

AOTF 相机成像过程中的图像畸变分析及校正研究

吕 泽^{1,2}, 陈友华^{1,2}, 薛 鹏^{1,2}, 王志斌^{1,2}, 陈媛媛^{1,2}¹中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051;²中北大学教育部仪器科学与动态测试重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 针对声光可调谐滤波器(AOTF)自身固有的因声光互作用导致的成像畸变问题,利用 AOTF 的解析表达式和几何像差公式对 AOTF 相机的畸变特性进行分析,建立了声光互作用图像畸变模型,给出了各畸变系数随入射光传播角的变化关系;并在所构建畸变模型的基础上,结合两步标定法和双线性内插法对畸变图像进行校正分析。实验结果表明,未加 AOTF 相机系统拍摄图像的最大畸变像素位移量为 1.6 pixel,加 AOTF 相机系统拍摄图像的最大畸变像素位移量为 9.0 pixel,畸变校正后的最大畸变像素位移量为 1.4 pixel,优于未加 AOTF 相机系统所拍摄的图像。该畸变模型较好地描述了 AOTF 相机的畸变产生机理及特性,该方法可以有效地解决 AOTF 相机成像过程中的图像畸变问题,在 AOTF 光谱相机的精确测量方面将有较好的应用前景。

关键词 成像系统; 声光可调谐滤波器; 图像畸变; 模型可视化; 畸变校正

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.091101

Image Distortion Analysis and Correction Study of
AOTF Camera Imaging ProcessLü Ze^{1,2}, Chen Youhua^{1,2}, Xue Peng^{1,2}, Wang Zhibin^{1,2}, Chen Yuanyuan^{1,2}

¹Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²Key Laboratory of Ministry of Education for Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract Aiming at the problem of the imaging distortion caused by the acousto-optic interaction, which is inherent in acousto-optic tunable filter (AOTF), the distortion characteristic of AOTF camera is analyzed by AOTF analytic expressions and geometric aberration formulas. The image distortion model of the acousto-optic interaction is established, and the relationship between the distortion coefficient and the incident light propagation angle is showed. The two-step calibration method and the bilinear interpolation method are employed to correct and analyze the distorted image based on the constructed distortion model. The experimental results show that the maximum distortion pixel displacement of the image captured by the no-AOTF camera system is 1.6 pixel, while the maximum distortion pixel displacement of the image captured by the AOTF camera system is 9.0 pixel. The maximum distortion pixel displacement is 1.4 pixel after distortion image is corrected, which is better than the image captured by the no-AOTF camera system. The distortion model is introduced to describe the distortion mechanism and characteristics of AOTF camera. The distortion correction method can solve the problem of image distortion of AOTF camera imaging process effectively, and it has a good application prospect in the accurate measurement of AOTF spectrum camera.

Key words imaging systems; acousto-optic turnable filter; image distortion; model visualization; distortion correction

OCIS codes 110.2960; 230.1040; 100.2000

收稿日期: 2017-03-13; **收到修改稿日期:** 2017-04-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61505179)、山西省自然科学基金青年基金(201601D021079)

作者简介: 吕 泽(1993—),女,硕士研究生,主要从事激光告警技术方面的研究。E-mail: lz621851367@163.com

导师简介: 陈友华(1986—),男,博士,副教授,主要从事高速光谱探测等方面的研究。

E-mail: chenyh@nuc.edu.cn(通信联系人)

1 引言

声光可调谐滤波器(AOTF)利用各向异性介质中的声光衍射原理制成,近几年来被广泛应用于成像光谱技术中。相对于利用棱镜及光栅等色散元件进行分光的传统成像光谱系统,基于 AOTF 的光学成像系统具有无活动部件、环境适应性好、衍射效率高、结构简单等优点^[1-2],被认为是下一代成像光谱技术的重要发展方向。基于 AOTF 的成像系统具有高空间分辨率和光谱分辨率,并且对于图像光谱滤波具有相当良好的效果,该滤波器已被广泛应用于显微镜^[3]、内窥镜等系统中^[4-5]。

图像畸变会直接影响成像几何位置的准确性,并且几何位置的精度会随着被测量物体的对应像点到光轴距离的不同而变化,从而导致被测量物体的像点畸变不同,使得成像图像的大小和形状发生变化,并且降低图像质量^[6]。畸变的存在极大地影响了图像的辨认和图像的测量,甚至会造成错误判断。因此,在一些定量分析领域,需要对畸变图像进行校正分析。对于图像畸变处理,Haneishi 等^[7]采用栅格状的校正模板,通过变化栅格节点位置实现畸变校正。刘航等^[8]利用点阵样板校正方法,将二维变换问题转变为一维变换问题,采用多项式参数求解的方式校正畸变图像的几何位置。Tsai^[9]使用典型的两步法进行畸变校正,仅考虑了摄像机的径向畸变,而没有考虑其切向畸变。Pozhar 等^[10]仅提出 AOTF 成像畸变。华希俊等^[11]结合切向畸变对摄像机畸变模型进行了分析。对于 AOTF 光谱相机而言,其成像过程中引入畸变主要由两方面原因造成:1) 相机成像系统本身的设计误差以及装配工艺水平等因素^[12];2) 超声波使单轴晶体中的光束发生衍射现象。前者与普通相机的图像畸变性质相同,后者则是 AOTF 光谱相机本身所固有问题,但尚未有专门的数理模型与之对应。

因此,本文分析了 AOTF 固有畸变的成因,并重点利用 AOTF 的解析表达式、几何像差公式,建立了 AOTF 内晶体的声光相互作用所引起的图像畸变模型,对 AOTF 光谱相机本身所固有的畸变特性进行了分析,并在构建畸变模型基础上,利用经典两步标定法、双线性内插法^[12]对畸变图像进行校正分析。

2 AOTF 系统畸变的产生原理分析

AOTF 的工作原理如图 1 所示。当入射光波矢量 \mathbf{k}_{inc} 、衍射光波矢量 \mathbf{k}_{dif} 和超声波矢量 \mathbf{q} 形成一个矢量三角形,即满足动量匹配条件 $\mathbf{k}_{\text{inc}} + \mathbf{k}_{\text{dif}} = \mathbf{q}$ 时,会使相应的光波发生衍射现象,并产生波失配矢量 $\Delta\mathbf{k} = \mathbf{k}_{\text{inc}} - \mathbf{q} - \mathbf{k}_{\text{dif}}$,其中 \mathbf{k}_{inc} 、 \mathbf{q} 和 \mathbf{k}_{dif} 分别对应于入射光、超声波的中心方向和最小波矢量的方向。

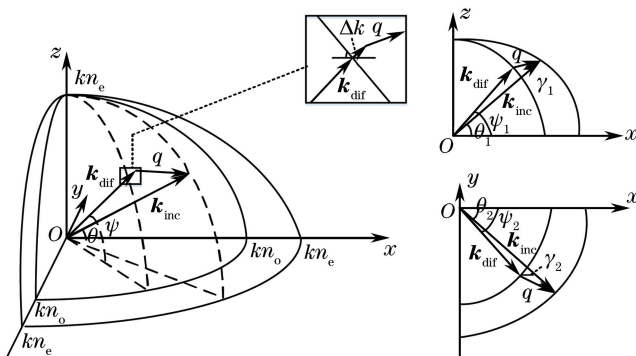


图 1 各向异性声光衍射的波形图

Fig. 1 Waveform of anisotropic acousto-optic diffraction

如图 2 所示,同一空间目标经过 AOTF 后,由于存在相对于中心衍射波的其他光波,因此其分布在临近的面阵探测器像元 (x_i, y_j) 上,其中, $1 \leq i \leq 2560$, $1 \leq j \leq 2160$ 。不仅有理想情况下目标 (x_i, y_j) 在中心波长 λ_s 的光,还有 (x_i, y_j) 附近目标非中心波长的光到达该面阵探测器像元 (x_i, y_j) 。

AOTF 系统造成图像畸变的根本原因是光的衍射现象,当复色光垂直入射到 AOTF 上时,相对于衍射光的其他光波波长 $\lambda = \lambda_s + \Delta\lambda$ 以及方向 $\theta_1 = \theta_{1s} + \Delta\theta_1$ 和 $\theta_2 = \theta_{2s} + \Delta\theta_2$ 会发生衍射。AOTF 系统产生的图像畸变主要为以下两个方面:1) 如图 3(a)所示, $\Delta\psi_i (\Delta\theta_1, \Delta\theta_2) = \psi_i (\theta_1 + \Delta\theta_1, \theta_2 + \Delta\theta_2) - \psi_i (\theta_1, \theta_2)$ (其中 $i=1, 2$) 使得畸变图像的每个像素相对原始图像发生位移变化;2) 如图 3(b)所示,畸变图像强度 $T(\theta_1, \theta_2) =$

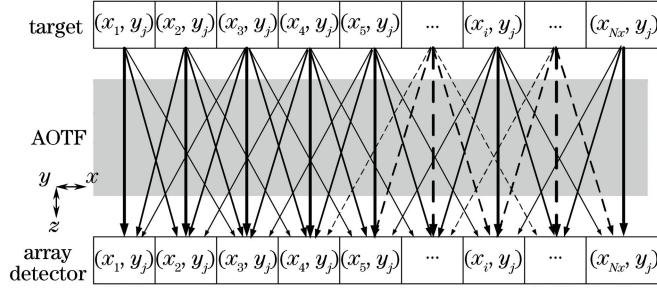


图2 目标经 AOTF 后成像示意图

Fig. 2 Imaging schematic of target after AOTF

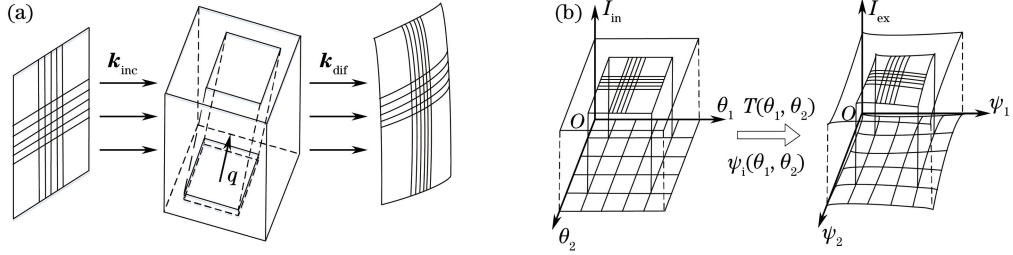


图3 AOTF 造成的图像畸变。(a)空间变换;(b)强度变换

Fig. 3 Image distortion caused by AOTF. (a) Spatial transformation; (b) intensity transformation

$I_{ex} [\psi_i(\theta_1, \theta_2)] / I_{in}(\theta_1, \theta_2)$ 发生变化。对于一个无畸变的理想 AOTF, $\Delta\psi_i = \Delta\theta_i$, $T(\theta_1, \theta_2)$ 为常数。

3 AOTF 系统畸变模型

3.1 基本表达式

在非共线 AOTF 结构中,入射光进入晶体后被分解成 o 光和 e 光,其衍射角度 ψ_1 、 ψ_2 通过入射角度 θ_1 、 θ_2 ,光波波长 λ ,声波角度 γ_1 、 γ_2 ,声波波长 Λ 表示为^[13-14]

$$\psi_1 = \arctan \left\{ \frac{\xi(\theta_1) \sin \theta_1 - \eta \sin \gamma_1}{\sqrt{[\xi(\theta_1) \cos \theta_1 - \eta \cos \gamma_1]^2 + 2\eta\xi(\theta_1) \cos \theta_1 \cos \gamma_1 [1 - \cos(\theta_2 - \gamma_1)]}} \right\}, \quad (1)$$

$$\psi_2 = \arctan \left[\frac{\xi(\theta_1) \cos \theta_1 \sin \theta_2 - \eta \cos \gamma_1 \sin \gamma_2}{\xi(\theta_1) \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \eta \cos \gamma_1 \cos \gamma_2} \right], \quad (2)$$

式中 n_o 和 $n_e(\theta_1)$ 分别为 o 光折射率和 e 光折射率,双折射参数 $\xi(\theta_1) = n_e(\theta_1)/n_o = \xi_0 / \sqrt{\cos^2 \theta_1 + \xi_0^2 \sin^2 \theta_1}$, 光谱参数 $\eta = q/(kn_o) = \lambda/(\Lambda n_o)$ 。大角度入射光束的 AOTF 结构,如图 4 所示,若入射光和衍射光表面的切线平行,则在 XOZ 面上满足 $\Delta k = 0$ 的光波的衍射波最大角和声波角度为

$$\tan \phi_{1w} = \xi_0^2 \tan \theta_{1w}, \quad (3)$$

$$\tan \gamma_{1w} = - \frac{\xi_0 \tan \theta_{1w}}{\sqrt{(\xi_0^4 \tan^2 \theta_{1w} + 1) (\xi_0^2 \tan^2 \theta_{1w} + 1) + \xi_0^3 \tan^2 \theta_{1w}}}. \quad (4)$$

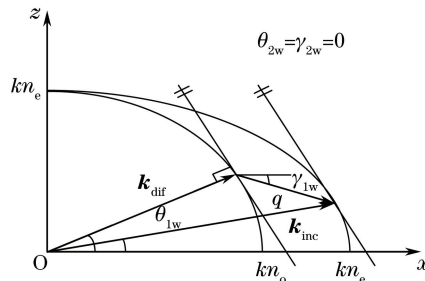


图4 声光相互作用波形图

Fig. 4 Waveform of acousto-optic interaction

3.2 AOTF 的几何像差

AOTF 成像系统造成的图像畸变是 $I_{\text{inc}}(\Delta\theta_1; \Delta\theta_2)$ 转变为 $I_{\text{dif}}(\Delta\psi_1; \Delta\psi_2)$ 的过程, 其中, $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_i^0$, $\Delta\psi_i = \psi_i - \psi_i^0$, θ_i^0 和 ψ_i^0 分别是中心波的入射角和衍射角。在非共线大角度入射光束的 AOTF 结构中, 中心波在极性面($\theta_2^0 = 0$)上传播, 角度 θ_1^0 由声波角度 γ_1 通过(4)式确定, 而畸变图像相对于 $\Delta\psi_2$ 对称。

AOTF 成像系统造成的图像畸变由(1)和(2)式进行描述, 当入射光孔径 $\delta\theta_i$ 和衍射光孔径 $\delta\psi_i$ 为 $2^\circ \sim 5^\circ$ 时, 则入射角偏差 $|\Delta\theta_i| \ll 1$, 膨胀变形 $\Delta\psi_i$ 为

$$\Delta\psi_i(\Delta\theta_1, \Delta\theta_2) = \Delta\theta_i + b_{i1}\Delta\theta_1 + b_{i2}\Delta\theta_2 + c_{i11}\Delta\theta_1^2 + c_{i12}\Delta\theta_1\Delta\theta_2 + c_{i22}\Delta\theta_2^2. \quad (5)$$

以材料 TeO_2 制作非共线 AOTF, 图 5 所示为入射光波长为 633 nm, 孔径为 2° 时, 系数 b_{ij} 和 c_{ij} 随角度 θ_{1w} 变化的趋势。在图 5 中, 系数 b_{11} 和 b_{22} 对应于图像的缩放比例, 系数 b_{12} 和 b_{21} 对应于图像的旋转方向, 系数 c_{ij} 对应于非线性二次型失真, 交叉项 c_{112} 和 c_{212} 使得畸变图像具有明显的不对称性, 特别是在图像的边缘。

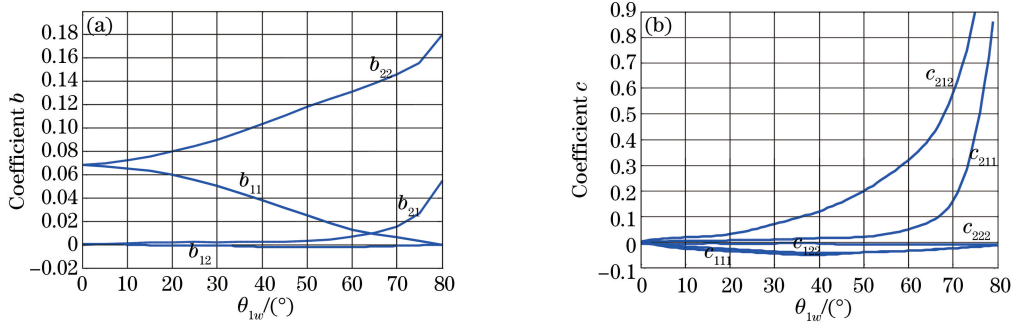


图 5 系数 b_{ij} 和 c_{ij} 与角度 θ_{1w} 关系图。(a) 系数 b_{ij} 与角度 θ_{1w} 关系图; (b) 系数 c_{ij} 与角度 θ_{1w} 关系图

Fig. 5 Relation of coefficient b_{ij} , c_{ij} and angle θ_{1w} . (a) Relation of coefficient b_{ij} and angle θ_{1w} ; (b) relation of coefficient c_{ij} and angle θ_{1w}

由于入射光进入 AOTF 成像系统后, 临近中心衍射波的光会造成成像干扰, 即如(5)式衍射角展宽导致图像膨胀变形, 并降低了图像的分辨率。对于畸变成像过程, 图像平面上实际像点 $P_i(x_d, y_d)$ 偏离理想位置 $P_i(x_u, y_u)$ 的关系为^[15]

$$\begin{cases} x_u = x_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 x_d y_d + p_2 (r^2 + 2x_d^2) \\ y_u = y_d(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1 (r^2 + 2y_d^2) + 2p_2 x_d y_d \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $r^2 = x_d^2 + y_d^2$, k_1, k_2, p_1, p_2 分别为径向畸变系数和切向畸变系数。

4 实验结果与分析

为了研究 AOTF 光谱相机成像过程中的图像畸变问题, 实验采用北京凌云光公司研发的 CCD 照相机(波长范围为 370 ~ 1100 nm, 分辨率大小为 2560 pixel \times 2160 pixel) 和美国 BRIMROSE 公司研发的 IS310-0.45-0.80 型 AOTF(波长范围为 450 ~ 800 nm, 光谱分辨率为 2 ~ 10 nm), 由已知相邻十字中心 $d = 20$ mm 的网格板获得图像畸变数据, 并把该数据直接存入计算机用于对实测图像进行畸变校正。该检测网格板的实测图像如图 6 所示。

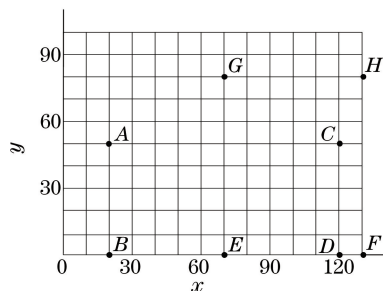


图 6 实测网格板图

Fig. 6 Measured image of grid board

基于 AOTF 成像系统的畸变校正过程如下,将图像像素坐标 (x, y) 逆映射转换成归一化 $(z_c = 1)$ 处的相机坐标 (x_c, y_c) ,利用两步标定法求出畸变系数,在基于 AOTF 成像系统和光学成像系统畸变模型的基础上,并由畸变模型公式对畸变图像进行校正,再将得到的校正相机坐标转换成图像像素坐标。与此同时,利用双线性插值法进行灰度校正。根据上述方法,得到 AOTF 成像系统的畸变校正模型参数如表 1 所示。成像系统存在畸变,为了得到畸变模型对被测图像的影响,根据畸变校正参数实现畸变模型的可视化,即可查看图像上像素的畸变影响,图 7 直观地显示了基于 AOTF 成像系统中图像的畸变情况。

表 1 畸变模型校正参数

Table 1 Correction parameters of distortion model

Parameter value	Parameter							
	f_x/pixel	f_y/pixel	C_x/pixel	C_y/pixel	k_1/mm^{-2}	k_2/mm^{-4}	p_1/mm^{-1}	p_2/mm^{-1}
Parameter value	2273.31932	2147.76481	302.65509	399.46430	0.39932	-15.47410	-0.01827	-0.01031
Pixel error	± 57.04111	± 77.04400	± 23.53072	± 20.76203	± 0.14010	± 4.19902	± 0.00503	± 0.00563

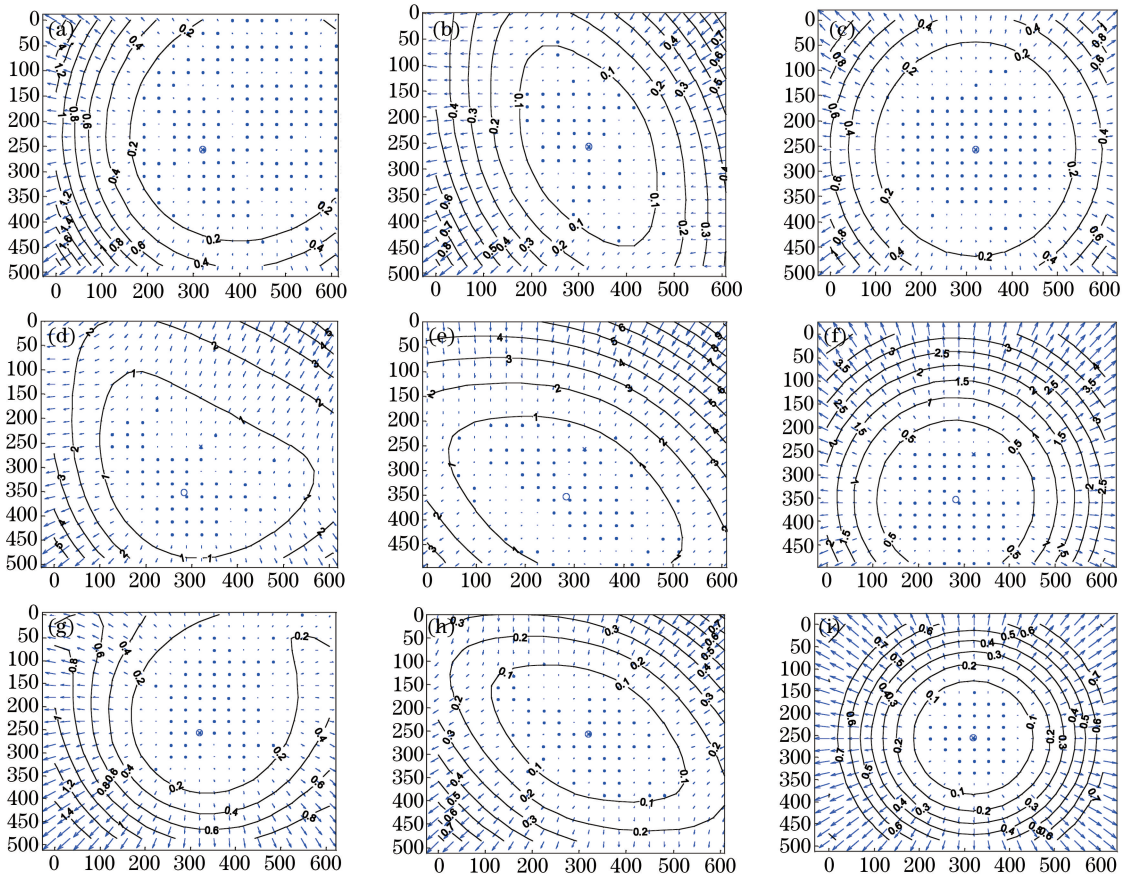


图 7 成像系统畸变模型可视化。(a)无 AOTF 相机系统总畸变;(b)无 AOTF 相机系统切向畸变;

(c)无 AOTF 相机系统径向畸变;(d)AOTF 相机系统总畸变;(e)AOTF 相机系统切向畸变;(f)AOTF 相机系统径向畸变;

(g)校正图像总畸变;(h)校正图像切向畸变;(i)校正图像径向畸变

Fig. 7 Distortion model visualization of imaging system. (a) Complete distortion of no-AOTF camera system; (b) tangential distortion of no-AOTF camera system; (c) radial distortion of no-AOTF camera system; (d) complete distortion of AOTF camera system; (e) tangential distortion of AOTF camera system; (f) radial distortion of AOTF camera system; (g) complete distortion of corrected image; (h) tangential distortion of corrected image; (i) radial distortion of corrected image

图 7(a)显示了无 AOTF 的成像系统对图像的整体影响,图中箭头表示畸变造成的实际位移,则图像边界上的点位移差不多为 1.6 pixel;图 7(b)显示了畸变模型的切向分量对图像的影响;图 7(c)显示了畸变模型的径向分量对图像的影响,此时图像最大像素位移只有 1 pixel 左右。像素的点位移很小,因此可认为在无 AOTF 的

成像系统中对图像的整体影响可忽略不计,即图像不存在畸变。图 7(d)显示了基于 AOTF 成像系统对图像的整体影响,可以得到图像边界上的点位移差不多为 5 pixel;图 7(e)显示了图像边界上的点位移为 9 pixel;图 7(f)显示了图像右上角产生的最大像素为 4 pixel 左右;图 7(g)显示了对基于 AOTF 成像系统的畸变图像进行校正的整体情况,则图像边界上点位移为 1.4 pixel;图 7(h)和(i)中像素的点位移均为 0.7 pixel。

图 8(a)和图 8(b)分别为在无 AOTF 系统和有 AOTF 系统的情况下,相机拍摄得到的实测图像,并将 AOTF 系统拍摄的存在畸变的图像进行校正如图 8(c)所示。由图 8 可知,AOTF 系统拍摄的图像存在畸变,表 2 为实测的部分数据,其中 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别为图 6 中坐标点 A 和 B、C 和 D、E 和 F、G 和 H 之间的像素距离。假设畸变图像中央相邻 20 mm 处畸变可忽略不计,分别求出畸变图像像素对应的实际距离,并且计算其余坐标点之间的距离。如表 2 所示,AOTF 相机系统拍摄图像相比无 AOTF 相机系统拍摄图像存在 9 pixel 左右的像素位移,畸变图像进行校正后的像素总位移是 2 pixel 左右。

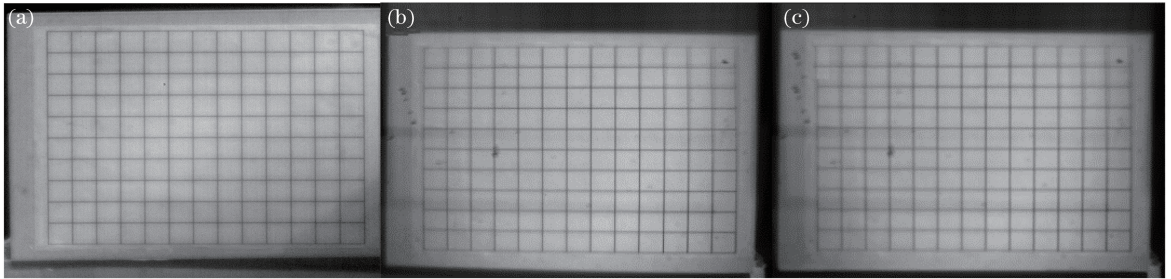


图 8 实验结果图。(a)无 AOTF 系统成像图;(b) AOTF 系统成像图;(c)校正效果图

Fig. 8 Experimental results. (a) Imaging result of no-AOTF system;
(b) imaging result of AOTF system; (c) corrected image

表 2 畸变图像检测结果

Table 2 Detection result of distorted image

Pixel distance	Imaging result of no-AOTF camera system /pixel	Imaging result of AOTF camera system /pixel	Corrected image
L_1	200	208	203
L_2	200	211	201
L_3	200	209	202
L_4	200	213	203

5 结 论

利用 AOTF 的解析表达式和几何像差公式对 AOTF 相机本身所固有的畸变特性进行分析,建立了声光互作用图像畸变模型,给出了各畸变系数随入射光传播角的变化关系,并利用网格板结合光学成像系统和畸变校正模型,对畸变图像进行了校正。结果表明,所提畸变模型结合校正办法可以较好地解决 AOTF 相机成像时的图像畸变问题,且所建畸变模型可以直观地表示出畸变量对图像的影响,校正结果优于无 AOTF 系统拍摄的图像。

参 考 文 献

- [1] Liu Jifan, Ma Yanhua, Zhang Lei, *et al.* New hyperspectral imaging system based on AOTF[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3065-3069.
刘济帆, 马艳华, 张雷, 等. 基于 AOTF 的新型成像光谱系统[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 3065-3069.
- [2] Wang J Y, He Z P, Shu R. Design and applications of space-borne imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter (AOTF)[J]. *SPIE*, 2010, 7857: 78570N.
- [3] Jiang Yi, Zeng Libo, Wu Qiongshui, *et al.* Microscopic spectral imaging based on an acousto-optic tunable filter[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(2): 193-195.

- 江 益, 曾立波, 吴琼水, 等. 基于声光可调谐滤波器的显微光谱成像技术[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 193-195.
- [4] Machikhin A, Pozhar V, Batshev V. Acousto-optic video spectrometer module for medical endoscopic studies [J]. Journal of Optical Technology, 2013, 80(7): 439-443.
- [5] Gao Qiang, Zhang Chunguang, Wang Hao, *et al.* Hyperspectral imaging of human gastric parietal cells based on narrowband AOTF[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122205.
高 强, 张春光, 王 号, 等. 基于窄带 AOTF 人体胃壁细胞组织的超光谱显微成像[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122205.
- [6] Zhou Qianfei, Liu Jinghong, Li Gang. Error analysis of geometric distortion correction of oblique images for array CCD aerial cameras[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(s1): 1-8.
周前飞, 刘晶红, 李 刚. 面阵 CCD 航空相机斜视图像几何畸变校正误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(s1): 1-8.
- [7] Haneishi 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.
- [8] Liu Hang, Yu Daoyin, Du Ji, *et al.* Distortion correction of the wide-angle optical system with digital technology[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(8): 1108-1112.
刘 航, 郁道银, 杜 吉, 等. 广角成像系统光学畸变的数字校正方法[J]. 光学学报, 1998, 18(8): 1108-1112.
- [9] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.
- [10] Pozhar V, Machihin A. Image aberrations caused by light diffraction via ultrasonic waves in uniaxial crystals [J]. Applied Optics, 2012, 51(19): 4513-4519.
- [11] Hua Xijun, Xia Lechun, Gao Fuxue, *et al.* Camera calibration for model visualization with tangential distortion[J]. Journal of Engineering Graphics, 2009, 30(3): 121-125.
华希俊, 夏乐春, 高福学, 等. 带切向畸变的模型可视化摄像机标定[J]. 工程图学学报, 2009, 30(3): 121-125.
- [12] Fang Suping, Xia Xiaohua, Xiao Yan, *et al.* Lens Distortion calibration method for linear array cameras[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(1): 11-14.
方素平, 夏晓华, 肖 燕, 等. 一种线阵相机镜头畸变的标定方法[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(1): 11-14.
- [13] Machikhin A, Pozhar V, Batshev V. Double-AOTF-based aberration-free spectral imaging endoscopic system for biomedical applications[J]. Journal of Innovative Optical Health Sciences, 2015, 8(3): 1541009.
- [14] Machikhin A S, Pozhar V E. Image transformation caused by wide-angle acousto-optic interaction [J]. Quantum Electronics, 2010, 40(9): 837-841.
- [15] Lin J M, Xing M L, Sha D G, *et al.* Distortion measurement of CCD imaging system with short focal length and large-field objective[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(10): 1137-1144.