

光子计数位置灵敏探测器畸变多项式校正

何玲平¹ 岳巾英² 刘世界¹ 陈 波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 130022)
² 长春工程学院理学院, 吉林 长春 130033)

摘要 采用多项式校正方法对光子计数位置灵敏探测器成像畸变进行校正。介绍光子计数位置灵敏探测器工作原理并分析其畸变产生原因;介绍多项式校正原理,并给出光子计数位置灵敏探测器畸变多项式校正流程;采用该方法对两种不同畸变程度的基于楔条形阳极该类探测器进行了畸变校正,校正后残余误差分别为 2.5 pixel 和 1.2 pixel。实验结果表明,多项式校正法能够有效校正光子计数位置灵敏探测器成像畸变。

关键词 探测器;畸变校正;多项式;光子计数;位置灵敏

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0604002

Polynomial Correction of Photon-Counting Position-Sensitive Detector's Distortion

He Lingping¹ Yue Jinying² Liu Shijie¹ Chen Bo¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanic and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)
² School of Sciences, Changchun Institute of Technology, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The polynomial correction method is used to correct photon-counter position-sensitive detector's distortion. The principle of these detectors is introduced and the causes of distortion are analyzed. Based on the theory of polynomial distortion correction, its correcting process in photon-counter position-sensitive detector has been proposed. According to this process, two photon-counting detectors based on a wedge-strip anode with different parameters are corrected, and the residual distortions are respectively 2.5 pixel and 1.2 pixel. The correction results show that polynomial distortion correction can be effectively applied to correction of photon-counter position-sensitive detector's imaging distortion.

Key words detectors; distortion correction; polynomial; photon counting; position sensitive

OCIS codes 040.5160; 040.7480; 040.3780; 100.3008

1 引 言

光子计数位置灵敏探测器工作于光子计数模式,能够探测单个光子及带电粒子的空间位置,通过长时间曝光实现对极其微弱目标成像。它不仅灵敏度高于一般像增强器,而且还能获得数字化图像,目前在军事、物理学、生化学和空间探测等多领域已经有了诸多成熟的应用^[1,2]。光子计数位置灵敏探测器采用微通道板(MCP)实现光电转换和电子倍增,再由位置灵敏阳极对倍增电子云位置解码。位置灵

敏阳极不像 CCD 一样具有实际像素,它对入射粒子位置确定是间接过程。受众多因素影响,光子计数位置灵敏探测器一般都存在成像畸变问题,从而降低了位置探测精度。本文采用多项式校正方法对光子计数位置灵敏探测器成像畸变进行了校正。

2 常用光子计数位置灵敏探测器及其成像畸变

根据电子云位置灵敏原理不同,位置灵敏阳极

收稿日期: 2011-12-19; 收到修改稿日期: 2012-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(10878004)资助课题。

作者简介: 何玲平(1982—),男,助理研究员,博士研究生,主要从事短波段光学仪器方面的研究。

E-mail: hlp200201@163.com

导师简介: 陈 波(1961—),男,研究员,主要从事短波光技术方面的研究。E-mail: bochen@ciomp.ac.cn

主要分为电荷量分割型及时间延迟型两种。电荷分割阳极最常见的是楔条形阳极,时间延迟阳极最常用的是延迟线阳极。

楔条形阳极由空间周期排列的矩形单元组成,每个单元内部分为楔形、条形和Z形三个不同形状电极,其中条形电极面积在 x 方向随周期线性变化,楔形电极面积在 y 方向随高度线性变化。根据位置灵敏算法对三个电极分割电荷信号处理,得到电子云质心位置。但当电子云面积过小或过大时,楔条形阳极探测器图像会出现正弦特性的调制畸变和边缘S形畸变;而电子云大小很难测量,很难匹配MCP-Anode间距、加速电压、电子云大小及阳极周期宽度等参数;且该类探测器都工作于真空中,要较好地消除这两种畸变非常麻烦。除此之外,由于三路电极之间的信号存在串扰,图像在 $x=y$ 方向被压缩、在 $x=-y$ 方向被拉伸,图像整体呈蛋形,需进一步校正^[3~5]。

时间延迟阳极探测器通过测量落在其上电荷信号向延迟线两端导出的时间差而实现对电子云位置的解码^[6]。导致延迟线阳极探测器成像畸变主要有:延迟线相互之间信号串扰及传播散射导致位置解码存在误差;延迟线电容系数及介电常数会随着温度变化导致图像的整体漂移;MCP局部的结构差别以及阳极局部区域由于厚度、传导率等参数的不同而导致的电荷传播速度差异,在图像上会带来明显的局部畸变。这些导致畸变的原因有时很难消除。

3 基于控制点的多项式畸变校正方法

通过探测器整体优化设计,或改进位置灵敏算法,光子计数位置灵敏探测器的畸变能得到一定程度的校正。但有时引起畸变原因复杂且难以定位,使得从源头解决成像畸变的方案难以实现,且整个过程也费时费力。因此,如果一种方法能够从图像本身表现出的非线性出发,而不需要关注成像畸变成因,将有效减小校正工作的难度,且能够应用于不同类型的光子计数位置探测器。

目前,应用于光学成像系统及器件成像畸变校正的方法比较多^[7~11],而多项式校正法是一种在遥感成像较常用的畸变校正方法。成像仪器通过对一组已知空间位置的控制点组成的空间几何结构成像,能够获取一幅表征该成像仪器畸变特性的图像。控制点在畸变图像中位置与实际空间位置的关系可以用一个多次多项式方程组表示为^[12~14]

$$\begin{cases} x = a(x_d, y_d) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N P_{i,j} x_d^i y_d^j \\ y = b(x_d, y_d) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N Q_{i,j} x_d^i y_d^j \end{cases}, \quad (1)$$

式中 x_d, y_d 为畸变图像中控制点的像素位置, x, y 为理想无畸变情况下该控制点的像素位置, $P_{i,j}, Q_{i,j}$ 为校正系数, N 为多项式方程组次数。成像仪器畸变越严重,多项式方程次数 N 要求越高,需要的校正系数 $P_{i,j}, Q_{i,j}$ 越多。对于一个 N 次多项式,它的校正系数 $(P_{i,j}, Q_{i,j})$ 个数为 $(N+1)^2$ 。

确定了多项式次数后,选取适量的控制点,获取其在无畸变图像中与畸变图像中的像素坐标位置 (x_d, y_d, x, y) ,通过最小二乘法原理,能够求解这些校正系数。假设选取 n 个控制点来求解校正系数,设

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{00} & \cdots & P_{0N} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{N0} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{00} & \cdots & Q_{0N} \\ \vdots & & \vdots \\ Q_{N0} & \cdots & Q_{NN} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix},$$

则根据广义逆矩阵可以求出校正系数矩阵 \mathbf{P}, \mathbf{Q} 的最小二乘估计:

$$\mathbf{P} = [\mathbf{U}^T \mathbf{U}]^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{x}; \quad \mathbf{Q} = [\mathbf{U}^T \mathbf{U}]^{-1} \mathbf{U}^T \mathbf{y}. \quad (2)$$

从方程求解的角度来说,要求解 $(N+1)^2$ 个未知数,需要的控制点最小数目为 $(N+1)^2/2$;但实际几何校正应用中,采用最小数目求解的校正矩阵的校正效果不好,一般控制点的数目要远大于其最小数目。

采用多项式畸变校正法,可以克服从畸变机理上进行校正过程中存在的成因难以分析、工作量巨大的问题。光子计数位置探测器具体的多项式校正过程如下:

- 1) 制作一个由控制点组成的成像目标;
- 2) 根据成像目标几何结构模拟生成一幅控制点无畸变理想图像;
- 3) 光子计数位置探测器对成像目标成像,得到一幅表征探测器成像畸变的图像;
- 4) 提取足够数量的特征控制点,在无畸变图像和畸变图像中的位置 (x_d, y_d, x, y) ;
- 5) 应用最小二乘法对多项式校正系数进行估值求解,得到校正矩阵 \mathbf{P}, \mathbf{Q} ;
- 6) 由于校正后图像大小可能变化,校正前先对

畸变图像进行包络处理；根据畸变校正多项式将畸变图像变换至无畸变坐标系中；

7) 对校正图像进行重采样, 给校正后没有灰度赋值的像元按双向线性内插法对其进行赋值。

4 楔条形阳极光子计数位置探测器畸变校正

为了验证基于控制点的多项式校正法对光子计数位置探测器成像畸变校正的有效性, 对实验室已有的楔条形阳极光子计数位置探测器进行校正实验。该探测器采用两片 MCP “V”型叠加的结构, 其 MCP 口径 38 mm, 微通道口径 $12\ \mu\text{m}$, 工作电压为 2700 V, 电子增益约为 5×10^6 ; 圆形楔条形阳极 (wedge-strip anode) 电子云收集区口径为 42 mm, 周期宽度为 1 mm, MCP-Anode 之间电压 300 V。

如第 2 节分析, 楔条形阳极探测器存在的畸变

主要有电子云过大带来的 S 形畸变、电子云过小带来的正弦畸变以及电极信号串扰带来的对角压缩畸变。为了解该套探测器成像性能, 进行了成像性能测试。在探测器前面放置一块 USAF 1951 分辨率板, 平行光将其像投影在 MCP 表面, 探测采集该分辨率板的投影像。为了便于对比, 改变探测器中 MCP 与楔条形阳极间距, 从而使得探测器具有了不同的畸变程度。分别获得两种畸变程度下的分辨率板图像, 图 1(a) 为 MCP-Anode 间距为 15 mm 时所成图像, 图 1(b) 为 MCP-Anode 间距为 10 mm 时所成图像。由于 MCP 与楔条形阳极间距较大, 电子云过小带来的正弦畸变不明显, 但都有较明显的边缘畸变, 其中由于电子云更大导致图 1(a) 边缘畸变更严重; 由于电极信号串扰的存在, 两幅图像都存在明显的整体畸变。

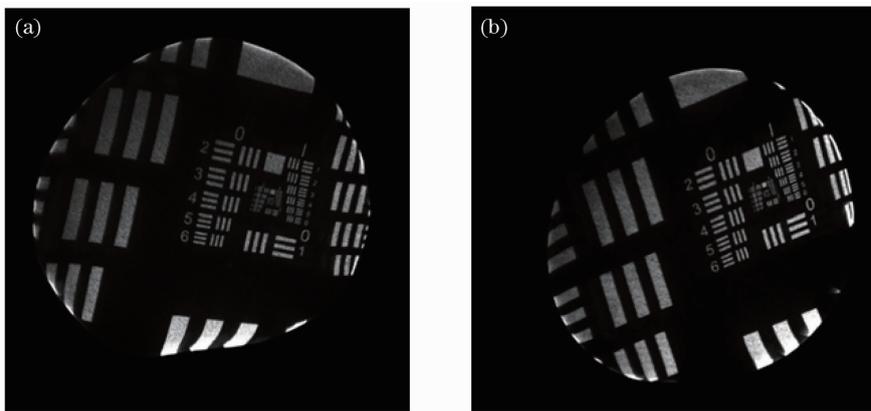


图 1 不同畸变程度分辨率板图像。(a) MCP-Anode 间距 15 mm; (b) MCP-Anode 间距 10 mm

Fig. 1 Resolution-plate images in different distortions. (a) MCP-Anode distance 15 mm; (b) MCP-Anode distance 10 mm

要采用多项式法校正探测器的成像畸变, 首先需要易于选取控制点的无畸变图像和畸变图像。制作了一块口径 42 mm、孔间距 1 mm 的针孔阵列目标板。首先, 按照该针孔阵列的几何结构(间距、孔大小和数量等)编写程序模拟生成一幅理想的无畸变图像如图 2 所示; 然后, 在探测器前方安置该针孔阵列目标板, 采集目标板投影图像, 完成对探测器畸变情况的采样。与前述分辨率板对应, 采集了 MCP-Anode 间距分别为 15 mm 和 10 mm 时探测器的针孔阵列畸变图像, 如图 3 所示。

按照一定采样间隔在生成的无畸变图像与畸变图像上均匀选取一一对应的控制点, 读取它们的像素位置。由于图像局部存在非线性畸变, 为了以较

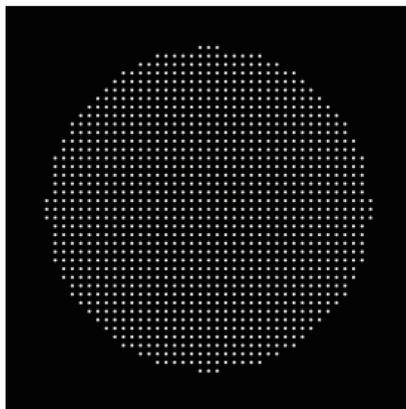


图 2 生成无畸变针孔目标图像

Fig. 2 Produced holes image without distortion

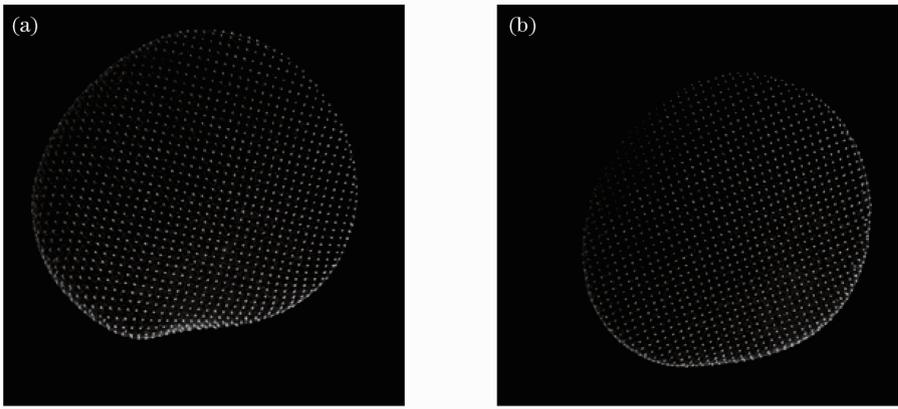


图 3 不同畸变程度针孔图像。(a) MCP-Anode 间距 15 mm; (b) MCP-Anode 间距 10 mm

Fig. 3 Hole images in different distortions. (a) MCP-Anode distance 15 mm; (b) MCP-Anode distance 10 mm

高精度校正图像,采用 $N=4$ 较高次数的多项式来校正该探测器。按照最少控制点要求,四次多项式的求解控制点数不能少于 25 点,实际运用时要求选取的控制点数量远多最少控制点数;本文在探测器 MCP-阳极间距为 15 mm 时选取了 150 对控制点,在探测器 MCP-阳极间距为 10 mm 时选取了 120 对控

制点。采用最小二乘法对这些控制点对进行处理,求解出这两种状态下探测器的校正系数矩阵。按照第三节中的流程,对畸变图像进行了校正,图 4(a)、图 5(a)是对点阵畸变图像校正图像,图 4(b)、图 5(b)是对分辨率板畸变图像校正图像。

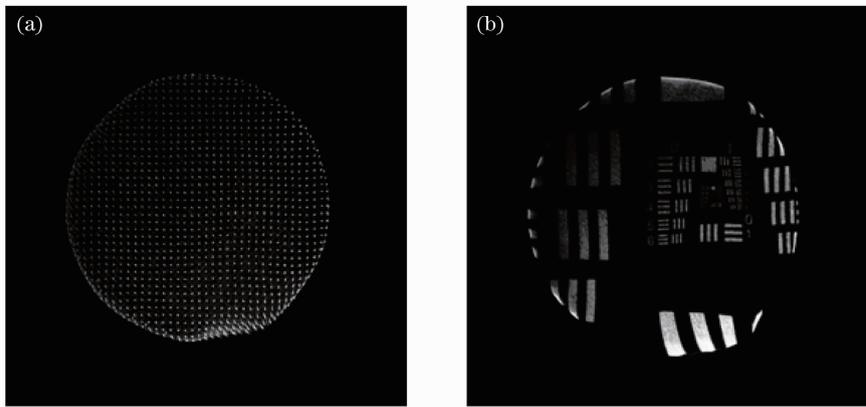


图 4 MCP-Anode 间距 15 mm 时畸变校正图像。(a)小孔图像; (b) USAF 1951 图像

Fig. 4 Distortion-corrected images with MCP-Anode distance 15 mm. (a) Holes image; (b) USAF 1951 image

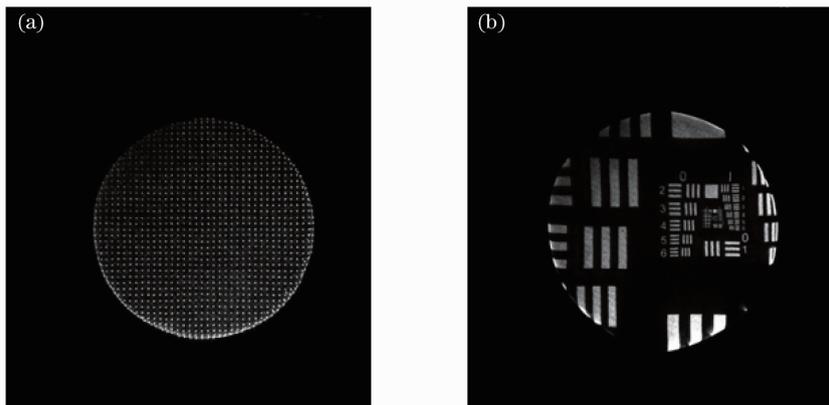


图 5 MCP-Anode 间距 10 mm 时畸变校正图像。(a)小孔图像; (b) USAF 1951 图像

Fig. 5 Distortion-corrected images with MCP-Anode distance 10 mm. (a) Holes image; (b) USAF 1951 image

一般来说,对于线性畸变,采用一次多项式校正就可以;对于非线性畸变(如本文探测器的正弦畸变和边缘S畸变),则需要多次多项式进行校正,且次数随非线性程度增加。为了比较不同次数多项式畸变校正效果,本文对MCP-Anode间距10 mm时探测器采集的针孔阵列图像分别进行了二次多项式及

三次多项式校正,校正图像如图6所示。从图像中可以看出,二次校正基本消除了探测器的对角线畸变,但还残留有一定程度的边缘S形畸变,三次校正后边缘S形畸变也基本消除,而四次校正后图像中的正弦调制畸变也有所减少。

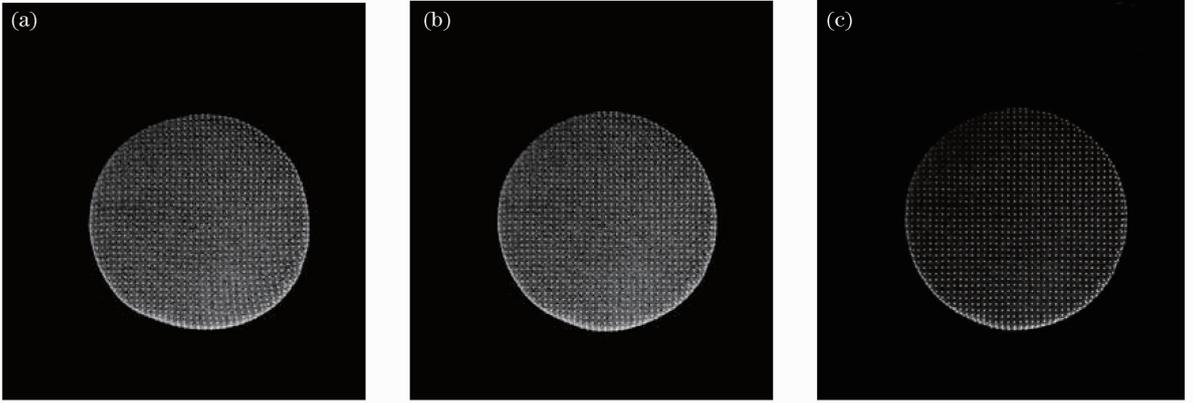


图6 不同次数多项式校正图像。(a)二次校正;(b)三次校正;(c)四次校正

Fig. 6 Polynomial-corrected images with different orders. (a) 2nd; (b) 3rd; (c) 4th

为评估校正后效果,计算图像中小孔位置与无畸变位置偏差

$$E = \sqrt{(x_c - x)^2 + (y_c - y)^2}. \quad (3)$$

由于计算量较大,对图像中的100个小孔位置的偏

离情况进行计算并以其平均值来表征图像的畸变。两种情况下采用多项式畸变校正方法的校正效果如表1所示。

表1 校正前后探测器畸变

Table 1 Detector distortion before and after correction

	Residual error /pixel			
	Before correction	2nd correction	3rd correction	4th correction
MCP-Anode distance 15 mm	16	—	—	2.5
MCP-Anode distance 10 mm	12	3.7	2.1	1.2

MCP-Anode间距15 mm时探测器图像右下角边缘畸变较严重,图像畸变校正后残余畸变主要集中在这一区域。如要进一步改善图像的畸变,可以在后续的工作中制作密度更大的针孔阵列,对该部分图像进行较密集的控制点采样,进行局部区域的多项式畸变校正。

5 结 论

光子计数位置灵敏探测器广泛应用于各种微光探测及粒子位置探测领域。为消除这类探测器存在的畸变,介绍了基于控制点的多项式畸变校正法原理,提出用这种方法对光子计数位置灵敏探测器进行畸变校正。采用该方法对楔条形阳极光子计数探测器进行畸变校正,校正结果表明该方法对这一类探测器的畸变校正有效的。

参 考 文 献

- 1 B. R. Sandel, A. L. Broadfoot, C. C. Curtis *et al.*. The extreme ultraviolet imager investigation for the image mission [J]. *Space Sci. Rev.*, 2000, **91**(1): 197~242
- 2 Masato Nakamura, Tatsundo Yamamoto, Koichiro Tsuruda *et al.*. Interplanetary He II extreme-ultraviolet observation on PLANET-B [J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(12): 3033~3037
- 3 C. Martin, P. Jelinsky, M. Lampton *et al.*. Wedge-and-strip anode for centroid-finding position-sensitive photon and particle detectors [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1981, **52**(7): 1067~1074
- 4 O. H. W. Siegmund, M. Lampton, J. Bixler *et al.*. Operational characteristics of wedge and strip image readout system [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1989, **33**(1): 724~727
- 5 Ning Chuangang, Ren Xueguang, He Yao *et al.*. Wedge-strip anode position-sensitive detector for electron momentum spectroscopy [J]. *J. Tsinghua University*, 2004, **44**(9): 1290~1292
宁传刚,任雪光,何姚等.楔条形位置灵敏探测器的特性[J].清华大学学报,2004, **44**(9): 1290~1292
- 6 O. H. W. Siegmund, J. M. Stoek, D. R. Marsh *et al.*. Delay line detectors for the UVCS and SMMER Instruments on the SOHO satellite [C]. *SPIE*, 1994, **2280**: 89~100
- 7 Ge Baozhen, Li Xiaojie, Qiu Shi. Camera lens distortion

- correction based on coplanar point direct liner transformation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 488~493
- 葛宝臻, 李晓洁, 邱 实. 基于共点面直接线性变换的摄像机畸变校正[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 488~493
- 8 Huo Ju, Yang Wei, Yang Ming. A self-calibration technique based on the geometry property of the vanish point [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 465~472
- 霍 炬, 杨 卫, 杨 明. 基于消失点几何特性的摄像机自定标[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 465~472
- 9 Huang Tao, Zhu Qiudong, Hao Qun *et al.*. Study on distortion elimination in stereoscopic display systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 405~410
- 黄 涛, 朱秋东, 郝 群 等. 立体显示系统的消畸变研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 405~410
- 10 Yuan Yun, Zhu Zhaokun, Zhang Xiaohu *et al.*. A stepwise method for camera calibration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 111501
- 苑 云, 朱肇昆, 张小虎 等. 一种逐级标定相机参数的方法[J]. *激光与光电子进展*, 2010, **47**(11): 111501
- 11 Zhu Jia, Li Xingfei, Xu Yingxin. Camera calibration technique based on active vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1297~1303
- 朱 嘉, 李醒飞, 徐颖欣. 摄像机的一种主动视觉标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1297~1303
- 12 A. P. Hammersley, S. O. Svensson, A. Thompson. Calibration and correction of spatial distortion in 2D detector system [J]. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, 1994, **346**(1-2): 312~321
- 13 R. R. Liu, S. Rudin, D. R. Bednarek. Super-global distortion correction for a rotational C-arm X-ray image intensifier [J]. *Med. Phys.*, 1999, **26**(9): 1802~1810
- 14 Ai Lili, Yuan Feng, Ding Zhenliang. Further study on radial distortion model for photographic objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1930~1933
- 艾莉莉, 袁 锋, 丁振良. 照相物镜径向畸变模型的再商讨[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1930~1933

栏目编辑: 何卓铭