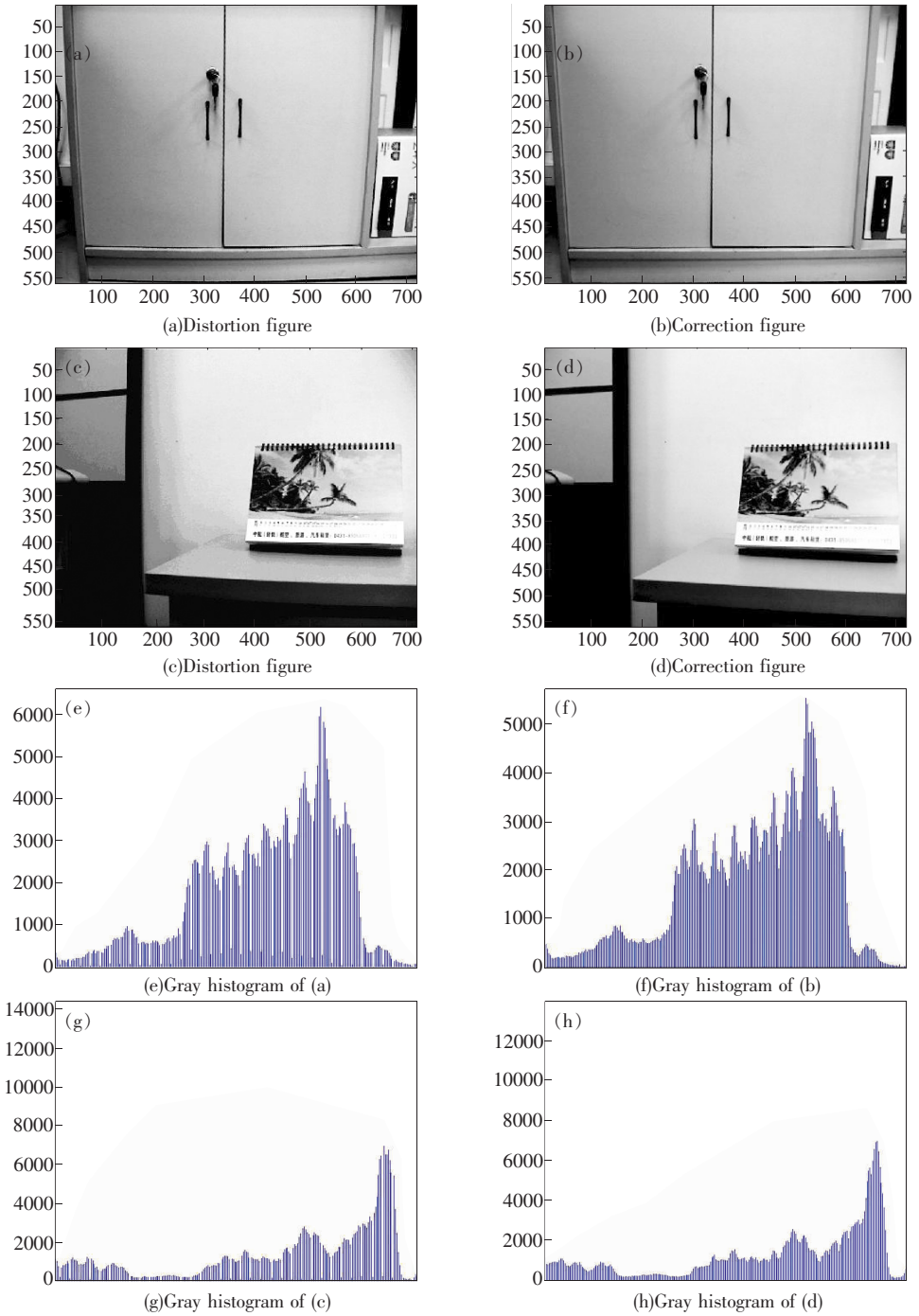
图 6 畸变模型中的畸变成分

Fig. 6 Distortion component in the distortion model

接下来调用 visualize_distortions.m 函数,可得直观畸变视图,观察相机镜头畸变模型,分析在整个镜头畸变效果中,径向畸变和离心畸变所表现的程度。

图 6(a)图显示了完整的畸变模型,包含径向畸变和离心畸变,图像中的十字叉点坐标是图像中心所在位置,而小圆环的坐标是标定出的投影中心点坐标位置,箭头表示畸变图像上棋盘网格点的偏移,也可以说明图像中的每一个像素在镜头畸变下的反应;(b)图显示了镜头畸变模型中的离心畸变分量;(c)图显示畸变模型中的径向畸变成分,观察(c)图可以看到该图像与完整畸变模型图像是非常相似的,所以,也可以说明在图像畸变中离心畸变是近似可以忽略的,在实际光学系统制造与装调过程中,很容易将该畸变控制近似到零,一般可忽略不计,我们研究镜头的畸变可以主要研究镜头的径向畸变模型。

接下来应用前面标定得到的相机内外参数和畸变系数校正由该相机拍摄得到的带有畸变的实物图像,图 7 中的(a)和(c)两组图像是由该相机拍摄的原始图像,可以看到,在(a)图中柜子的左、右和下边边缘相对明显地发生了弯曲,(c)图中,挡板的边缘和柜子面边缘也发生了弯曲,(b)和(d)图是经本文方法校正后的图像,可见其边缘直线性较好,整体校正效果比较理想,图像质量得到提高,(e)(f)(g)(h)图为(a)(b)(c)(d)图的相应灰度直方图。



(a)Distortion figure　(b)Correction figure

(c)Distortion figure　(d)Correction figure

(e)Gray histogram of (a)　(f)Gray histogram of (b)

(g)Gray histogram of (c)　(h)Gray histogram of (d)

图 7　校正前后实物图和其灰度直方图对比

Fig. 7　Physical figure and gray histogram of before and after correction

4　结　　论

基于 MATLAB 采用 Camera Calibration Toolbox 工具箱实现了 CCD 相机图像的快速标定,得到了相机的内外部参数和畸变系数,从而实现对 CCD 相机图像的畸变校正。实验结果表明,运用该工具箱对相机进行标定,整个计算过程是比较简单的,且标定与校正的实现速度很快,准确度比较高,结果很理想,当然,如果需要,用户也可以产生他自己的工具箱,以实现满足自己要求的效果。

参 考 文 献:

[1] 程明明,王贺,安平,等. 基于特征点匹配的多视图像校正 [J]. 液晶与显示,2010,25(4):593-597.

[2] 张征宇,黄诗捷,罗川,等. 基于共勉条件的摄像机非线性畸变校正 [J]. 光学学报,2012,32(1):0115002(1-6).

[3] 李鹏,王军宁. 摄像机标定方法综述 [J]. 山西电子技术,2007,(4):77-79.

[4] Azra Fetić,Davor Jurići Dinko Osmanković. The procedure of a camera calibration using camera calibration toolbox for MATLAB [C]//*MIPRO*,2012 *Proceedings of the* 35*th International Convention*,Opatija, Croatia:IEEE,2012:1752-1757.

[5] 代勤,王延杰,韩广良. 基于改进 Hough 变换和透视变换的透视图像矫正 [J]. 液晶与显示,2012,27(4):552-556.

[6] 吴国栋,韩冰,何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定法 [J]. 光学 精密工程,2007,15(10):1628-1632.

[7] 郭羽,杨红,杨照金,等. CCD 摄像机系统镜头的畸变测量 [J]. 应用光学,2008,29(2):279-282.

[8] 李伟,吕晓旭,钱晓凡,等. 基于平面模板的摄像机标定方法比较 [J]. 激光杂志,2006,27(2):54-55.

[9] 张浩,李大海,王琼华,等. 自由立体显示拍摄系统中摄像机空间自由度的确定 [J]. 液晶与显示,2010,25(2),287-291.

[10] Press W,Flannery B,Teukolsky S,*et al*. *Numberical recipes in C* [M]. UK:Oxford University Pres,1979:683-687.

[11] 屠大维,张翼成. 基于灰度差异的棋盘格角点自动检测 [J]. 光学 精密工程,2011,19(6),1360-1366.