

# 基于图像处理的自准直检焦方法

李启辉<sup>1,2</sup>, 丁亚林<sup>1\*</sup>, 修吉宏<sup>1</sup>, 刘重阳<sup>1,2</sup>, 蔡一铭<sup>1,2</sup>, 廖劲峰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对传统检焦法复杂度高、稳定性差等问题, 提出一种基于图像处理的自准直检焦方法。通过自准直法与图像处理相结合的方法来提高检焦系统的适应性与检焦精度; 利用系统离焦距离增大引起成像分辨率降低特性, 设计空间频率连续变化的辐射状靶标, 避免靶标在系统离焦后对比度变化小的问题。仿真实验选用清晰度评价函数算子计算不同靶标离焦序列图的特征值曲线, 结果表明辐射状靶标特征值曲线的灵敏度、无偏性、单峰性均优于 Lena 图和光栅靶标, 且本文检焦法比传统自准直检焦法的检焦精度提高了约 19.6%, 满足光学系统对离焦量允许值的要求。

**关键词** 成像系统; 航空相机; 自动检焦; 图像处理; 自准直; 辐射状靶标

**中图分类号** V241.01; V248.1

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.021104

## Self-Collimation Inspection and Focusing Method Based on Image Processing

Li Qihui<sup>1,2</sup>, Ding Yalin<sup>1\*</sup>, Xiu Jihong<sup>1</sup>, Liu Chongyang<sup>1,2</sup>, Cai Yiming<sup>1,2</sup>, Liao Jinfeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Image and Measurement, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

**Abstract** Traditional inspection and focusing methods have high complexity and poor stability. This paper presents a self-collimation inspection and focusing method based on image processing. The combination of the self-collimation focusing method and image processing method can improve system applicability and inspection and focusing accuracy. An increase in system defocusing distance leads to a decrease in imaging resolution. Radial targets continuously changing in three-dimensional space are designed to avoid the problem of a small change in contrast after defocusing. In the simulation, the evaluation function operator is selected to calculate the characteristic value curves of defocusing sequence graphs of different targets. The results show that the sensitivity, unbiasedness, and unimodality of the characteristic value curves of radial targets are better than those of Lena graphs and raster targets. The self-collimation inspection and focusing method based on image processing improves the precision of the original self-collimation inspection and focusing method by approximately 19.6%, and the required amount of the tolerant defocus is satisfied.

**Key words** imaging systems; aerial camera; automatic inspection and focusing; image processing; self-collimation; radial targets

**OCIS codes** 110.1758; 110.6150; 110.2990

## 1 引言

航空相机的工作环境复杂多变, 如海拔在

15000 m 以下时, 每降低 1000 m 大气温度相应升高 6 °C<sup>[1]</sup>。在航空相机成像过程中, 受温度、大气压力、成像距离等因素的影响, 光学系统发生离焦, 成像清

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-06-21; 录用日期: 2019-07-03

基金项目: 中国科学院科技创新基金项目(CXJJ-17S017)、国家重点研发计划(2017YFC0822403)

\* E-mail: dingyl\_1964@126.com

晰度下降<sup>[2-3]</sup>,不便于后续图像识别、配准和定位等操作。因此,航空相机中需要使用检焦系统检测实际像方焦面位置,并将探测器成像面移动至实际像方焦面,实现航空相机原有的分辨率成像性能。

国内外学者对自动检焦技术进行了广泛而深入的研究。1976年,Stites<sup>[4]</sup>提出光电自准直法,并推导出温度、大气压力、倾斜成像距离与离焦距离的计算公式。1994年,Jutamulia等<sup>[5]</sup>计算图像的功率谱,利用自相关概念实现检焦。2003年,任四刚等<sup>[6]</sup>采用基于图像灰度差分法的自动调焦技术,直接对拍摄景物进行检焦,检焦精度满足成像系统对离焦量允许值的要求。2011年,许兆林等<sup>[7]</sup>对基于程序控制法的检焦系统进行研究,该系统可以实现快速检焦,但是对于不同的光学系统,随着大气压力和温度的变化,系统的离焦距离不同,导致光学系统的通用性也不同。2012年,王德江等<sup>[8]</sup>使用时间延迟电荷耦合器件(TDI-CCD)替换传统的光电池,利用其高帧频特性实现检焦。

综上所述,航空相机的检焦方法有三种,分别为程序控制法、光电自准直法<sup>[9]</sup>和图像处理法。程序控制法是一种开环控制方法,其检焦精度和场景适应性较差;光电自准直法的机械结构复杂度高,检焦时无法对外界景物成像,检焦实时性差;图像处理法对海洋、沙漠、天空等低对比度、信息不丰富场景难以实现正确检焦。因此,本文提出一种基于图像处理的自准直检焦方法,通过分析对比不同靶标对检焦精度的影响,选用空间频率连续变化的辐射状图案作为检焦靶标,以提高航空相机检焦系统搜寻实际像方焦面的精度。

## 2 离焦原理

航空相机成像系统可视为理想光学系统,其原理如图1所示。该系统满足高斯成像公式<sup>[10]</sup>,即

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

式中: $u$ 为物距; $v$ 为像距; $f$ 为光学系统焦距。由于衍射极限,物空间一物点经光学系统后在像空间将形成一个弥散斑。探测器接收到的弥散斑形状是光学系统出瞳在像面上的几何投影,一般光学镜头为圆形,即弥散斑是圆形光斑<sup>[11]</sup>。

由图1所示的几何关系可知,弥散斑半径与离焦距离的关系满足

$$R = \frac{D(u-f)\Delta v}{2fu}, \quad (2)$$

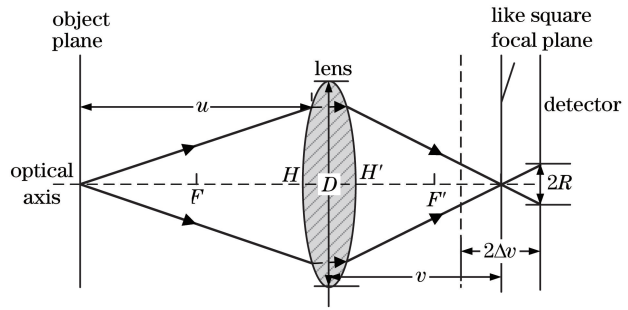


图1 理想成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of ideal imaging system

式中: $R$ 为探测器接收到的弥散斑半径; $D$ 为透镜直径; $\Delta v$ 为探测器与像方焦面的距离。

实际光学系统中物面两点经透镜后在像方焦面形成两个弥散斑,两像点刚好能分辨时即为光学系统的分辨极限,常用瑞利(Rayleigh)判据<sup>[12-13]</sup>和阿贝(Abbe)距离<sup>[14-15]</sup>来评价成像系统的分辨率。常用阿贝距离来表征航空相机的分辨率<sup>[16]</sup>,阿贝距离为相机点扩展函数主峰的半峰全宽。

$$R' = \frac{\lambda f}{D}, \quad (3)$$

式中: $R'$ 为光学系统允许的弥散斑半径; $\lambda$ 为系统入射光波长。

在高斯像面附近,当探测器接收像点的弥散斑半径小于阿贝距离时,光学系统也可形成清晰像,此成像面距高斯像面的距离为系统焦深。

$$2\Delta = \frac{4R'f}{D} = 4\lambda F^2, \quad (4)$$

式中: $\Delta$ 为光学系统允许的检焦误差; $F = f/D$ 为系统 $F$ 数。由(4)式可知,当入射光波长确定后,检焦精度与系统 $F$ 数的平方成正比,系统 $F$ 数越小,半焦深越小,检焦精度要求越高。

当探测器偏离像方焦面时,探测器位于像方焦面与透镜之间,称为前向离焦,反之为后向离焦。根据衍射理论,单色球面波通过透镜后,焦点附近轴上强度分布与离焦距离的关系为

$$t = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{D}{2f} \right)^2 z, \quad (5)$$

$$I = \frac{4}{t^2} \left[ 2 - 2\cos\left(\frac{t}{2}\right) \right] I_0, \quad (6)$$

式中: $t$ 为计算方便引入的无量纲变量; $z$ 为离焦距离; $I_0$ 为焦点处的强度; $I$ 为光轴上某点的光强。

假设光学系统的入射光波长为  $632.8 \times 10^{-6}$  mm,焦距为 400 mm,透镜直径为 50 mm,光学系统半焦深近似为 0.08 mm,焦点处光强为 1。离焦距离从 0 mm 增至 0.5 mm,离焦距离与光轴上光强

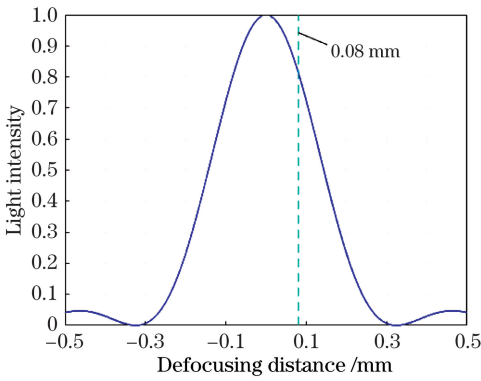


图 2 光强与离焦距离关系图

Fig. 2 Relationship between light intensity and defocusing distance

分布关系如图 2 所示。光轴上光强随离焦距离的增大而减小,当离焦距离等于 0.08 mm 时,光轴上的光强约比焦点处光强低 20%,这就验证了半焦深计算公式的正确性。众多国内外学者对成像模糊理论的研究表明,高斯离焦模型具有较好的效果<sup>[17]</sup>。实际上光学成像系统相当于一个低通滤波器,即

$$H(x, y) = \exp\left(-\frac{\rho^2 \sigma^2}{2}\right), \quad (7)$$

式中: $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  为径向空间频率; $\sigma = cR, c$  通常近似为  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ,  $R$  为弥散斑半径。由(2)式、(7)式可知,

离焦距离增大会导致弥散斑半径增大,弥散斑半径增大会导致光学系统的截止频率减小。

### 3 检焦系统

#### 3.1 基于图像处理的自准直检焦系统

传统光电自准直法一般采用光栅作为靶标,检焦时通过摆扫反射镜持续摆扫来改变靶标像在像方焦平面(共轭光栅)的前后位置;光电接收透过共轭光栅的调制波光强信号<sup>[18]</sup>,当调制波光强信号峰值近似等于标定峰值时,检焦系统停止搜索,否则调焦电机继续搜索。传统光电自准直系统的结构复杂度高,需要额外的光电接收器件,检焦精度相对较低。基于图像处理的检焦系统直接对景物图像进行检焦,航空相机成像重叠率低,不同景物计算的特征值不同,导致检焦精度较差;对景物信息不丰富的场景,景物特征值变化率小,无法实现准确检焦。

利用自准直检焦系统通用性强,图像处理技术对固定靶标的检焦快速性及高精度性的优点,来优化基于图像处理的自准直检焦系统,其工作原理如图 3 所示。为在探测器上产生靶标的共轭像,靶标

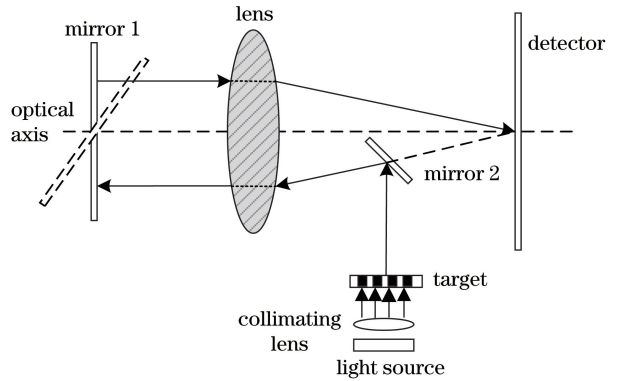


图 3 图像处理的自准直检焦系统原理图

Fig. 3 Schematic of image auto-collimation inspection and focusing system

到反射镜 2 的光程与探测器感光面中心到反射镜 2 的光程应相等。当航空相机处于检焦模式时,反射镜 1 与主光轴垂直,反射镜 2 与光轴成一夹角,光源出射光线经准直透镜准直后照射靶标,靶标像经反射镜 2、物镜后成为平行光,靶标像由反射镜 1 反射经透镜到达探测器成像面得到靶标的像。前后移动探测器获取不同离焦距离处的靶标像,经清晰度评价函数计算靶标像的特征值,当特征值达到最大时为准焦面位置,完成对无穷远成像的检焦操作。检焦完成后,将反射镜 1 转至与光轴成 45°,反射镜 2 移出光路,光学系统对外界景物成像。

基于图像处理的自准直检焦系统,利用图像处理检焦技术判据灵活、检焦速度快等特点,可降低实现难度、提高检焦精度;无需扫描反射镜持续摆扫,提高系统稳定性;与成像系统共用一个成像 CCD,降低机械结构的复杂度、减少制造成本。

#### 3.2 设计靶标

检焦系统因光栅靶标的空间频率较单一,离焦后模糊图的纹理特征变化不显著,灰度梯度变化不明显,需要重新设计合适的靶标。考虑到光学系统离焦后系统的截止频率和对比度均降低,可选用空间频率连续变化的辐射状靶标。传统光栅靶标与设计的辐射状靶标如图 4 所示,光栅常数为  $d$ ,缝宽为  $a$ ,辐射状靶标半径为  $r$ ,圆心角为  $\theta$ 。辐射状靶标具有连续变化的空间频率,单个靶条的空间频率与半径关系<sup>[19]</sup>,即

$$f_R = \frac{1}{2r \sin(\theta/2)}, \quad (8)$$

式中: $f_R$  为单靶条半径为  $r$  时的空间频率。

辐射状靶标经光学系统成像后,靶标中心区域的空间频率较高,且一般高于成像系统的截止频率,在圆心处会形成模糊圆斑。辐射状靶标的圆心角不变,离焦距离增大,光学系统截止频率降低,靶标中

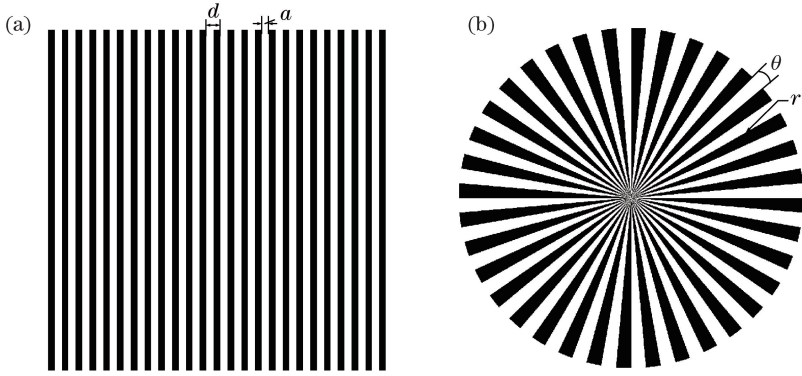


图4 靶标示意图。(a)光栅靶标;(b)辐射状靶标

Fig. 4 Schematics of targets. (a) Grating target; (b) radial target

心的模糊圆半径增大。为验证靶标是否满足成像系统检焦条件,使用三种清晰度评价函数算子,计算三种靶标模糊序列图的归一化特征值曲线并进行对比分析。

### 3.3 清晰度评价函数

清晰度评价函数算子可分为空域类、信息学类、频域类和统计学类,理想的清晰度评价函数算子应具备5种特性:1)无偏性,特征函数值最大处为实际焦面位置;2)单峰性,特征值曲线只有一个峰;3)灵敏度高,能够准确检测系统的准焦和轻微离焦位置;4)较高的信噪比,在噪声干扰下仍能检测到实际焦面位置;5)计算量小,利用函数算子可以快速计算特征值。频域类评价函数需对整幅图像进行傅里叶变换,处理数据量大,计算时间长。为减小计算量、缩短计算时间,选用经典的空域类 Sobel、Laplacian、平方梯度(Sq-Grad)函数算子。

#### 1) Sobel 函数<sup>[20-21]</sup>算子

$$F_{\text{Sobel}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (|I_x| + |I_y|),$$

$$h_x = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}, h_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中: $M \times N$  为图像总像素数; $I_x$  与  $I_y$  分别为图像与 Sobel 函数算子  $h_x$  和  $h_y$  模板运算后的结果。该算子用于计算图像的横向和纵向梯度。

#### 2) Laplacian 函数<sup>[22]</sup>算子

$$F_{\text{Laplacian}}(z) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (|L(i,j)|),$$

$$h_L = \frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & -20 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中: $L(i,j)$  为图像与 Laplacian 函数算子  $h_L$  的八邻域模板运算结果。该算子用于计算第  $z$  幅图像

的散度。

#### 3) 平方梯度(Sq-Grad)函数<sup>[23]</sup>算子

$$F_{\text{Sq-Grad}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j+1) - I(i,j)]^2, \quad (11)$$

式中: $I(i,j)$  为像素坐标在  $(i,j)$  处的灰度值。该算子在计算噪声及高亮区域时可获得较好的处理效果。

## 4 实验结果及分析

使用高斯离焦模型,仿真 Lena 与两种靶标的离焦图,共采集 51 幅离焦模糊图。为便于分析,选取辐射状靶标的第 26 幅正焦位置与第 38 幅、第 51 幅后向离焦的局部图,如图 5 所示。

由图 5 可知,随着成像系统离焦距离增大,辐射状靶标中心模糊圆斑半径增大,而光栅靶标模糊图的纹理特征几乎无明显变化。选取 Sobel、Laplacian、Sq-Grad 三种清晰度评价函数算子,计算三种靶标的 51 幅模糊序列图。选取矩形检焦窗口 ( $226 \times 266$ ) 并计算特征值绘制特征值曲线,为便于分析对特征值曲线进行归一化,如图 6 所示。

图 6 中横坐标为模糊图的序列号,纵坐标为归一化后的特征值。由图 6(a)可知,利用三种检焦算子计算得到的特征值曲线具有无偏性和平滑性,Laplacian 与 Sq-Grad 算子对于 Lena 图的检焦精度相当,Sobel 算子对 Lena 的检焦精度较差。由图 6(b)可知,Sobel 检焦算子无法完成对光栅的检焦任务,在对光栅检焦时 Sq-Grad 的检焦精度优于 Laplacian。从图 6(c)从三种检焦算子计算得到的辐射状靶标模糊序列图的特征值曲线,均具有平滑性、单峰性、无偏性,依据算子的检焦精度,从低到高排序为 Sobel、Laplacian、Sq-Grad。



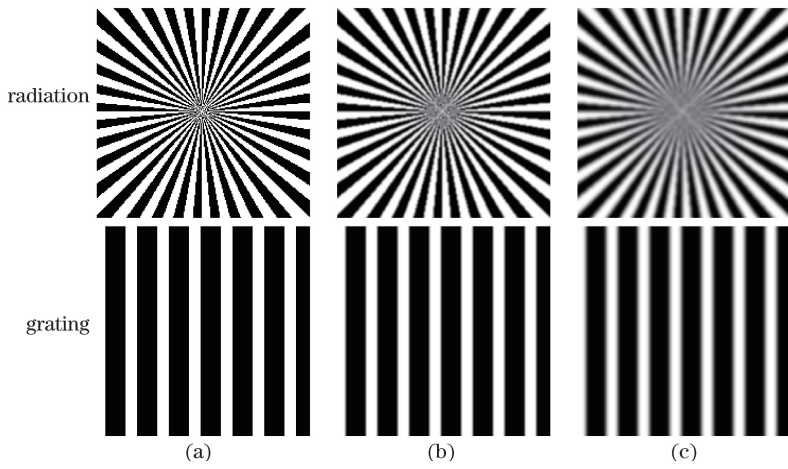


图 5 辐射状与光栅靶标离焦图。(a)第 26 幅;(b)第 38 幅;(c)第 51 幅

Fig. 5 Defocus diagrams of radial and grating targets. (a) 26th image; (b) 38th image; (c) 51st image

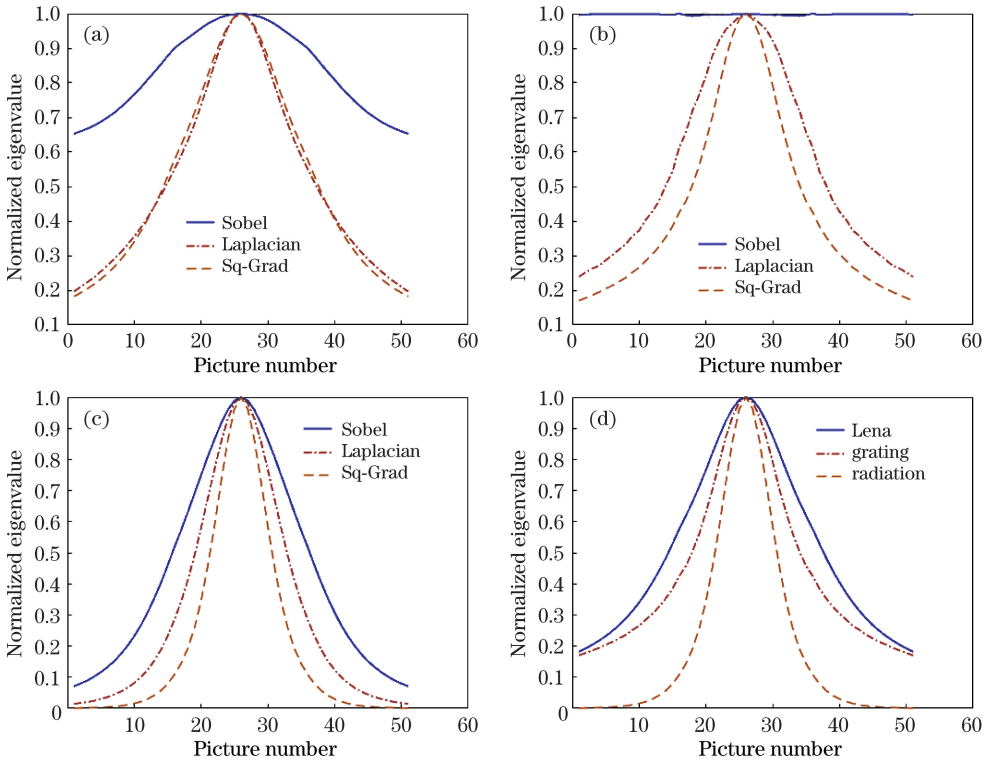


图 6 离焦图的归一化特征值曲线。(a) Lena;(b)光栅;(c)辐射状;(d)三种靶标的对比

Fig. 6 Normalized eigenvalue curves of the defocus image. (a) Lena; (b) grating; (c) radiation;

(d) contrast of three targets

表 1 检焦结果对比分析

Table 1 Comparative analysis of inspection and focusing results

Parameter	Sobel			Laplacian			Sq-Grad		
	Radiation	Grating	Lena	Radiation	Grating	Lena	Radiation	Grating	Lena
$\omega_{1/2}$	20		26	14	20	18	10	20	28
$T$	0.9291	0.0065	0.3475	0.9858	0.7608	0.8035	1	0.8297	0.4806

由图 6(a)~(c)可知,Sq-Grad 检焦算子在三种靶标中的检焦性能均较好。为直观分析,将 Sq-Grad 算子对三种靶标计算的特征值曲线在图 6(d)

中绘出,检焦算子归一化后特征值曲线的半峰全宽  $\omega_{1/2}$ ,特征值范围  $T$ (最大特征值与最小特征值之差)如表 1 所示。从图 6(d)可以看出,Sq-Grad 对辐

射状靶标的检焦效果较好,特征值曲线具有较好的单峰性、平滑性、无偏性与灵敏度。

表1中 Sobel 算子无法对光栅完成检焦任务,故不计算 Sobel 算子对光栅靶标特征值曲线的半峰全宽。由表1可知,辐射状靶标经同一检焦算子计算的特征值曲线的半峰全宽均小于 Lena 与光栅靶标,且特征值范围均大于 Lena 与光栅靶标。特别地,利用 Sq-Grad 算子计算得到的辐射状靶标的清晰度评价曲线半峰全宽为 10,小于光栅靶标的 20;辐射状靶标特征值范围为 1,大于光栅的 0.8297。在选用 Sq-Grad 检焦算子时,辐射状靶标的检焦精度比传统光栅提高了约 19.6%。因此,可选用辐射状靶标作为基于图像处理的自准直检焦系统的靶标。

## 5 结 论

自动检焦技术是航空相机清晰成像的关键技术之一,随着航空相机技术的迅速发展,焦距越来越长,成像距离越来越远,对检焦精度要求越来越高。基于图像处理的自准直检焦系统,可以提高系统稳定性,降低控制难度,并选用辐射状图案作为检焦方法的靶标。使用经典检焦函数算子验证三种靶标的检焦性能,结果表明,Sq-Grad 检焦算子计算辐射状靶标的检焦性能优于传统光栅靶标,可提高系统检焦精度,满足航空相机对检焦精度的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Lan G P, Wang X, Liang W, et al. Optical design and thermal analysis for the active-focusing aerial camera objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322006.  
蓝公仆, 汪旋, 梁伟, 等. 主动调焦式航空相机物镜光学设计及温度仿真分析 [J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322006.
- [2] Meng F H. Study on the application of autofocus technique based on image processing technology in aerial camera [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 11-18.  
孟繁浩. 基于图像处理的自动检焦技术在航空相机中的应用研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2016: 11-18.
- [3] Hui S W. Compensation for long focus oblique real-time aerial camera being out of focus [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 162-165.  
惠守文. 长焦距斜视实时航空相机离焦补偿 [J]. *光学精密工程*, 2003, 11(2): 162-165.
- [4] Stites D G. Automatic focus sensing and control of

optical reconnaissance sensors [J]. *Proceedings of SPIE*, 1976, 79: 57-71.

- [5] Jutamulia S, Asakura T, Bahuguna R D, et al. Autofocusing based on power-spectra analysis [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(26): 6210-6212.
- [6] Ren S G, Li J W, Xie L L. Automatic focusing technique based on gray scale difference method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(2): 53-55.  
任四刚, 李见为, 谢利利. 基于灰度差分法的自动调焦技术 [J]. *光电工程*, 2003, 30(2): 53-55.
- [7] Xu Z L, Zhao Y L, Zhang G D. Design of an auto-focusing system for a new type of aerial camera [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(4): 77-80.  
许兆林, 赵育良, 张国栋. 新型航空相机自动调焦系统的设计 [J]. *光电与控制*, 2011, 18(4): 77-80.
- [8] Wang D J, Li W M, Xu Y S, et al. A fast auto-focusing technique for the TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2012, 23(8): 1452-1457.  
王德江, 李文明, 许永森, 等. TDI-CCD 全景航空相机快速自动检调焦方法 [J]. *光电子·激光*, 2012, 23(8): 1452-1457.
- [9] Wang G M, Lao D B, Zhou W H. Optical system design and tolerance analysis of photoelectric self-collimation theodolite [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102203.  
王国名, 劳达宝, 周维虎. 光电自准直经纬仪光学系统设计与公差分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 102203.
- [10] Gao S, Qiu J, Liu C. Ambiguity function based computational imaging model for focal sweep [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071103.  
高姗, 邱钧, 刘畅. 基于模糊函数的聚焦扫描计算成像模型 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071103.
- [11] Li Q. Studies on the theory and implementation method of digital autofocus technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 11-13.  
李奇. 数字自动对焦技术的理论及实现方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 11-13.
- [12] Vigoureux J M, Courjon D. Detection of nonradiative fields in light of the Heisenberg uncertainty principle and the Rayleigh criterion [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(16): 3170-3177.
- [13] Tsang M, Nair R, Lu X M. Rayleigh's criterion is irrelevant to the localization of two incoherent optical point sources [C] // Conference on Lasers and Electro-

- Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2016: FF1C.1.
- [14] Minin I, Minin O. 3D diffractive lenses to overcome the 3D Abbe subwavelength diffraction limit [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(6): 060014.
- [15] Haeberlé O, Xu C, Dieterlen A, et al. Multiple-objective microscopy with three-dimensional resolution near 100 nm and a long working distance [J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1684-1686.
- [16] Wang X. Auto-focusing technique for aerial camera base on image processing[D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2014: 13-16.  
汪旋. 基于图像处理的航空相机自准直检调焦技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学, 2014: 13-16.
- [17] Hong Y Z, Ren G Q, Sun J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3401-3408.  
洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3401-3408.
- [18] Shi L, Jin G, Tian H Y, et al. Autofocusing method with automatic calibration for aerial camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2460-2464.  
史磊, 金光, 田海英, 等. 航空相机的自准直自动检
- 焦方法研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2460-2464.
- [19] Zhang J, Li C R, Li X H, et al. A research on MTF estimation and accuracy analysis based on radial-target method [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(3): 523-530.  
张静, 李传荣, 李晓辉, 等. 基于辐射状靶标的 MTF 评估算法及精度分析研究[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 523-530.
- [20] Sui C H, Han Y H, Xu D Y, et al. Real-time image detection in corneal topography [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0611001.  
隋成华, 韩勇浩, 徐丹阳, 等. 角膜地形图仪中实时图像检测[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0611001.
- [21] Zhang F, Zhang R Y, Li Z Z. Image quality assessment based on symmetry phase congruency [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101003.  
张帆, 张偌雅, 李珍珍. 基于对称相位一致性的图像质量评价方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101003.
- [22] Masini A, Diani M, Corsini G, et al. Automatic focusing techniques for infrared sensors [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6737: 67370Q.
- [23] Xian T, Subbarao M. Depth-from-defocus: blur equalization technique [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6382: 63820E.