

# 摄像头失真校正的研究

徐海云 王普 王广生

北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100022

E-mail: wangpu@bjut.edu.cn

**摘要:** 本文继承了图像几何校正法坐标变换的思想精髓,对传统的桶形失真模型进行了改进,最终通过对四种不同失真校正模型的分析 and 比较,找出了针对摄像头失真校正效果最好的模型。

**关键词:** 镜头失真 摄像头校正 桶形失真

## The Research on Camera Calibration

Xu Haiyun, Wang Pu, Wang Guangsheng

Beijing University of Technology

E-mail: wangpu@bjut.edu.cn

**Abstract:**Inheriting the idea of coordinates transformation used in image geometry correction, the paper improves the traditional barrel distortion model, and finally finds out the best model and receives a good result on camera calibration after analyzing and comparing the four barrel distortion models.

**Key Words:**lens distortion camera calibration barrel distortion

### 1. 引言

摄像头摄取图像的失真是由成像系统引起的一种几何畸变。几何畸变有很多种,例如枕形失真、桶形失真和帕形失真<sup>[1]</sup>,如图1所示。图像失真的大小通常是由摄像头的性能来决定的,例如广角镜头的失真通常会很严重。摄像头所产生的失真主要是桶形失真<sup>[2]</sup>。

关于几何畸变的校正研究已经比较成熟,其研究思路是:任何一种几何失真都可以用原始图像坐标和畸变图像坐标之间的关系加以描述,因而只需得到原始图像坐标和畸变图像坐标,就可以找出它们之间的对应关系,对图像进行坐标变换,从而得到校正图像。

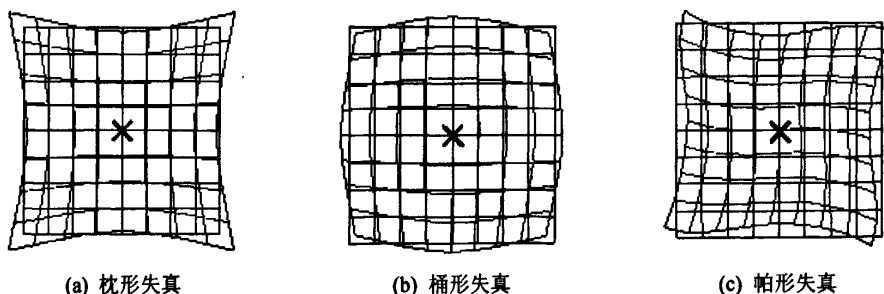


图1 三种几何畸变的示意图

### 2. 失真模型的理论基础

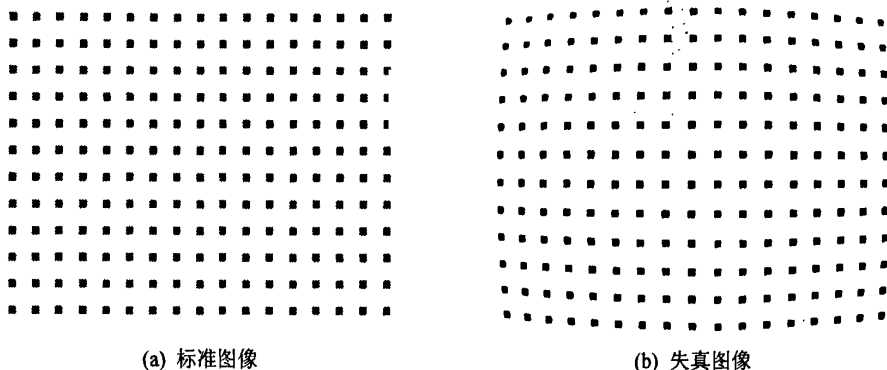


图2 摄像头获取的失真图像与标准图像的对比

首先建立一幅如图2(a)所示的具有等距点阵的标准图像。然后,通过摄像头摄取了如图2(b)所示的失真图像。需要注意的是这幅失真图像是经过二值化处理过的。二值化处理的目的是为了提取图像特征,准确地求出失真点阵的坐标。

通过比较标准图像和失真图像的对应点坐标,可以建立摄像头的非线性失真模型,通过反变换即可得到摄像头的校正模型,从而得到校正图像。事实上,建模法也是一种基于坐标变换思想的方法。

图1(b)反映了摄像头的失真情况,其失真是非线性的。可以根据失真的特点建立一个失真模型,再通过标准图像和失真图像的坐标来计算出模型的参数。失真模型和校正模型可以看作是一对反变换。图像的失真校正模型如图3所示。一般来说,摄像头摄取图像的失真是桶形失真。近似认为,失真是对称的,即从图像的中心点来看,左右两边的失真相同,同理,上下两边的失真也是相同的。

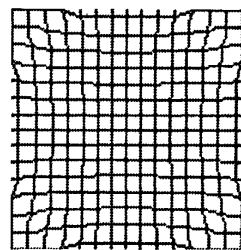


图3 图像校正模型的示意图

### 3. 图像的失真模型

#### 3.1 失真校正模型一

传统的桶形失真校正模型如下<sup>[3]</sup>:

$$\begin{aligned} x' &= k_1(1 + k_2(x^2 + y^2))x \\ y' &= k_1(1 + k_2(x^2 + y^2))y \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $k_1$  —— 图像比例系数;

$k_2$  —— 失真校正系数

$k_1$  决定校正图像的大小:  $k_1$  越大, 校正后的图像越大。  $k_2$  为桶形失真校正的系数,  $k_2$  越大, 桶形失真校正程度越大, 即图像向内凹的程度越大, 应用于桶形失真较大的图像;  $k_2$  越小, 桶形失真校正程度越小, 即图像向内凹的程度越小, 应用于桶形失真较小的图像。

基于这种方法得到的校正图像如图4所示:

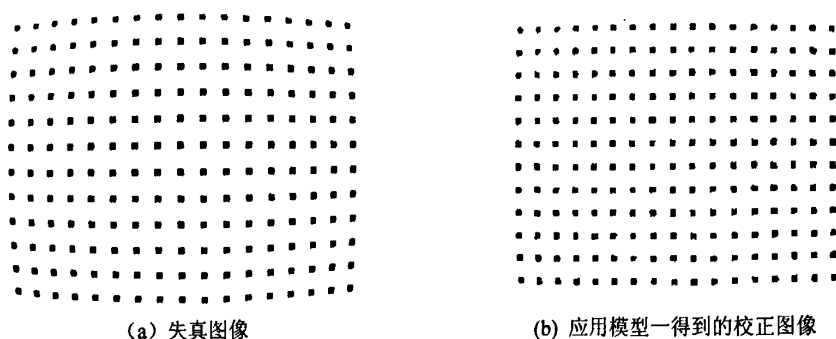


图4 用模型一对图像进行失真校正

### 3.2 失真校正模型二

从应用失真模型一的校正图像可以看出,失真图像在  $x$  方向(即横向)和  $y$  方向(即纵向)上的失真程度有略微的不同,即在  $y$  方向校正较好的情况下,  $x$  方向还校正不够。从图 4(b) 可以看出,  $x$  方向上(最上端和最下端的两排点)还略微向外凸出。针对这一现象,在模型一的基础上建立失真模型二,对  $x$  方向和  $y$  方向进行不同程度的校正。

$$\begin{aligned} x' &= k_1(1 + k_{2x}(x^2 + y^2))x \\ y' &= k_1(1 + k_{2y}(x^2 + y^2))y \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $k_{2x}$  ——  $x$  方向上的校正系数;  $k_{2y}$  ——  $y$  方向上的校正系数

当  $k_{2x} = k_{2y}$  时,模型二等同于模型一。需要注意的是,如果要改变  $x$  方向上的校正程度,

需要改变  $k_{2y}$ ,  $k_{2y}$  越大,  $x$  方向上的校正程度越大。

用模型二校正得到的图像如图 5 所示。

从图像上来观察模型一与模型二的校正效果。可以看出,由于模型二在  $x$  方向和  $y$  方向引入了不同的校正系数,使得图像的校正效果更好。对比两幅图像,可以看出图 4(b) 在  $x$  方向上存在轻微的外凸,而通过模型二,轻微的外凸得到了较好的校正,如图 5(b) 所示。

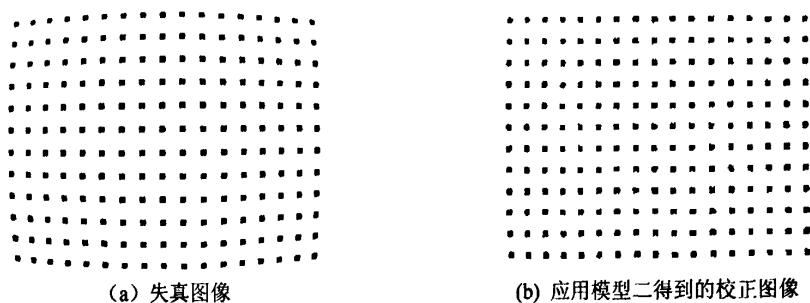


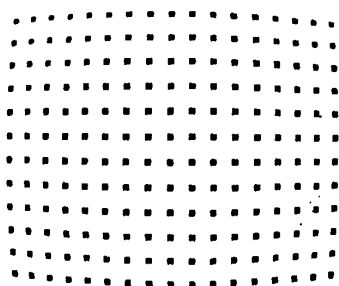
图5 用模型二对图像进行失真校正

### 3.3 失真校正模型三

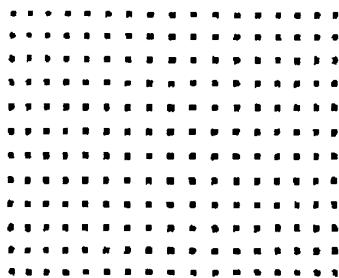
将失真模型二进行简化,可以得到失真模型三:

$$\begin{aligned} x' &= k_1(1 + k_{2x}y^2)x \\ y' &= k_1(1 + k_{2y}x^2)y \end{aligned} \quad (3)$$

基于这种方法得到的校正图像如图 6 所示。



(a) 失真图像



(b) 应用模型三得到的校正图像

图6 用模型三对图像进行失真校正

通过实验结果可以看出,模型三也可以较好地校正x方向和y方向上的失真。从公式上看,模型三的运算量要小于模型二。

### 3.4 失真校正模型四

用失真模型三得到的图形和标准点进行对比,灰色的点为标准点的位置,即黑色小像素块的校正目标。如图7所示。

可以看出,由于摄像头的失真为桶形失真,其图像中心部分被失真放大,而图像边缘部分失真缩小。所以,用模型三校正完成后,可以看出,尽管组成点阵的线已经基本平直,但位于图像中心部分的点阵比标准点阵间距宽,即标准点在黑色像素块的内侧;而位于图像边缘部分的点阵比标准点阵间距窄,即标准点在黑色像素块的外侧。为了形象的说明这一特点,图7中用叉子画出了四个标准点的位置,可以看出,图中的黑色像素块的距离在图像中心部分比两个叉子的距离要略大,而图像边缘部分黑色像素块的距离比两个叉子的距离要略小。因此,将模型三进行进一步的改进,建立模型四:

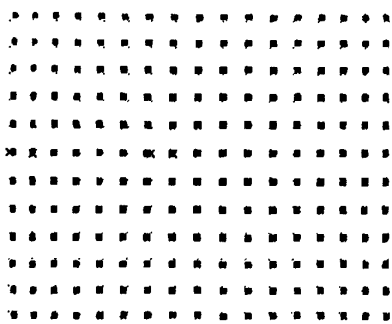


图7 模型三的校正图像和标准点的对比

$$\begin{aligned} x' &= (k_1 + \frac{x}{k_{3x}})(1 + k_{2x}y^2)x \\ y' &= (k_1 + \frac{y}{k_{3y}})(1 + k_{2y}x^2)y \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $k_1$  取值要小于模型三中的取值,原因是当  $x, y$  很小时(即图像中心部分),使图像略微缩小,以校正图像中心放大的部分。当像素点距离图像中心点越远,即  $x, y$  越大,因而对原系数  $k_1$  的调整  $\frac{x}{k_{3x}}$  和  $\frac{y}{k_{3y}}$  越大,从而放大了原图像边缘缩小的部分。

用模型四校正的结果和标准点的比较如图8所示。

可以看出,校正取得了较好的效果,黑像素块基本被校正到了标准点的位置。

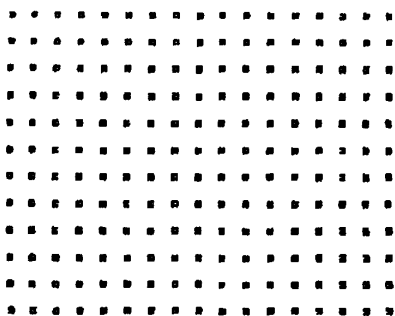


图8 模型四的校正图像和标准点的对比

## 4. 失真模型的比较

### 4.1 模型的不连续性

采用失真模型对图像进行校正,相当于对图像做了一个坐标变换,这时可能会出现不连续映射的现象,即经过坐标变换的图像中的像素可能在原图像中找不到相应的像素点,出现了空值的现象。图 9(a) 给出了经过模型二变换后的图像不连续映射现象的示意图,图中黑色的线条即为空值的部分:

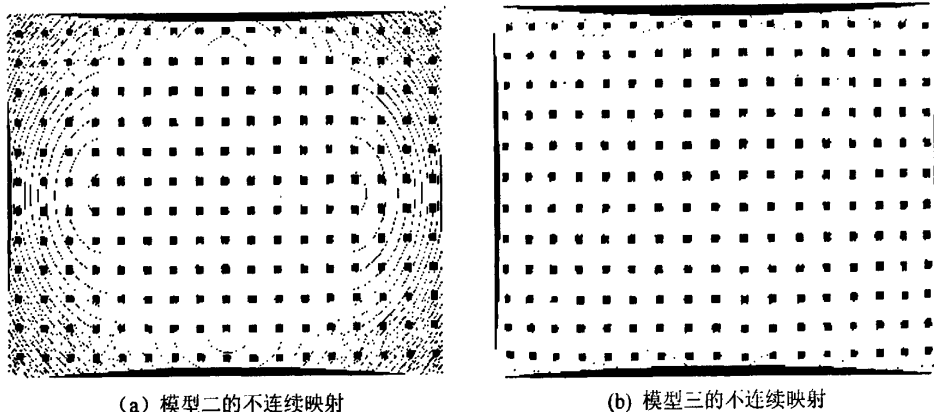


图 9 模型的不连续映射

应用模型三,不连续映射可以得到较好的控制,但很难完全避免它的存在。因此,需要对出现空值的地方进行插值处理,即用和它邻近的几个像素的平均值对它进行赋值。在前文中用几种模型得到的校正结果都是经过了插值处理的,因此,不再存在空值的现象。

### 4.2 模型的误差比较及分析

采用了四种模型对图像进行校正均取得了较好的效果,原有的明显失真得到了不同程度的校正。对四种模型的校正效果如果仅仅用肉眼观察来判断显然不够科学,因此可以通过参数的个数、平均点距、最大点距和空值点个数这四个标准来比较四种失真校正模型。

参数的个数:模型的参数不宜过多,否则会造成参数估计算法复杂,过多的参数还容易引入由于参数不够精准而造成的误差。

平均点距:这是进行模型比较最重要的一个标准。它反映了图像校正的整体效果。用校正图像和标准图像进行对比,比较每个对应点的相对位置,计算出它们的距离,再求其平均值,具体公式如下:

$$\text{平均点距 } \bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{|x_{is} - x_{ic}|^2 + |y_{is} - y_{ic}|^2}}{N} \quad (5)$$

式中  $N$  —— 点的个数;

$(x_{is}, y_{is})$  —— 标准点的坐标;

$(x_{ic}, y_{ic})$  —— 校正点的坐标

最大点距:校正图像的点阵中距离标准点最远的点。它反映了图像校正结果最差部分的校正情况。

空值点个数:虽然用插值法对空值点进行了处理,但还是希望尽可能减少空值点的个数。这是因为在进行图像失真校正的同时要尽可能保持原图像的质量。不过,在进行图像的失真

校正时，空值点是不可避免的，因此也应该权衡地来看这一数据。

表 1 列出了四种失真校正模型的校正数据，可以看出模型二的校正效果最好，它从 x 方向和 y 方向分别对失真进行了校正，模型本身也包含了对图像边缘缩小部分的还原。模型三虽然计算相对简单，模型的空值点也很少，但是它的校正效果明显低于其他模型。模型四的校正效果很好，空值点的个数也要少于模型一和模型二，但是它的参数过多，处理复杂，而且容易因参数的不精准而引入误差。

四种校正模型比较

校正模型	参数的个数	平均点距	最大点距	空值点个数
失真图像（未校正）	——	11.0538	17.6918	——
校正模型一	2	2.3206	6.0828	11696
校正模型二	3	1.4703	5.0000	11632
校正模型三	3	5.9372	10.4403	276
校正模型四	5	1.6942	8.2462	8025

### 5. 结束语

通过前文对四个失真模型的分析与比较，选用失真校正模型二对摄像头获取的图像进行失真校正，得到的校正效果如图 10 所示。从校正结果可以看出，原本因为摄像头桶形失真而外凸的书籍与纸盒的边缘经过校正已经较为平直，镜头的失真得到了良好的校正。

摄像头失真使其应用受到了很大的限制，本文关于摄像头失真校正的研究，可以应用于任何一个成像系统桶形失真的校正环节，对图像识别、图像配准以及图像拼接等研究有很大的帮助，具有较高的实用价值。

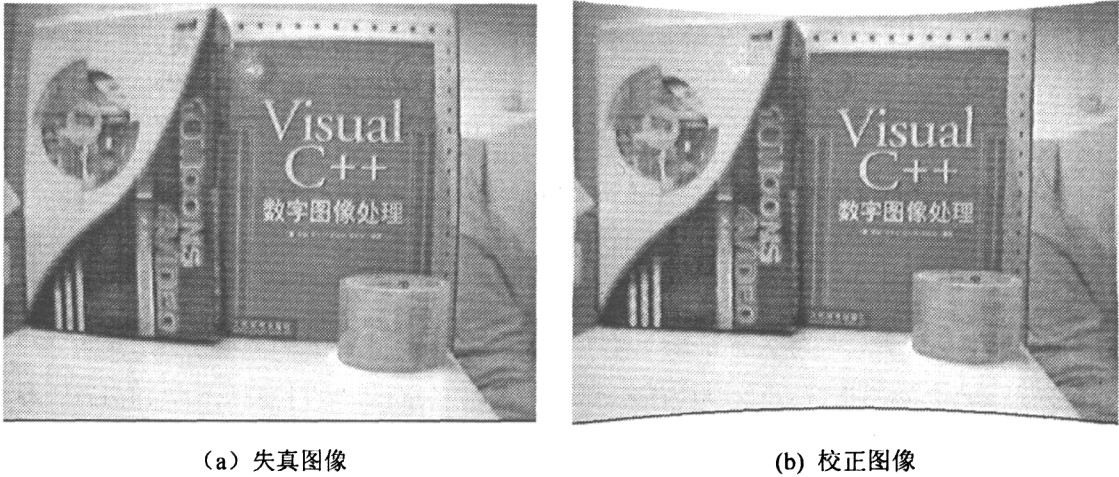


图 10 模型的不连续映射

### 参考文献

[1] M.A. Boer, A.G.J. Nijmeijer, C.H. Slump, M.M. Samsom, M.J. Bentum, G.J. Laanstra, H. Snijders, J. Smit and O.E. Herrmann. Real-Time Restoration of Lens-Distorted Images by Digital Image Processing. In Proceedings of the IEEE ProRISC workshop on Circuit, Systems and Signal Processing, March 1994: 41~46

[2] L. Campbell, A. Bobick. Correcting for Radial Lens Distortion: A Simple Implementation. Tech. Rep. 322, Mass. Inst. Technol. Media Lab. Percept. Comput. Sect., Cambridge, MA, April 1995

[3] 王熙法, 庄镇泉, 王东生. C 语言图像处理程序设计. 中国科学技术大学出版社, 1994: 228~230

# 摄像头失真校正的研究

作者: 徐海云, 王普, 王广生

作者单位: 北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100022

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference\\_6737573.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6737573.aspx)