

大视场针孔物镜设计及成像畸变校正

胡明勇, 李明杰*, 赵 奇, 范二荣, 封志伟

合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009

摘要 设计了一个相对口径为 1/5、焦距为 5 mm、视场角为 125°的大视场针孔物镜系统。该结构在 50 lp/mm 时的所有视场的调制传递函数均大于 0.5, 成像达到衍射极限, 但全视场畸变率达到 -46%。根据光学成像理论和图像处理技术, 利用点阵样板计算光学中心和畸变系数, 建立畸变校正模型, 设计畸变校正算法。将线性成像模型与畸变校正模型相结合, 建立畸变校正率标定方程, 利用该算法求得的畸变校正率达到 96.17%。将该校正方法与其他方法进行了对比分析, 结果表明, 该方法简单易行, 基本满足工业上的需求, 能够广泛适用于大视场镜头的成像畸变校正。

关键词 光学设计; 大视场针孔物镜; 成像系统; 图像处理; 畸变校正; 校正率

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0522002

Design and Imaging Distortion Correction of Pin-Hole Objective Lens with Large Field

Hu Mingyong, Li Mingjie, Zhao Qi, Fan Errong, Feng Zhiwei

Institute of Optoelectronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract An optical system of pin-hole objective lens with large field is designed with relative aperture of 1/5, focus length of 5 mm and field angle of 125°. In this structure, the modulation transfer function for all fields is bigger than 0.5 at 50 lp/mm, and the imaging reaches the diffraction limit, but the full field distortion rate reaches -46%. According to optical imaging theory and image processing technology, the lattice template is used to calculate the optical center and the distortion coefficient. The distortion correction model is built and distortion correction algorithm is designed. With a combination of linear imaging model and distortion correction model, the calibration equation of distortion correction rate is built. The distortion correction rate obtained by this algorithm is 96.17%. This calibration method is compared with other methods, and we find that the proposed method is simple and practicable. The proposed method basically meets the needs of industry, and it can be widely used in image distortion correction of large field lenses.

Key words optical design; pin-hole objective lens with large field; imaging system; image processing; distortion correction; correction rate

OCIS codes 220.3620; 080.3620; 100.2000; 120.3620

1 引 言

大视场针孔物镜在内窥镜系统、视频制导系统和监控系统等领域得到广泛应用^[1]。小孔径内产生大的观察范围, 同时也会带来非常明显的畸变, 一般采用 Topogon 类或 Pysccap 类结构的超广角物镜, 多数情况下可以利用复杂球面镜片组或非球面实现畸变校正^[2-4], 但光学设计上的畸变校正成本代价大且适用性不佳。国内外研究人员在图像处理方面提出了一些高精度传感器检校方法^[5-9]。Hideaki 等^[10-11]提出了在考虑摄像机参数和畸变参数的情况下, 建立多项式畸变消除模型。上述校正方法比较复杂, 工业上需要一种简单易行且效果较好的方法。在考虑成本和镜头设计要求的前提下, 本文设计了成像质量良好的大视场针孔

收稿日期: 2016-11-25; **收到修改稿日期:** 2017-01-17

作者简介: 胡明勇(1976—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事大口径、高精度光学方面的研究。

E-mail: humy8@126.com

* **通信联系人.** E-mail: jaylingli@126.com

物镜,并在 Zemax 软件的畸变数据基础上,提出一种新的畸变校正方法,并与其他方法进行了对比分析。

2 光学结构设计

大视场针孔物镜是小口径、大视场的光学成像系统,其设计要求如表 1 所示。对称型物镜可以消除垂轴像差,正光焦度或负光焦度在外类结构可以校正轴向像差。本研究采用对称式、弯月形厚透镜和正负薄透镜分离型结构相结合的光学系统来分散光焦度。利用平行平板、光阑和胶合面自动消除球差、像散、彗差、场曲和色差。经 Zemax 软件设计优化后,系统结构如图 1 所示。

表 1 大视场针孔物镜设计要求

Table 1 Design requirements of pin-hole objective lens with large field

Technical parameter	Value
Aperture	1~2 mm
Focus	4~6 mm
Field-of-view	110°~130°
Relative aperture	1/6~1/4
Average distortion rate	-10%~0
Camera target	1/1.5~1/2 in(1 in=2.54 cm)

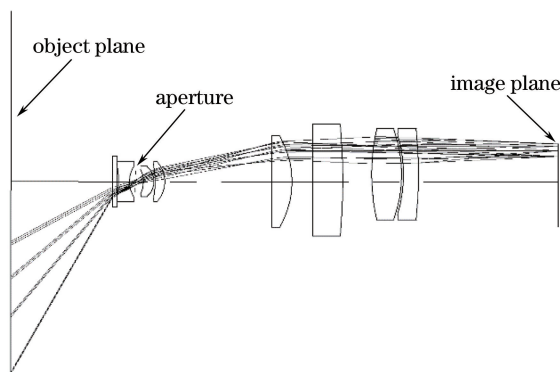


图 1 大视场针孔物镜结构

Fig. 1 Structure of the pin-hole objective with large field

大视场针孔物镜的相对孔径为 $1/5$,视场角 $2\omega = 125^\circ$,焦距 $f' = 5$ mm。大视场针孔物镜的视场畸变率和像模拟图分别如图 2、图 3 所示,可以看到,物镜的全视场畸变率接近 -46% ,存在较大的负畸变。

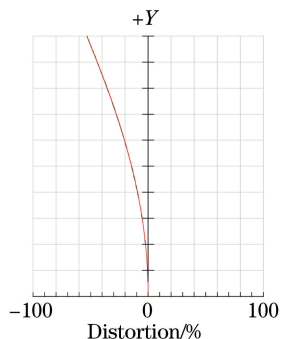


图 2 大视场针孔物镜的视场畸变率

Fig. 2 Field distortion rate of the pin-hole objective with large field

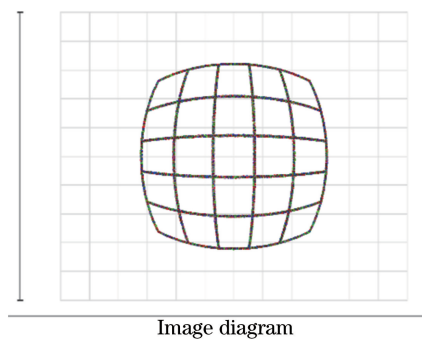


图 3 大视场针孔物镜的像模拟图

Fig. 3 Image simulation diagram of the pin-hole objective with large field

大视场针孔物镜的点列图和调制传递函数(MTF)图分别如图 4 和图 5 所示。从图 4、图 5 可知各视场的均方根值(RMS)均小于光学系统的艾里斑直径,50 lp/mm 时所有视场的 MTF 均大于 0.5,达到衍射极限,并且系统不存在渐晕现象,因此本研究设计的光学系统成像质量良好。

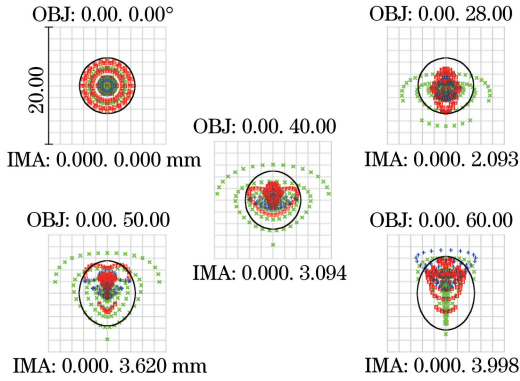


图 4 大视场针孔物镜的点列图

Fig. 4 Spot diagram of the pin-hole objective with large field

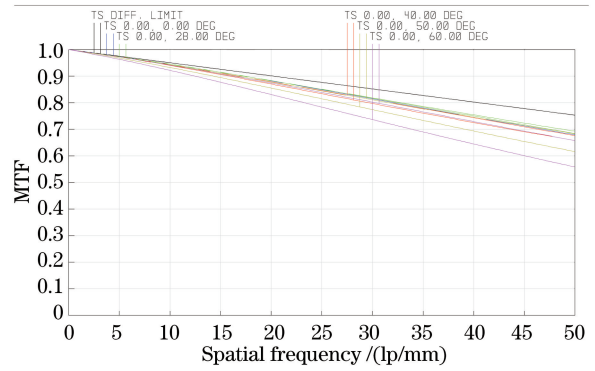


图 5 大视场针孔物镜的 MTF 图

Fig. 5 MTF diagram of the pin-hole objective with large field

由上述分析可知,除平均畸变率外,大视场针孔物镜的其他参数基本满足设计要求。需要利用图像处理技术对畸变进行校正。

3 成像畸变校正

在摄像机成像模型的基础上,建立成像畸变校正模型,设计畸变校正算法。

3.1 畸变校正模型

摄像机成像系统由 4 个坐标系组成:世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) 、摄像机坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) 、图像坐标 (X, Y) 、像素坐标系 (U, V) 。由针孔成像模型可知,空间中任意一点 $P(x_w, y_w, z_w)$,在图像坐标系中的投影点为 $p(x, y)$,在像素坐标系中投影点为 $p(u, v)$ 。则摄像机线性成像模型^[12]为:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = z_c \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 z_c 为 P 点在摄像机光轴上的坐标, d_x 、 d_y 分别为 X 和 Y 方向的像素点间距, f 为镜头焦距,光心 O 的坐标为 (u_0, v_0) , \mathbf{R} 、 \mathbf{t} 分别为世界坐标系与摄像机坐标系之间转换的旋转矩阵和平移向量。

主要需考虑三种类型的畸变:径向畸变、离心畸变、薄透镜畸变^[13]。一般情况下,径向畸变已经足以反映非线性畸变^[14]。模型中引入过多类型的畸变,并不能提高畸变校正效果,反而使结果不稳定^[15]。建立仅考虑径向畸变情况下的畸变校正模型:

$$\begin{cases} \bar{x} = x + k_1(x - x_0) [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \\ \bar{y} = y + k_2(y - y_0) [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \end{cases}, \quad (2)$$

式中实际畸变像点 $p(x, y)$,无畸变理想点 $p(\bar{x}, \bar{y})$, $C(x_0, y_0)$ 为光学中心, k_1 、 k_2 分别为 X (水平)方向和 Y (垂直)方向的径向畸变参数。

3.2 畸变校正算法

由图像理论可知,畸变实质上是像素发生位置偏移,畸变校正是像素坐标位置进行恢复的过程。

1) 计算光学中心 $C(x_0, y_0)$

工程应用中,一般要求在保证校正效果的前提下提高校正算法的速度。运用光学系统成像规律,对畸变校正过程进行简化和分析^[16]:

a) 光学中心附近的畸变较小;

b) 经过光学中心的直线段成像后仍是直线段;

c) 在线性成像系统中,物平面中的两条垂直于光轴的等长直线段对应像平面中的两条线段仍然等长。

对点阵样板畸变成像,图像上的圆点已经变成了非圆形。进行预处理后,将畸变圆点区域的质心坐标作

为圆点坐标。根据上述光学系统成像规律 a) 和 b), 垂直和水平方向的圆点 $V_j(x_v^j, y_v^j)$ 、 $H_i(x_h^i, y_h^i)$, 中心点 (x_c^j, y_c^i) 。在两个方向上构造样本点集:

$$L_v^m = \min\left(\sum_{j=1}^m |x_v^j - x_c^j|\right), \quad L_h^n = \min\left(\sum_{i=1}^n |y_h^i - y_c^i|\right). \quad (3)$$

式中, m 、 n 分别为垂直和水平方向的圆点数量。以 L_v^m 、 L_h^n 选取的样本点集拟合两条直线 l_v 、 l_h , 交点即为光学中心 $C(x_0, y_0)$ 。

2) 求解畸变系数 k_1 、 k_2

根据上述光学系统畸变成像的特性 b)、c) 可知, 由(3)式构造的样本点集, 水平方向上的 n 个样本点 $H_i(x_h^i, y_h^i)$ 的纵坐标 $y_h^1 = y_h^2 = \dots = y_h^n = y_0$ 。理想成像下, 样本点间距离相等, 即 $\bar{x}_h^{[n/2]+1} - \bar{x}_h^{[n/2]} = \frac{1}{n-i}(\bar{x}_h^n - \bar{x}_h^i)$, 其中 $[n/2]$ 表示取整(下同), $i=1, 2, \dots, n-1$ 。代入(2)式中, 化简后得:

$$k_1^i = \frac{(n-i)(x_h^{[n/2]+1} - x_h^{[n/2]}) - x_h^n + x_h^i}{(x_h^n - x_0)^3 - (x_h^i - x_0)^3 - (n-i)[(x_h^{[n/2]+1} - x_0)^3 - (x_h^{[n/2]} - x_0)^3]}. \quad (4)$$

根据上述方法, 计算出水平方向的 $n-1$ 个畸变系数 k_1^i , 用这些系数的均值作为水平方向的畸变系数 k_1 , 即:

$$k_1 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} k_1^i. \quad (5)$$

垂直方向上的 m 个样本点 $V_j(x_v^j, y_v^j)$ 的横坐标 $x_v^1 = x_v^2 = \dots = x_v^m = x_0$ 。利用与上述求解水平方向畸变系数类似的方法, 求得 k_2 。

3) 灰度重建

对畸变图像的任一点 $p(x, y)$ 进行上述的空间坐标变换后, 得到的校正后图像坐标 $p(\bar{x}, \bar{y})$ 的像素点坐标可能不是整数, 故需要对像素点的灰度值进行灰度重建, 重建方法选择校正精度和校正速度都比较合适的双线性内插法。

4 实验结果

综上所述, 大视场针孔物镜畸变校正算法流程图如图 6 所示, 在 VS2010 环境下, 用 C++ 开发畸变校正的应用程序, 采用海康威视 DS-2CD5026EFWD 的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 摄像机, 靶面为 1/1.8 in。对设计的视场角为 125° 的大视场针孔物镜进行畸变校正。根据畸变校正算法, 利用点阵样板畸变图像[图 7(a)]求解畸变参数, 如表 2 所示。校正后的图像如图 7(b) 所示。

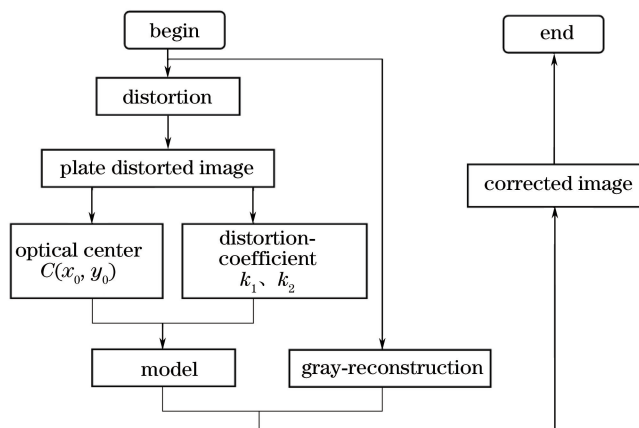


图 6 畸变校正算法流程图

Fig. 6 Flow chart of distortion correction algorithm

表 2 畸变参数
Table 2 Distortion parameters

Parameter	Value
Optical center C	(263.667, 160.375)
k_1	5.57291×10^{-6}
k_2	3.13882×10^{-6}

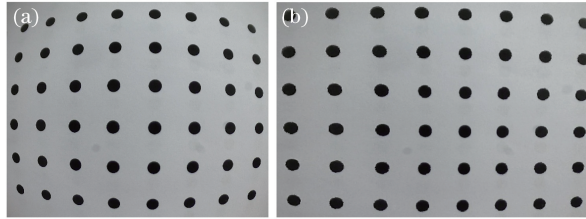


图 7 (a) 点阵样板畸变图像; (b) 校正图像

Fig. 7 (a) Lattice plate distortion image; (b) corrected image

利用该校正算法对实际场景成像进行畸变校正,结果如图 8 所示。



图 8 (a) 实际场景畸变图像; (b) 校正图像

Fig. 8 (a) Real scenario distortion image; (b) corrected image

5 分析与讨论

查找 CMOS 摄像机的相关参数,利用(1)式对点阵样板建立理想状态下的线性成像模型,计算第 i 个点的像素坐标 (x_i^p, y_i^p) 。利用畸变校正模型,求解出校正后像素坐标 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 。在畸变率计算方法的基础上,建立畸变校正率标定方程:

$$P = \left[1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(x_i^p - \bar{x}_i)^2 + (y_i^p - \bar{y}_i)^2}}{\sqrt{(x_i^p)^2 + (y_i^p)^2}} \right] \times 100\%, \quad (6)$$

式中 n 为点阵样板上圆点的数量。求得本算法的畸变校正率 $P = 96.17\%$,大视场针孔物镜产生负畸变,故校正后的成像平均畸变率为 -3.83% ,满足设计需求。

影响畸变校正率的主要因素有:点阵样板图上点的个数、光学中心定位误差以及灰度重建误差。分别以本研究模型、经典畸变模型以及 Brown 模型^[17]为例,对比分析畸变校正率与点阵样板规模的关系,结果如表 3 和图 9 所示。

表 3 点阵样板规模与畸变校正率
Table 3 Lattice plate size and distortion correction rate

Lattice plate	4×2	6×4	8×6	10×8	12×10	14×12	16×14	18×16	20×18
Proposed model / %	41.27	65.57	96.17	97.21	97.34	97.46	97.51	97.56	97.59
Classical model / %	50.54	75.67	97.27	97.32	97.44	97.53	97.62	97.70	97.72
Brown model / %	52.47	78.97	97.87	97.41	97.48	97.57	97.65	97.72	97.79

由图 9 可知,点阵达到一定规模时,三种模型的校正率相差不大,且对校正效果影响并不显著,需要考虑其他影响因素。分析了三种模型的算法时间复杂度,如图 10 所示,可知本算法时间复杂度较好。

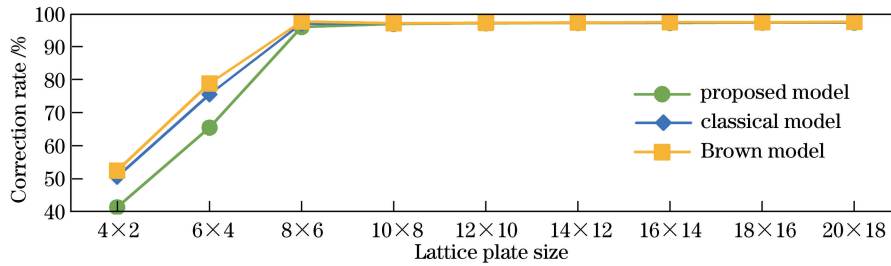


图 9 点阵样板规模与畸变校正率的关系

Fig. 9 Relationship between lattice plate size and distortion correction rate

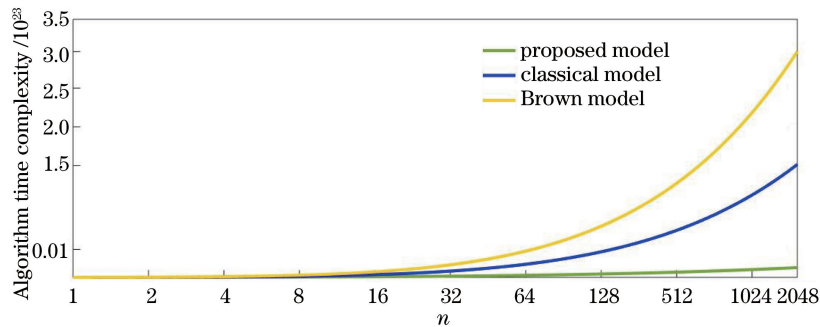


图 10 三种模型的算法时间复杂度

Fig. 10 Algorithm time complexity of the three models

6 结 论

考虑工业应用,设计了视场角为 125° 、成像质量良好但存在较严重成像畸变的大视场针孔物镜。利用软件算法求解畸变模型,并计算出成像畸变校正率达到了 96.17% 。校正效果满足设计需求,可以广泛适用于大视场镜头的畸变校正。现有的校正方法大多是软件方法或光学结构设计方法,没有将二者结合到一起。本研究在设计光学结构的基础上,提出新的畸变校正方法。该方法校正率较高、时间复杂度小、简单易行且不需要复杂的测量装置,畸变参数的标定主要依靠图像处理技术,具有良好的可移植性。

参 考 文 献

- [1] Hao Peiming. Optical system design of flame-observing tube[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1997, 14(2): 180-186.
郝沛明. 光焰观测仪的光学系统设计[J]. 量子电子学报, 1997, 14(2): 180-186.
- [2] Mu Yongji, Mao Yijiang, Hu Mingyong. Design of a kind of aberration corrector for off-axis paraboloid[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622004.
穆永吉, 毛一江, 胡明勇. 一种离轴抛物面镜像差校正镜组的设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622004.
- [3] Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.* System design of space camera with long focal length and correction of image distortion[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2657-2661.
李旭阳, 李英才, 马 臻, 等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2657-2661.
- [4] Bian Yinxu, Wang Heng, Guo Tianyi, *et al.* Design of ultra-short throw ratio projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1222002.
卞殷旭, 王 恒, 郭添翼, 等. 超短投影距的投影物镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1222002.
- [5] Nomura Y, Sagara M, Naruse H, *et al.* Simple calibration algorithm for high-distortion lens camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(11): 1095-1099.
- [6] Weng J, Cohen P, Herniou M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [7] Chen Dongqing, Xie Hongbo, Xu Zhi, *et al.* Study on correction of distortion in medical electronic endoscope image [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2001, 20(1): 89-94.
陈冬青, 谢洪波, 徐 智, 等. 医用电子内窥镜图像畸变校正方法的研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2001, 20(1):

89-94.

- [8] Zhong Xianghong, Zhang Baozheng, Lin Meirong, *et al.* Analysis and correction of angioscope image distortion[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(4): 377-379.
钟向红, 张包铮, 林美荣, 等. 血管内窥镜图像畸变的分析和校正[J]. 中国激光, 2003, 30(4): 377-379.
- [9] Lai Hanxuan, Zhang Zhengyu, Zhu Long, *et al.* Nonlinear distortion correction of camera based on linear characteristic [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021502.
赖瀚轩, 张征宇, 朱 龙, 等. 基于直线特征的摄像机非线性畸变自校正[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 021502.
- [10] Hideaki H, Yagihashi Y, Miyake Y. A new method for distortion correction of electronic endoscope images[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1995, 14(3): 548-555.
- [11] Smith W E, Vakil N, Maislin S A. Correction of distortion in endoscope images[J]. IEEE Transactions Medical Imaging, 1992, 11(1): 117-122.
- [12] Yang Biwu, Guo Xiaosong. Overview of nonlinear distortion correction of camera lens [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(3): 269-274.
杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(3): 269-274.
- [13] Su Xiaohua, Zhao Jiguang, Zhang Huixing. Research on distortion of CCD camera[J]. Physics Experimentation, 2003, 23(9): 39-41.
苏小华, 赵继广, 张慧星. CCD摄像机成像畸变的研究[J]. 物理实验, 2003, 23(9): 39-41.
- [14] Weng J, Cohen P, Herniou M. Calibration of stereo cameras using a non-linear distorsion model[C]. Atlantic City: Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition, 1990: 246-253.
- [15] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [J]. Proc IEEE Conf on Computer Vision & Pattern Recognition, 1986: 364-374.
- [16] Sun Huixian, Luo Feilu, Zhang Yuhua. Nonlinear distortion correction of endoscope images with digital technology[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(2): 92-95.
孙慧贤, 罗飞路, 张玉华. 内窥镜图像非线性畸变数字校正方法[J]. 无损检测, 2009, 31(2): 92-95.
- [17] Yao Na, Lin Zhaorong, Ren Chaofeng, *et al.* A distortion model suitable for nonlinear distortion correction of digital video camera[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022204.
姚 娜, 林招荣, 任超锋, 等. 一种适合摄像机非线性畸变校正的畸变模型[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022204.