

基于图像频谱的定焦分析

马丽娜 宗肖颖 李永强

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 相机焦面定位精度决定了相机的成像质量,对其测试方法须作专门研究。介绍了一种基于图像频谱的定焦测试方法,最少仅利用同一目标的两个离焦图像,即可推算出相机成像面的离焦量。算法基于相机对任意目标所拍摄的离焦图像,并且在相机镜头装调质量达到设计要求的情况下,对成像目标无要求。利用两幅图像的相似性,通过数值分析的手段,避免了对图像频谱的直接分解,具有所得结果有可靠、稳定、精度高、易操作的特点。

关键词 图像处理; 调焦分析; 离焦深度法; 频谱; 衍射极限

中图分类号 O43 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0710002

Analysis of Focusing Camera Based on of Image Spectrum

Ma Lina Zong Xiaoying Li Yongqiang

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract The imaging quality of camera severely depends on the precision of location of focal plane, and correlation research on the testing method is carried out. A testing method of locating focal length based on the image spectrum is presented, which can make use of at least two defocusing pictures from the same target to calculate the defocusing amount of camera image plane. And on the condition that the camera lens is aligned well with the design requirement, the target is random. In the process of numerical calculation using the similarity of two images, the image spectrum can avoid direct decomposition and make the testing easy, stable, reliable and with high precision.

Key words image processing; analysis of autofocus; defocus distance method; image spectrum; diffraction limit

OCIS codes 100.2550; 110.2970; 040.1490

1 引言

数字成像系统的对焦一般有两种方法:对焦深度法和离焦深度法。对焦深度法是建立在搜索算法上的图像对焦法。该方法通过评价函数分析一系列图像的成像像质,算出在不同对焦位置上的图像清晰程度,通过拟合过焦曲线求出相机的最佳焦面位置。在实际调整焦面时,一般用平行光管靶标法来采集图像,用传递函数来评价图像像质。采集图像时要保证靶标平行于接收器件。对于线阵相机,其靶标平行仅需调整平行光管的左右方向即可实现,具体实施较简便,并且精度较高,因此上述方法在线阵相机焦面调整时得到广泛使用。但对于面阵相机来说,对焦深度法就有一定的局限性。要保证靶标与面阵器件平行需调整左右和俯仰两维方向的角度,其难度较大。并且该算法要求搜索图像较多,工作量大,因此对焦深度法对面阵相机并不适用。

本文介绍一种离焦深度法来调整相机焦面。所谓离焦深度法就是通过2~3幅不同参数下采集的离焦图像,计算其所含深度信息,从而直接计算出图像的离焦量,通过调整镜头垫片厚度,实现相机的焦面调整。离焦深度法分为两种:1) 基于直边响应。这种直边是事先已知的或可从离焦图像中提取出来的,但实际图像中一般没有直边,因此这种方法没有普遍性。2) 基于任意物体。这类方法往往是基于衍射受限系统,算法中常常要求利用小光阑成像,以便能观察到衍射在离焦图像的频谱上形成的明暗分布。小光阑成像的要求也限制了此类算法的应用。另一些算法是基于频域分析的算法,要计算成像的频谱及其他的一些处理,

收稿日期: 2014-12-25; 收到修改稿日期: 2015-04-01

作者简介: 马丽娜(1983-),女,硕士,工程师,主要从事光学测试方面的研究。E-mail: malinay@sina.com

往往难以实现实时要求。

提出了一种基于任意物体的离焦深度方法,尽管是基于频域分析的,但是该方法并不要求计算成像的频谱,也不要求系统使用小光阑成像。

2 实验原理及方法

2.1 离焦深度法算法原理

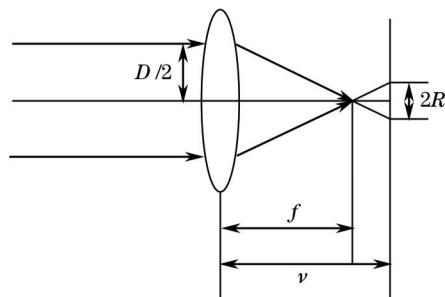


图1 光学系统成像光路

Fig.1 Sketch of optical imaging system

光学系统成像光路如图1所示。其中, f 为焦距, R 为弥散斑半径, D 为入射光瞳直径, v 为离焦状态下的像距。由于无穷远物体在相机的互补金属氧化物半导体(CMOS)上成像时,当CMOS位于相机焦平面上所得的图像为最清晰,若CMOS位置有所偏离,则会得到离焦图像。由几何光学及图1可得

$$D/2R = f/(v - f), \quad (1)$$

式中 R 为正时说明接收器件在焦后, R 为负时说明接收器件在焦前。在实际的光学系统中,由于受到系统设计、制造误差的影响,成像系统的点扩展函数(PSF)并不完全是一个理想的艾里斑,若系统的传递函数趋近于衍射极限,并假设为无损系统,就可用高斯分布来描述其能量分布^[1-5]

$$h(x, y) = 1/(2\pi\delta^2) \cdot \exp[-(x^2 + y^2)/2\delta^2], \quad (2)$$

满足

$$\iint h(x, y) dx dy = 1, \quad (3)$$

实验证明 δ 与 R 成正比^[6],

$$\delta = \alpha R, \quad (4)$$

式中 α 是一个常数,在大多数情况下, $\alpha = 1/\sqrt{2}$ 是对实际情况的一个良好近似,即

$$\delta = R/\sqrt{2}, \quad (5)$$

实际成像过程可以表示为^[7-11]

$$I_i(x_i, y_i) = \iint I_g(x_0, y_0) \cdot h(x_i - x_0, y_i - y_0) dx_0 dy_0 = I_g(x, y) h_i(x, y), \quad (6)$$

式中 θ 为频谱图像角度, I_g 为理想成像下的焦面上的图像强度分布, I_i 为物体在经过实际光学系统后所得图像的强度分布。经过傅里叶变换到频域为

$$G_i(\xi, \eta) = G_g(\xi, \eta) \cdot H(\xi, \eta) = G_g(\xi, \eta) \cdot \exp[-2\pi^2\delta^2(\xi^2 + \eta^2)], \quad (7)$$

式中 G_g 为理想成像下的图像频谱分布, G_i 为物体在经过实际光学系统后所得离焦图像的频谱分布。由于 $H(\xi, \eta)$ 为圆对称分布,则实际图像的频谱径向分布可以表示为

$$D(r) = 1/(2\pi r) \int_0^{2\pi} |G_i(r, \theta)| d\theta = 1/(2\pi r) \exp(-2\pi^2\delta^2 r^2) \int_0^{2\pi} |G_g(r, \theta)| d\theta, \quad (8)$$

式中 r 为图像的径向频谱半径,取 CMOS 在不同离焦位置时的 v_1 和 v_2 的离焦图像,得到 $r = a$ 时的径向频谱分布,比较此两幅图像的径向频谱分布为

$$D_1(a)/D_2(a) = \exp(-2\pi^2 a^2 \delta_1^2) / \exp(-2\pi^2 a^2 \delta_2^2). \quad (9)$$

(9)式表面上需要计算图像的频谱分布(单位为lp/mm),但实际上并不需要,只需要计算半径为 r 的频谱径向分布即可。

$$D(r) = 1/360 \sum_{\theta=0}^{360} \left| \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m,n) \exp[-j(2\pi m/Mr \cos \theta)] \exp[-j(2\pi n/Nr \sin \theta)] \right|, \quad (10)$$

式中 $f(m,n)$ 为图像的光强分布, m 、 n 为图像的横纵坐标, M 、 N 为图像的总大小。根据图 1 和(9)式、(10)式,就可以求出 $\delta_1^2 - \delta_2^2$ 的关系式。已知两个不同像距的离焦图像,并且知道两幅离焦图像的像距差 d

$$d = v_2 - v_1, \quad (11)$$

再利用(1)式和(5)式,可得图像与相机主点的距离 v_1 为

$$v_1 = -(\delta_1^2 - \delta_2^2)Af^2/D^2d + f - d/2. \quad (12)$$

进而得到图像的离焦量

$$\Delta v = v_1 - f. \quad (13)$$

2.2 测试方法

以某相机为例来说明用离焦深度法实现相机定焦的过程。调整被测相机 CMOS 器件在系统的无穷远焦面上,若应用平行光管得到焦面处靶标的清晰图像,就可以认为相机的像面也在相机系统的无穷远焦面处,达到调整目的。

测试光路如图 2 所示。被测相机通过专用工装安装在可以三维调整的三脚架上,放置在 52 mm 平行光管透镜前,平行光管无穷远焦面处放置一扇形靶标,其形状如图 3 所示,由间隔 6° 的黑白条纹组成,等分为 60 份。以相机所采图像可以分辨每个像元为宜,则相机能分辨周长为 60 pixel 的圆形就能满足要求,即直径为 20 pixel 的圆形。靶标由积分球均匀光源照明,积分球出口直径为 30 mm,其电压设置为 15.3 V。相机运用自动曝光技术,所成图像的灰度(DN)值在 100 左右。

调整被测相机镜头与 52 mm 平行光管和积分球口中心在同一水平线上,调整平行光管位置,使得靶标的图像位于相机所成图像的中心,并把扇形靶标调整成中心对称。打开积分球,稳定 20 min,保证在测量中图像的强度不变。调整平行光管靶标位置,模拟离焦现象。实验中取平行光管的无穷远焦面位置为坐标原点,即放置靶标位置,靶标远离相机时为正,靠近相机时为负。取间距为 0.5 mm 采集一幅图像,采集靶标在 $-3.5 \sim 3.5$ mm 范围内的离焦图像,被测相机的信号通过图像采集系统用视频输出。

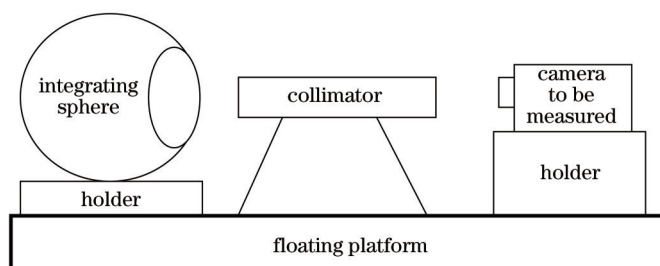


图 2 相机调焦测试方案简图

Fig.2 Schematic diagram of camera focusing test

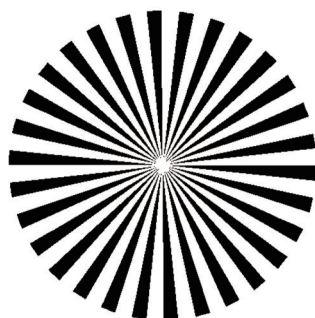


图 3 扇形靶标

Fig.3 Fan-shaped target

3 离焦深度法计算相机离焦深度

3.1 输入条件

相机的焦距为 $f=9.7\text{mm}$, F 数为 7, 焦深为 $\pm 0.05\text{ mm}$, 视场角为 $40^\circ \times 48^\circ$, CMOS 像面上一个像元大小为 $6.7\ \mu\text{m} \times 6.7\ \mu\text{m}$, 则该相机的奈奎斯特频率为 74 lp/mm , 计算不同 r 下的图像频谱径向分布时取 r 为 40 、 60 lp/mm 这两种频率, 计算出图像的离焦量, 并与像面的实际离焦量对比, 如表 1 所示。像面的实际离焦量由图 4 可得。先根据传统方法采集靶标在不同位置时的图像, 根据图像的清晰程度来判断相机的焦面位置。再计算靶标在不同位置时所得图像的像面离焦面位置的距离, 即可得到像面的离焦量。

表 1 传统方法和离焦深度法离焦量对比

Table 1 Contrast of defocusing distance between traditional method and defocusing depth method

| Target position /mm | Defocusing amount of traditional method /mm | Defocusing amount of proposed method /mm | |
|---------------------|---|--|---------------------|
| | | $r=40\text{ lp/mm}$ | $r=60\text{ lp/mm}$ |
| 3.5 | 0.136 | 0.157 | 0.148 |
| 2.5 | 0.102 | 0.094 | 0.075 |
| 1.5 | 0.068 | 0.058 | 0.052 |
| 0.5 | 0.034 | 0.032 | 0.043 |
| -0.5 | 0 | 0 | -0.025 |
| -1.5 | -0.034 | -0.029 | -0.031 |
| -2.5 | -0.068 | -0.075 | -0.047 |
| -3.5 | -0.102 | -0.077 | -0.063 |

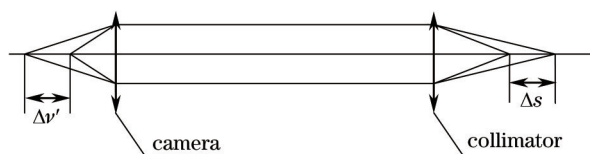


图 4 测试光路图

Fig.4 Testing light path

由于平行光管为 52 mm , 相机焦距为 9.7 mm , 平行光管的放大倍率为 $52/9.7$, 可得

$$\Delta s / \Delta v' = (52/9.7)^2, \tag{14}$$

式中 Δs 为靶标移动的距离, $\Delta v'$ 为相机焦面移动的距离。当 $\Delta s = 0.5\text{ mm}$ 时, 可得对应相机离焦为 $\Delta v' = 0.017\text{ mm}$ 。

3.2 真实图像及计算结果

图 5(a)~(h) 分别为靶标在 $-4.5, -4, -1.5, 0.5, 0, 1.5, 2.5, 3.5\text{ mm}$ 处所得到的真实图像放大 4 倍后取中心高频部分所得图像。

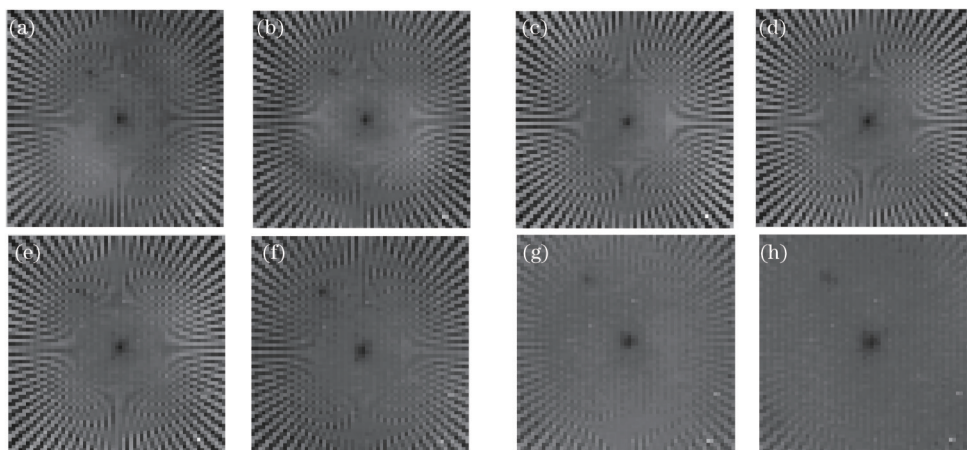


图 5 靶标在不同位置处的图像

Fig.5 Images of target at different positions

由于离焦图像与在焦点上的图像在高频上变化较大,当 $r=60$ lp/mm时,与CMOS的奈奎斯特频率相接近,因此计算误差较大; $r=40$ lp/mm,既与奈奎斯特频率不接近,又为相对较大频率,因此计算值与实测值比较接近。

由图5可知,相机的焦面实际位置约在靶标为 -0.5 mm处。表1为实际CMOS离主点的距离和根据图像计算的对比数据,可知计算数据与实际数据相差在 0.05 mm之内,满足精度要求。图6和图7为根据图像当 $r=40$ lp/mm和 $r=60$ lp/mm时分别计算出的频谱径向分布图,两图频谱均在靶标位置为 -0.5 mm左右处为最大,可知此处为焦面位置,与实际位置一致,从而进一步证明此种算法的正确性。

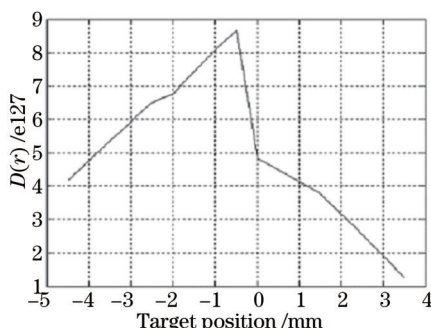


图6 径向频谱平均分布图 $r=40$ lp/mm

Fig.6 Radial frequency spectrum distribution $r=40$ lp/mm

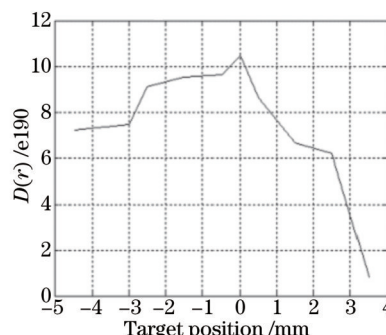


图7 径向频谱平均分布图 $r=60$ lp/mm

Fig.7 Radial frequency spectrum distribution $r=60$ lp/mm

3.3 误差分析

在测量点片厚度时,千分尺精度会导致计算误差。由于千分尺精度为 0.01 mm,则 $\delta(d)=0.01$ mm,对(12)式求导数得

$$|\delta v| = \left[(\delta_1^2 - \delta_2^2) 4f^2 / (D^2 d^2) - 1/2 \right] |\delta(d)|, \quad (13)$$

由(13)式可知, $(\delta_1^2 - \delta_2^2)$ 范围约为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$, 可得 $|\delta v| \approx 0.01$ mm。因此,所得到的距离与实际距离相差约 0.01 mm。

相机的焦距测试误差会引起算法的计算误差。离焦深度法通过两幅图像来测量CMOS像面离无穷远焦面的距离,这两幅图像采集时会产生随机误差,实验中每一种离焦状态采集视频20帧,解压缩得20幅图像,求其平均值来去掉这种随机误差,并且取平均值还会降低图像噪声对算法的干扰。图像中的噪声点在成像中并不产生弥散斑,计算中也会对最终结果产生影响。

实验所用相机为自动曝光,由于光源的不稳定性,光强在一定时间范围内会有一些差异,相机的积分时间在小范围内会发生微量变化,均有可能引起误差,但此误差很小,大约在1%左右,可以忽略。

相机光阑较小,也会引入误差。因为小光阑会增加图像的衍射效应,干扰不同像面上的成像效果;并且小光阑会使曝光时间增加,减小信噪比,使得噪声对图像的影响增大。

根据实际测试,计算所得像距与实际值误差在相机的焦深范围之内,因此计算结果真实有效。

4 结 论

实验中应用所提出的测试方法可以看出,采用离焦深度法测离焦量比用传统方法简单易行,同时,提高了测试效率,不仅适用于这种面阵相机,还可以在小型相机中广泛应用。

参 考 文 献

- 1 Pei Xiyu, Feng Huajun, Li Qi, *et al.*. A depth from defocus auto-focusing method based on frequency analysis[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(5): 62-65.
裴锡宇, 冯华君, 李 奇, 等. 一种基于频谱分析的离焦深度自动对焦法[J]. 光电工程, 2003, 30(5): 62-65.
- 2 Subbarao M, Surya G. Depth from defocus: A spatial domain approach[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 13(3): 271-294.
- 3 Kim S K, Park S R, Paik J K. Simultaneous out-of-focus blur estimation and restoration for digital auto-focusing system[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44(3): 1071-1075.

- 4 Yao Song, Cao Danhua, Wu Yubin. Performance of autofocus judgements in different quantity of information series images[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(5): 81-90.
姚 松, 曹丹华, 吴裕斌. 图像信息量的变化对自动对焦评价函数的影响[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 81-90.
- 5 Feng Huajun, Mao Bangfu, Li Qi, *et al.*. An auto-focusing system used for digital imaging[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(10): 69-72.
冯华君, 毛邦福, 李 奇, 等. 一种用于数字成像的自动对焦系统[J]. 光电工程, 2004, 31(10): 69-72.
- 6 Feng Jingwu, Yu Qingcang, Lu Ning, *et al.*. Definition evaluation function of digital image in auto-focusing system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(3): 354-356, 368.
冯精武, 喻擎仓, 芦 宁, 等. 调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究[J]. 机电工程, 2011, 28(3): 354-356, 368.
- 7 Lei Hai, Chang Xinyu, Xie Xiangjun, *et al.*. Deconvolution in digital holographic reconstruction for high-accuracy position of microsphere tracking technology[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0409001.
雷 海, 常新宇, 谢湘军, 等. 去卷积数字全息重构的微粒位置精确测量[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0409001.
- 8 Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli, *et al.*. Analyzing of optical remote polarization imaging simulation based on intensity images and surface polarized bidirectional reflectance data[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1028001.
黄红莲, 易维宁, 乔延利, 等. 基于强度图像和地物偏振反射率数据的光学遥感偏振成像仿真分析[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1028001.
- 9 Li Xin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. On-orbit assessment of optical sensor degradation based on spectral tarps[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0628002.
李 鑫, 张黎明, 陈洪耀, 等. 基于光谱靶标的光学传感器退化特性在轨评估方法研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0628002.
- 10 Fan Liheng, Lü Junwei, Deng Jiangsheng. Classification of hyperspectral remote sensing images based on bands grouping and classification ensembles[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0910002.
樊利恒, 吕俊伟, 邓江生. 基于分类器集成的高光谱遥感图像分类方法[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0910002.
- 11 Yang Sa, Yang Chunling. Image registration algorithm based on sparse random projection and scale-invariant feature transform[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1110001.
杨 飒, 杨春玲. 基于压缩感知与尺度不变特征变换的图像配准算法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1110001.

栏目编辑: 苏 岑