

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514363

高鲁棒性空间相机自动调焦算法设计与试验

彭越洋^{1,2},傅紫源³,贺玉坤^{1,2},陈长征^{1,2},沙巍^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 上海卫星工程研究所 上海 201100)

摘要:为了提高对地观测卫星在轨调焦的效率和精度,提出了一种基于多个星点图像定量评估相机离焦状态,计算最佳探测器位置的方法。首先,介绍了自动调焦算法的工作流程,详细描述了星点图像预处理,图像质心和空间相位差(SPD)的计算方法,在SPD的基础上,重建点扩散函数(PSF)并根据离散PSF拟合高斯曲线计算标准差,将标准差和探测器位置拟合为调焦曲线,曲线最低点即为自动调焦算法计算出的最佳探测器位置。为了说明所提算法的有效性,简要介绍了空间域、频率域、统计学以及基于特征的图像清晰度评价函数,将其作为对比算法。最后,搭建了试验平台,测试所提算法的定焦精度以及噪声鲁棒性,并与其它清晰度评价函数进行了对比。试验结果表明:所提算法计算最佳探测器位置,最小误差为-0.0013 mm,小于1/6半焦深,优于对比算法;当图像信噪比 ≥ 10 dB,定焦误差的绝对值<0.0028 mm,在1/6半焦深范围以内,调焦曲线的拟合优度>0.85,噪声鲁棒性优于对比算法。所提算法在不同探测器位置上获取多个星点图像,通过星点图像定量评估相机的离焦状态,拟合的调焦曲线能够正确反应相机离焦状态与离焦量的关系,最佳探测器位置的计算精度能够满足空间相机对调焦精度的要求,具有较强的噪声鲁棒性。

关键词:星点图像;空间相位差;点扩散函数;图像清晰度评价;离焦;调焦精度

中图分类号: TH74 V19 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Design and experiment of automatic focusing algorithm for high robustness space camera

Peng Yueyang^{1,2},Fu Ziyuan³,He Yukun^{1,2},Chen Changzheng^{1,2},Sha Wei^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201100, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and accuracy of on-orbit focusing of earth observation satellites, this paper proposes a method to quantitatively evaluate the defocusing state of the camera based on multiple star images and calculate the optimal detector position. First, the workflow of the auto-focusing algorithm is introduced. The calculation methods of star image preprocessing, image centroid and spatial phase difference (SPD) are described in detail. On the basis of SPD, the point spread function (PSF) is reconstructed and the standard deviation is calculated according to the discrete PSF fitting Gaussian curve. The standard deviation and the detector position are fitted as the focusing curve, and the lowest point of the curve is the optimal detector position calculated by the auto-focusing algorithm. Then, in order to illustrate the effectiveness of the algorithm proposed in this paper, the spatial domain, frequency domain, statistics and feature-based image sharpness evaluation function are briefly introduced as a comparison algorithm. Finally, a test platform is built to test the focusing accuracy and noise robustness of the proposed algorithm, and compared with other clarity evaluation functions. Experimental results indicate that the proposed algorithm achieves with a minimum error of -0.0013 mm for the optimal detector position calculation, less than 1/6 semi-focus depth, better than the comparison algorithm; when the image signal-to-noise ratio is not less than 10 dB, the absolute value of the focusing error is less than 0.0028 mm, and the focusing curve fitting goodness is greater than 0.85 within the range of 1/6 semi-focus depth, and the noise robustness is better than the comparison algorithm.

The proposed algorithm acquires multiple star images at different detector positions, quantitatively evaluates the camera's defocus state through the star images, and the fitted focusing curve can correctly reflect the relationship between the camera's defocus state and the amount of defocus. The calculation accuracy at the optimal detector position can meet the focusing accuracy requirements of space cameras and has strong noise robustness.

Keywords: star image; spatial phase difference; point spread function; image clarity evaluation; defocusing; focusing accuracy

0 引言

空间光学对地观测卫星,在环境、资源和军事领域应用广泛,空间光学相机在入轨前,以传递函数为评定依据,使用平行光管标定出最佳探测器位置,使相机的成像质量最好。但是由于地面与在轨环境的区别,相机进入轨道后,最佳探测器位置相较于地面会发生改变,导致成像质量下降。需要将探测器位置调整到多个位置并成像,通过人眼判别图像清晰度,确定最佳探测器位置,但由于天气,光照条件,成像参数的影响,判别的精度较低。并且,该方法需要将大量图像数据回传至地面,导致效率较低。因此设计高精度,高效率的离焦状态定量评估方法,以此为依据实现自动调焦在空间光学遥感领域已经引起越来越多的关注。

与文献[1-3]提出的方法相比,基于图像的最佳探测器位置计算方法不需要增加光机组件和专用传感器,所以被广泛采用。路朋罗^[4]和 Lyu 等^[5]分别使用空间域和频率域算法计算图像清晰度;高慧婷等^[6-8]研究了对地面定标场的刃边靶标,点源阵列成像并计算光学传递函数,以此为依据评价相机离焦状态的方法,该方法有统一的计算和评价标准 ISO12233^[9]。但是这些方法都依赖于地面相同自然目标,在实际应用中非地球静止轨道的卫星难以实现在短时间内对同一目标连续成像;并且对相同目标成像时,相机成像参数,大气环境,光照条件变化,造成离焦量计算不准确。为了克服地面环境对调焦精度的影响,Wang 等^[10-11]使用中分辨率相机对月球成像,获取圆形边缘,计算相机的调制传递函数(modulation transfer function, MTF),评价空间相机的在轨成像质量;程莹^[12]提出使用改进型 Savitsky-Golay 算法和 Fermi 函数对圆形边缘进行处理,提高 MTF 的计算精度。但是地面分辨率达到 2 m 及以下的相机对月成像时,受月球不平整表面的影响,很难获取到均匀的圆形边缘图像。Kang 等^[13],使用聚类算法对 KOMPSAT-3 在轨拍摄的星点图像进行降噪处理,重建二维点扩散函数,计算弧矢和子午方向的 MTF,评估星载相机的状态,该方法仅仅采用单个星点,抗噪声干扰的能力较弱。程雪等^[14]研究了基于曲面插值重建点扩散函数(point spread function, PSF)的方法,在仪器干扰源定位、光学调焦领域具有工程应用价值,但是并未通过试验评估调焦精度。王雯蕊等^[15]研

究了基于多图超分辨重建星点的方法,并将其运用在提升精细导星仪星点质心定位精度领域。文献[16]研究了一种基于点和线对应的高效准确姿态估计方法,在低空导航、自主机器人和 3D 场景重建中具有潜在的应用前景。文献[17]研究了一种快速鲁棒的光学目标检测方法,提高目标检测的精度和效率。文献[18]提出一种融合 YOLOv9-SOEP 算法和双目立体视觉的输电线路山火火焰高度测量方法,有效提升了小目标检测的平均精度和召回率。上述工作在提升小目标重建精度,效率和鲁棒性方面进行了研究,虽然未运用在光学相机调焦领域,但是为基于星点图像的高鲁棒性调焦算法研究提供了一定的参考。

本文提出了基于多个星点图像的空间相位差(spatial phase difference, SPD)重建 PSF,根据重建后的 PSF 定量评估相机的离焦状态,结合探测器位置拟合调焦曲线,并计算相机最佳探测器位置的方法。该方法能够用于定量计算空间光学相机的离焦量,并作为空间相机在轨调焦的依据。结果表明,文中提出的方法具有较高的定焦精度,对噪声等干扰具有较强的鲁棒性。

1 自动调焦算法的工作原理及流程

1.1 自动调焦算法的工作原理

单个点光源通过空间相机成像后,其像点是一个弥散斑,即 PSF。若探测面偏离了理想像面,则随着离焦量不同,与之相应的 PSF 直径也不同。基于这一原理,设计算法,计算相机不同离焦量对应的 PSF 宽度,以此定量反应光学系统的离焦状态。

星点图像是 PSF 被探测器下采样的结果,此过程中,PSF 部分相位对应的光强信息会丢失,并且灰度值较低的像元容易受到暗场噪声的影响,所以通过单个星点图像高精度重建 PSF 的难度较大。根据宇宙中恒星的空间分布具有随机性,每个星点图像的 SPD 不同,包含了不同相位对应的光强信息的特性,使用多个星点图像提升 PSF 的重建精度,从而提升相机离焦量计算的准确性。

1.2 自动调焦算法的工作流程

图 1 为自动调焦算法的流程图。主要由星点图像预处理、星点质心提取及相位差计算、点扩散函数重建及拟合、图像清晰度评价以及调焦曲线拟合等组成。星点图像经过灰度值归一化等预处理后,提取星点的质心。在

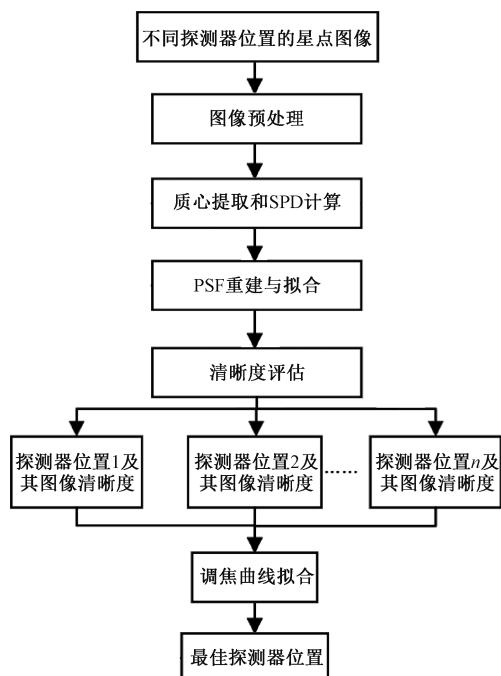


图 1 自动调焦算法流程

Fig. 1 Automatic focusing algorithm flowchart

本文中 SPD 定义为:在图像坐标系下,星点图像像素点位置与质心位置的差值。计算质心位置后再计算差值得到 SPD,根据多个 SPD 不同的星点图像重建 PSF,将重建完成的 PSF 进行拟合,得到相机离焦状态的定量评价指标,最后根据调焦曲线计算最佳探测器位置。

1) 图像的预处理

空间相机对星成像时,时延积分型互补式金属氧化物半导体 (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS) 器件的行频误差会影响积分方向(图像竖直方向)的 PSF,因此本文的算法只提取非积分方向(图像水平方向)的 PSF,评估相机离焦状态。如图 2 中的步骤 A 所示,提取星点图像最大灰度值所在行的像素灰度值,构成一维 PSF,本文的算法在每个探测器位置的相同视场上提取 6 个 PSF。

理想点扩散函数的能量在远离质心的位置会迅速衰减到 0,但是受热噪声和暗电流等因素的影响,光电成像器件在未接受到光能量的情况下,其响应值不为 0,此值被称为暗场值,在重建点扩散函数之前需要将星点图像暗场值置 0。

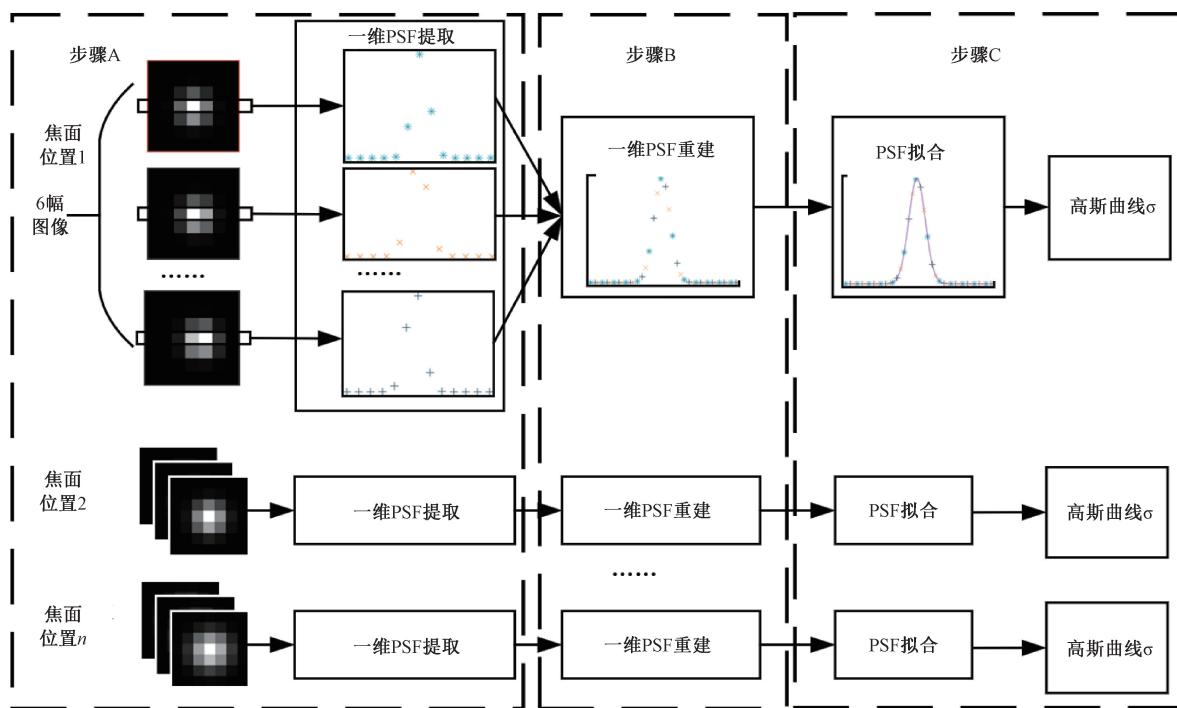


图 2 PSF 重建原理

Fig. 2 PSF reconstruction schematic diagram

由于恒星的辐射亮度不同,空间相机对星成像过程中,星点图像的灰度值有差异,此差异会导致辐射亮度较高的星点图像在重建 PSF 时所占的权重更大,为了避免此情况,需要将每个星点图像的灰度值除以星点图像的

总灰度值,将辐射亮度规范到相同水平。

2) 星点图像质心提取与 SPD 计算

使用一阶矩方法计算星点质心位置,并计算每个像素点到质心的距离,得到灰度值-质心距矩阵,如式(1)所示。

$$\begin{cases} cent = \sum_i^n \frac{x_i DN(x_i)}{DN(x_i)} \\ SPD(x_i) = x_i - cent \\ DNSPD = \begin{bmatrix} DN \\ SPD \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_i 和 $DN(x_i)$ 分别表示像素坐标值和像素灰度值, $DNSPD$ 的第 1 行是每个像素点的规范化后灰度值, 与之对应的第 2 行为该像素点到质心的距离。

3) 基于相位信息的 PSF 重建

PSF 重建是自动调焦算法关键的部分, 重建精度直接影响了相机离焦状态评价的准确性, 本文提出的基于相位信息的 PSF 重建过程如图 2 步骤 B 所示。每个一维 PSF 的质心位置不同, 所以像素点到质心位置的差值也不同。以灰度值-质心距矩阵中的质心距为横坐标, 对应的灰度值为纵坐标, 将 6 个 PSF 合并成 1 个 PSF, 合并后的 PSF 采样点数量是合并前的 6 倍, 有效的增加了 PSF 的数据点。

4) 相机离焦状态评价准则

重建 PSF 后, 得到的是离散的, 很难直接定量评估相机离焦状态, 所以需要对离散 PSF 进行建模, 通过模型参数定量评价相机的离焦状态。点扩散函数建模的方法有很多, 例如文献[19]提出的主成分分析法, 文献[20]提出的去噪自动编码器, 文献[21]提出的 Nijboer-Zernike 理论, 高斯函数拟合等。综合考虑建模精度和模型参数计算难易程度, 选择高斯函数拟合法为离散点扩散函数建模方法, 以高斯标准差为评价准则, 高斯函数表达式如式(2)所示。

$$y = Ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} + c \quad (2)$$

其中, x 和 y 分别为离散点扩散函数的像素点位置和灰度值。 A 、 μ 、 σ 和 c 为待拟合系数。本文采用了基于信赖域方法的最小二乘法拟合高斯曲线。

根据式(2)和最小二乘法, 将离散点扩散函数值以及像元细分后的像素点位置作为观测值, 最小二乘计算公式如式(3)所示。

$$\min \left(\sum_i^n [y_i - (Ae^{-\frac{(x_i-\mu)^2}{2\sigma^2}} + c)]^2 \right) \quad (3)$$

文献[22]中介绍的信赖域方法基本思路为: 首先给定一个所谓的“信赖域半径”作为位移长度的上界, 并以当前迭代点为中心以此“上界”为半径确定“信赖域”。然后, 通过求解这个区域内的“信赖域子问题”(目标函数的二次近似模型)的最优点来确定“候选位移”。若候选位移能使目标函数值有充分的下降量, 则接受该候选位移作为新的位移, 并保持或扩大信赖域半径, 继续新的迭代; 否则, 说明二次模型与目标函数的近似度不够理想, 需要缩小信赖域半径, 再通过求解新的信赖域内的子

问题得到新的候选位移。如此重复下去, 直到满足迭代终止条件。

5) 调焦曲线拟合

通过理论分析, 确定调焦曲线的模型。在 ZEMAX 中建立光学系统, F 数为 5, 焦距为 1 070 mm, 工作波段为可见光波段。调整像面的位置, 使光学系统离焦, 将 ZEMAX 计算得到的理想点扩散函数拟合为一维高斯曲线, 并计算高斯标准差, 如图 3 所示, 根据高斯标准差的变化趋势, 选择二次曲线模型拟合高斯标准差与离焦量。 R^2 为 0.993 6, 均方根误差(root mean square error, RMSE) 为 0.003 5, 此结果表明: 高斯标准差与离焦量的关系可以用二次曲线描述。因此选择二次曲线作为调焦曲线的模型。

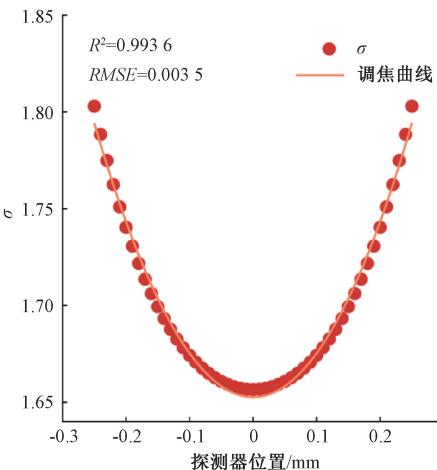


图 3 理想 PSF 得到的 σ 与离焦量的关系

Fig. 3 The relationship between σ and defocusing amount obtained by ideal PSF

计算 σ 后, 将其与探测器感光面位置按照二次曲线模型进行拟合, 得到相机的调焦曲线, 调焦曲线的最低点, 即二次曲线对称轴的位置, 为算法计算出的最佳探测器位置。

2 自动调焦算法试验平台与对比算法

2.1 试验平台组成

为了验证本文提出算法的定焦精度, 搭建了试验平台, 如图 4 所示。

试验平台由上位机, 光学相机, 平行光管, 星点靶标, 积分球, 转台等组成; 星点靶标上有 3 个具有空间相位差的星点, 每个星点的直径与像元尺寸对应, 靶标置于平行光管的像平面上, 积分球提供均匀照明, 光束通过平行光管后, 入射到光学相机镜头, 成像到相机的探测器平面, 星点图像数据最终被采集到上位机。平行光管的焦距为

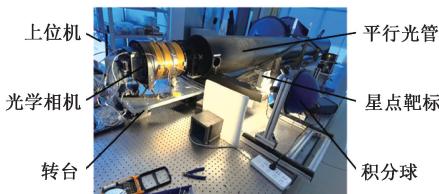


图 4 试验平台

Fig. 4 Experiment platform

6 000 mm, 星点靶标的位置已经通过高斯目镜和平面反射镜标定, 能够确保光管的出射光为平行光, 模拟无穷远处的目标; 相机的焦距为 1 070 mm, 口径为 210 mm, 半焦深为 32.8 μm。相机的最佳探测器位置已经通过传递函数测试精确标定。由于相机的探测器为时延积分型 CMOS 传感器, 所以需要由转台带动相机进行推扫成像。

2.2 对比算法介绍

在光学相机自动调焦领域, 常用空间域梯度法、频率域法、统计学方法进行图像清晰度评价。上述方法的主要原理为计算图像的高频成分, 当完全对焦时, 图像清晰, 包含边缘信息的高频分量多。理想评价函数应具有 4 个特点: 1) 只有一个峰值; 2) 峰值对应最佳探测器位置; 3) 能正确反映离焦的趋势; 4) 较高的噪声鲁棒性。

为了验证本文提出算法的有效性, 对比了 4 种图像清晰度评价函数, 即:

1) 空间域方法

离焦量越小, 图像边缘越锐化, 边缘梯度越高。Roberts 函数计算对角方向相邻像素灰度值之差, 得到边缘梯度。灰度值之差越大, Roberts 函数值越大, 说明图像边缘越锐利, Roberts 函数的计算方法如式(4)所示。

$$G_R(i) = \sum_{(x,y)} \{ |DN_i(x,y) - DN_i(x-1,y)| + |DN_i(x,y) + DN_i(x-1,y)| \} \quad (4)$$

其中, $DN_i(x,y)$ 表示第 i 幅图像, 坐标 (x,y) 处的灰度值; $G_R(i)$ 表示第 i 幅图像的 Roberts 函数值。

Tenengrad 函数采用 Sobel 算子的两个卷积核 \mathbf{G}_x 和 \mathbf{G}_y 来求图像中每点的梯度具体计算方法如式(5)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_i(x,y) = \sqrt{\mathbf{G}_x * DN_i(x,y) + \mathbf{G}_y * DN_i(x,y)} \\ G_T(i) = \sum_x \sum_y [S_i(x,y)]^2 (S_i(x,y) > T) \\ \mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (5)$$

其中, “*”代表卷积, $S_i(x,y)$ 表示第 i 幅图像, 坐标 (x,y) 处的 Sobel 梯度, $G_T(i)$ 为表示第 i 幅图像的

Tenengrad 函数值, T 为梯度阈值, 当 Sobel 梯度大于阈值时, 才会累加到 Tenengrad 函数中, 降低噪声的影响。

2) 频率域方法

图像清晰的程度主要由图像的高频分量确定, 因此可以根据高频分量的强度作为清晰度评价函数的主要依据。将图像变换到频率域, 使用频率幅值谱来构造清晰度评价函数。

傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)清晰度评价函数, 对图像进行离散傅里叶变换后, 频率幅度越大, 表明图像越清晰。FFT 清晰度评价函数的计算方法如式(6)所示。

$$G_F(i) = \frac{1}{MN} \sum_{(x,y)} \sqrt{x^2 + y^2} |F(x,y)| \quad (6)$$

其中, $|F(x,y)|$ 表示图像经过傅里叶变换后的幅值谱, $G_F(i)$ 表示第 i 幅图像的 FFT 清晰度评价函数值, M 和 N 分别表示图像的行数和列数。

将离散傅里叶变换替换为离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT), 得到 DCT 清晰度评价函数, 计算方法如式(7)所示。

$$G_D(i) = \frac{1}{MN} \sum_{(x,y)} (x+y) |D(x,y)| \quad (7)$$

其中, $|D(x,y)|$ 表示图像经过离散余弦变换后的幅值谱, $G_D(i)$ 表示第 i 幅图像的 DCT 清晰度评价函数值。

3) 基于统计学的方法

清晰的图像具有更多的细节信息, 在灰度上的表现就是灰度分布的直方图集中度低, 灰度范围大, 根据这一特性可以用统计学的方法描述图像的清晰度。

Vollaths 函数通过计算自相关值评价图像的清晰度, 自相关值越大, 表明图像越清晰。Vollaths 函数的计算方法如式(8)所示。

$$G_V(i) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} DN_i(x,y) \times |DN_i(x+1,y) - DN_i(x+2,y)| \quad (8)$$

其中, $G_V(i)$ 表示第 i 幅图像的 Vollaths 函数值。Range 函数通过图像灰度直方图, 计算极差来评估相机的离焦状态。Range 函数的计算方法如式(9)所示。

$$G_R(i) = \max(K_i^b \times C_i^b) - \min(K_i^b \times C_i^b) \quad (9)$$

其中, K_i^b 和 C_i^b 表示第 i 幅图像的灰度区间 b 的灰度值和像素数量, $G_R(i)$ 表示 Range 函数值, 图像越清晰函数值越小, 为了与其他函数随离焦变化的趋势表示一致, 绘制 Range 函数值与离焦关系的曲线时, 将 Range 函数值取反, 并将取反后的最小值置 0。

4) 基于图像特征的方法

此外, 还有基于特征的评价函数, 清晰的目标具有一定的特征, 但是图像退化后, 目标特征会发生变化。基于特征的评价函数根据此原理评估离焦状态, 本文对比了

文献[23]提出的 BRISQUE 和文献[24]提出的 NIQE 两种基于特征图像清晰度评价算法。

2.3 试验评定准则

在理想情况下,当探测器位于事先标定出的最佳位置时,相机采集到的星点图像能量最集中,其点扩散函数拟合出的高斯曲线 σ 有最小值,此位置也是调焦曲线的最低点。但是由于图像噪声,高斯曲线和调焦曲线的拟合误差等因素的影响,计算出的最佳探测器位置与标定值有一定误差,如式(10)所示。

$$e_0 = p_0 - p_a \quad (10)$$

其中, e_0 为自动调焦算法的计算误差, p_0 和 p_a 分别为通过传递函数标定出的最佳探测器位置和文中提出算法计算的最佳探测器位置。

PSF 重建后需要拟合为高斯曲线,以 σ 为依据定量评估相机离焦状态,以拟合优度来衡量高斯曲线的拟合精度, R^2 计算式如(11)所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y_{fit})^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (11)$$

其中, y_{fit} 为拟合为高斯曲线后的 PSF 值, y_i 为重建后的 PSF 值。

采用同样的方法评估调焦曲线的拟合优度。

当试验次数较多,并且试验结果符合正态分布时,本文使用 95% 置信区间(95% CI.),来衡量算法的定焦精度,置信区间的上下界计算公式如式(12)所示。

$$\begin{cases} Down = \text{mean}(p_a) - 1.96 \times \text{std}(p_a) \\ Upper = \text{mean}(p_a) + 1.96 \times \text{std}(p_a) \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\text{mean}(p_a)$ 和 $\text{std}(p_a)$ 分别表示自动调焦算法计算出最佳探测器位置的平均值和标准差, Down 和 Upper 分别表示 95% 置信区间的下界和上界,本文中,要求 95% 置信区间的上下界在与 p_0 的误差值均小于 1/6 半焦深。

3 试验结果与分析

3.1 自动调焦算法定焦精度试验

采集不同探测器位置的星点图像,使用文中提出的算法重建 PSF,拟合为高斯曲线后计算 σ ,根据 σ 和探测器位置拟合调焦曲线,计算最佳探测器位置。具体试验流程为:

- 1) 首先将星点靶标放置平行光管的焦平面上;
- 2) 调整积分球亮度,调整相机积分级数,曝光时间,增益,使星点图像灰度值在 500~3 500;
- 3) 调整相机位置,使星点图像位于相机的中心视场;
- 4) 控制转台带动相机在积分方向上转动,同时采集星点图像;

5) 控制转台带动相机在视场方向上转动,使星点图像的质心移动 0.1~0.5 个像元,采集星点图像;

6) 控制调焦机构调整探测器位置,步长为 0.01 mm;

7) 重复步骤 4)~6),采集 18 个探测器位置的星点图像,如图 5 所示。

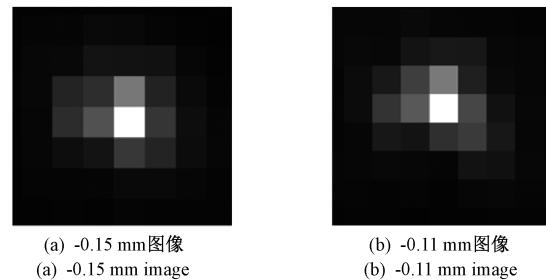


图 5 采集到的部分星点图像

Fig. 5 Part of the collected star images

星点图像采集结束后,使用文中提出的算法重建 PSF 并拟合,如图 6 所示。圆点表示离散的 PSF 值,直线代表高斯曲线。高斯曲线的 σ 值和拟合优度如表 1 所示。根据 σ 值和对应的探测器位置按照二次函数拟合调焦曲线。

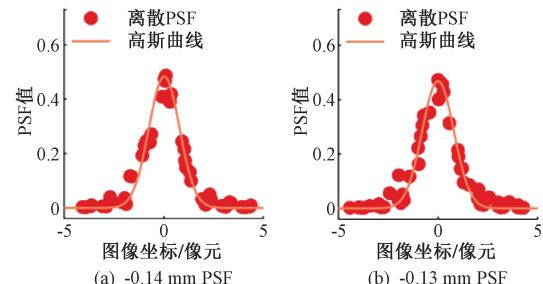


图 6 不同探测器位置的 PSF 重建结果

Fig. 6 PSF reconstruction results of different detector positions

表 1 探测器位置对应的高斯曲线 σ 与拟合优度 R^2

Table 1 The Gaussian curve σ corresponding to the detector position and the goodness of fit R^2

探测器位置/mm	σ	R^2	探测器位置/mm	σ	R^2
-0.24	1.227 2	0.86	-0.15	0.816 0	0.95
-0.23	1.122 8	0.89	-0.14	0.796 9	0.96
-0.22	1.095 5	0.91	-0.13	0.772 7	0.96
-0.21	1.057 9	0.90	-0.12	0.785 0	0.95
-0.20	1.000 4	0.90	0.11	0.806 0	0.95
-0.19	0.907 9	0.93	-0.10	0.818 4	0.94
-0.18	0.876 0	0.95	-0.09	0.866 0	0.94
-0.17	0.844 9	0.96	-0.08	0.946 7	0.91
-0.16	0.810 5	0.92	-0.07	1.072 6	0.90

调焦曲线如图 7 所示, 将调焦曲线拟合为二次多项式: $44.9730x^2 + 12.4811x + 1.6566$, 曲线最低点的横坐标, 即二次曲线的对称轴为 $\frac{-12.4811}{2 \times 44.9730} = -0.1387 \text{ mm}$, 即自动调焦算法计算出的最佳探测器位置, 通过传递函数标定出的最佳探测器位置为 -0.14 mm , 自动调焦算法的 e_0 为 -0.0013 mm , 满足 $1/6$ 半焦深的要求。图 7 中“*”表示 σ , 实线表示调焦曲线, 虚线表示调焦曲线的对称轴, 即 p_a 。

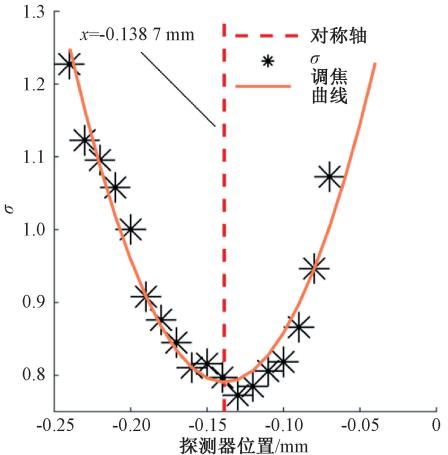


图 7 计算得到的 σ 与探测器位置拟合出调焦曲线

Fig. 7 The calculated σ is fitted with the detector position to obtain the focusing curve

3.2 定焦精度对比试验

为了验证本文提出的算法能提高定焦精度, 分别使用空间域、频率域、统计学和基于特征的算法, 定量评估星点图像的清晰度, 拟合调焦曲线, 计算最佳探测器位置, 在定焦精度试验中, 每个探测器位置共采集了 6 个星点图像, 所以, 使用这 6 个星点图像平均清晰度来评估相机的离焦状态。得到的图像清晰度变化曲线如图 8 所示。拟合调焦曲线后, 定焦精度如表 2 所示, 其中, Rob. 为 Roberts 函数, Ten 为 Tenengrad 函数, Vol. 为 Vollaths 函数, Ran. 为 Range 函数, NIQ. 为 NIQE 评价算法, BRQ. 为 BRISQUE 评价算法。

表 2 不同图像清晰度评价函数的 e_0 以及调焦曲线 R^2

Table 2 The e_0 and focusing curve R^2 of different image sharpness evaluation functions

评价函数	e_0/mm	R^2
Rob.	0.0113	0.87
Ten.	0.0080	0.91
FFT	0.0063	0.928
DCT	0.0084	0.88
Ran.	0.0014	0.75
Vol.	0.0072	0.89
NIQ.	0.0022	0.31
BRQ.	0.0022	0.36

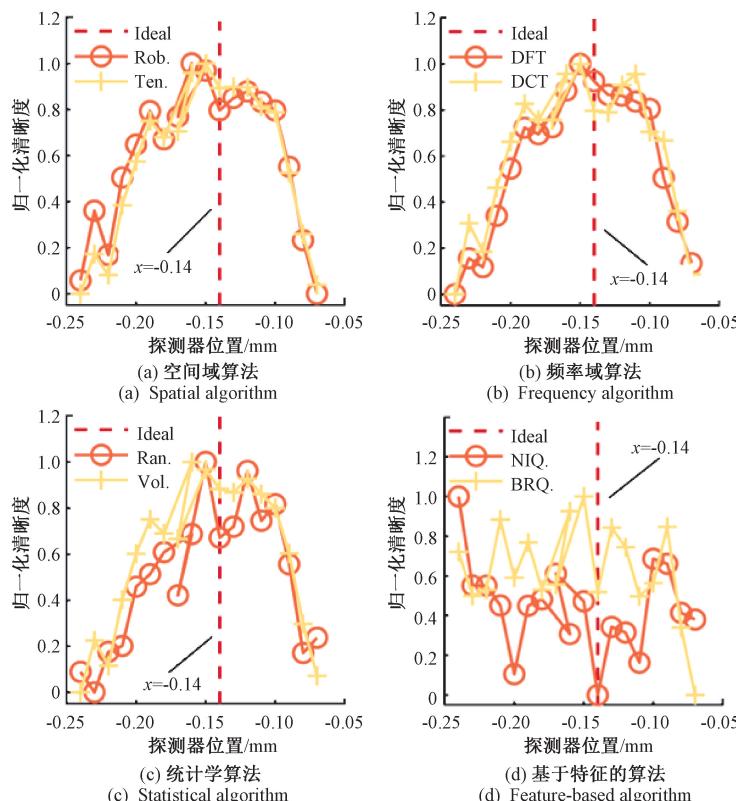


图 8 不同图像清晰度评价算法得到的清晰度曲线

Fig. 8 The sharpness curves obtained by different image sharpness evaluation algorithms

Range 函数的 e_0 最小为 0.001 4 mm,但是调焦曲线 $R^2 < 0.85$,说明其反映离焦状态的准确性较低;Roberts 函数、Tenengrad 函数、Variance 方差函数, Vollaths 函数以及两种频率域评价函数的误差超出了 1/6 半焦深;两种基于图像特征的算法计算得到结果,并没有空间域,频率域和统计学方法得到图像清晰度曲线的趋势,无法拟合调焦曲线。

试验结果表明,针对星点图像,对比图像清晰度评价函数,本文提出的算法有更高的定焦精度,并且调焦曲线的 R^2 更高,表明本文提出的使用 SPD 重建 PSF,再拟合为高斯曲线计算 σ 值的方法更能符合图像清晰度随相机探测器位置变化的实际趋势。

3.3 噪声鲁棒性试验

受热噪声、读出噪声等因素的影响,星点图像信噪比会严重下降。因此,为了测试所提出算法对于图像噪声的稳定性,在原始图像上分别叠加不同强度的高斯噪声,使星点图像的 SNR 分别为 5、10 和 15 dB。并且与其他图像清晰度算法进行了对比,以验证提出算法对在低信噪比水平下的有效性。由于基于特征的两种评价函数在本文中调焦曲线的 R^2 较低,所以本节不对这两种评价函数进行噪声鲁棒性试验。

由表 3 的统计结果可知,当图像信噪比 ≥ 10 dB 时,本文算法的 e_0 在 1/6 半焦深以内,满足精度要求,并且调焦曲线的拟合优度在 0.85 以上。其他几种评价函数随着信噪比的下降,最佳焦面的计算精度均不能满足要求,且调焦曲线的 R^2 较差,只有 Tenengrad 函数和两种频率域评价函数的 R^2 在 0.85 以上。

表 3 噪声影响下 e_0 与调焦曲线 R^2 的置信区间

Table 3 Confidence intervals of e_0 and R^2 under the influence of noise

评价 函数	信噪 比/dB	e_0/mm	R^2
本文算法	5	[-0.006 9, 0.004 3]	[0.81, 0.98]
	10	[-0.002 8, 0.002 7]	[0.88, 0.98]
	15	[-0.001 0, 0.002 3]	[0.92, 0.97]
Rob.	5	[0.003 3, 0.013 3]	[0.67, 0.91]
	10	[0.005 2, 0.012 7]	[0.74, 0.92]
	15	[0.006 9, 0.012 1]	[0.79, 0.92]
Ten.	5	[0.005 8, 0.010 0]	[0.83, 0.93]
	10	[0.006 8, 0.009 1]	[0.87, 0.92]
	15	[0.007 3, 0.008 6]	[0.89, 0.92]
FFT	5	[0.005 2, 0.009 0]	[0.85, 0.93]
	10	[0.005 8, 0.007 9]	[0.89, 0.93]
	15	[0.006 0, 0.007 2]	[0.91, 0.93]

表 3(续)

评价 函数	信噪 比/dB	e_0/mm	R^2
DCT	5	[0.005 3, 0.010 6]	[0.81, 0.93]
	10	[0.006 7, 0.009 8]	[0.86, 0.93]
	15	[0.007 4, 0.009 3]	[0.87, 0.92]
Ran.	5	[-2.012 7, 2.001 3]	[-0.09, 0.41]
	10	[-11.140 7, 11.315 8]	[-0.08, 0.43]
	15	[-0.261 4, 0.246 2]	[0.02, 0.65]
Vol.	5	[0.003 6, 0.010 5]	[0.76, 0.92]
	10	[0.005 1, 0.009 1]	[0.83, 0.92]
	15	[0.006 0, 0.008 2]	[0.86, 0.91]

4 结 论

本文提出了基于多个星点图像计算最佳探测器位置的方法,并介绍了该方法的工作流程和原理。然后详细介绍了其中的关键步骤以及算法,并引入了常用图像清晰度评价函数作为对比算法。最后,搭建了试验平台,获取星点图像,测试了本文提出方法的定焦精度以及对图像噪声的鲁棒性。试验结果表明:本文提出的算法能够准确反映图像清晰度与相机离焦量的关系;最佳焦面位置的计算误差为 -0.001 3 mm,图像信噪比 ≥ 10 dB 时,计算误差在 1/6 半焦深范围以内,调焦曲线的拟合优度 > 0.85 ;本文提出的算法在定焦精度和噪声鲁棒性上均优于文中的对比算法。满足了空间相机自动调焦的要求。

但是本文的研究仍然有需要改进的地方,实际的图像噪声情况比模拟的高斯噪声更加复杂,仅在图像上叠加高斯噪声验证鲁棒性有一定局限性,噪声鲁棒性试验需要进一步完善。例如,探测器的暗电流和读出噪声以及成像电路的增益对图像信噪比均有影响,基于这些特性,改变探测器型号和成像电路可以丰富不同信噪比的图像数据,进一步验证算法的工程应用价值。本文定焦精度试验使用相机的调焦机构,只具备沿光轴方向上调整离焦的能力,对于具备调整倾斜功能的调焦机构,可以通过本算法计算两个边缘视场的最佳探测器位置,计算出倾斜角的调整量,进行倾斜调整试验。

参考文献

- [1] 刘伟毅,徐钰蕾,石磊,等.航空低温温度对自准直焦系统的影响[J].光学精密工程,2020,28(6):1226-1235.
LIU W Y, XU Y L, SHI L, et al. Influence of aviation

- low temperature on auto-collimating focusing system [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(6): 1226-1235.
- [2] SPINOULAS L, KATSAGGELOS A K, JANG J, et al. Defocus-invariant image registration for phase-difference detection auto focusing [C]. The 18th IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 2014: 1-2.
- [3] 王帆. 基于视差测距的光电跟踪测量设备实时调焦方法研究 [D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019.
- WANG F. Research on real-time focusing method based on parallax ranging of photoelectric tracking and measuring equipment [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [4] 路朋罗. 基于图像处理技术的自动调焦方法研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- LU P L. Study on auto-focusing methods based on image processing technology [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2016.
- [5] LYU H Y, HAN CH SH, XUE X CH, et al. Autofocus method for scanning remote sensing cameras [J]. Applied Optics, 2015, 54(20): 6351-6359.
- [6] 高慧婷, 刘薇, 何红艳. 基于点源阵列的星载面阵 CMOS 相机静态 PSF 测量 [J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(1): 53-60.
- GAO H T, LIU W, HE H Y. Static PSF measurement method of satellite borne area CMOS camera with point array [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(1): 53-60.
- [7] RAUCHMILLER JR R F, SCHOWENGERDT R A. Measurement of the landsat thematic mapper modulation transfer function using an array of point sources [J]. Optical Engineering, 1988, 27(4): 334-343.
- [8] 徐伟伟, 张黎明, 杨宝云, 等. 光学卫星相机在轨调制传递函数检测方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(22): 194-200.
- XU W W, ZHANG L M, YANG B Y, et al. On-orbit modulation transfer function estimation of optical satellite camera [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 194-200.
- [9] International Organization for Standardization. Photography-electronic still picture imaging-resolution and spatial frequency responses: ISO 12233: 2017[S]. 2017.
- [10] WANG ZH P, XIONG X X, CHOI T, et al. On-orbit characterization of modis modulation transfer function using the moon [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 4112-4121.
- [11] CHOI T, XIONG X X, WANG ZH P. On-orbit lunar modulation transfer function measurements for the moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 270-277.
- [12] 程莹. 空间相机在轨 MTF 检测技术研究 [D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2018.
- CHENG Y. On-orbit modulation transfer function (MTF) measurement for space camera [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics Chinese Academy of Science), 2018.
- [13] KANG C H, CHUNG J H, KIM Y H. On-orbit MTF estimation for the KOMPSAT-3 satellite using star images [J]. Remote Sensing Letters, 2015, 6(10/12): 1002-1011.
- [14] 程雪, 刘晓华, 傅雨田, 等. 基于曲面插值的光学系统点扩散函数重构 [J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 279-291.
- CHENG X, LIU X H, FU Y T, et al. Point spread function reconstruction for optical system based on surface interpolation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 279-291.
- [15] 王雯蕊, 张泉, 高源蓬, 等. 基于多图超分辨率重建的精细导星仪星点质心定位精度提升方法 [J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 306-314.
- WANG W R, ZHANG Q, GAO Y P, et al. Precision improvement method of star centroid positioning based on multi-image super-resolution reconstruction for fine guide sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 306-314.
- [16] BASNAYAKA R, YU Q D. An efficient and accurate solution for the PnP problem [J]. Instrumentation, 2025, 12(3): 63-75.
- [17] ZHANG L, LIU X, ZHANG CH, et al. A high-quality

- ellipse detection method for machine vision based on geometric constraints and hierarchical clustering [J]. Instrumentation, 2025, 12(3) : 39-52.
- [18] 赖东阳, 邱志斌, 杨泽鼎, 等. 基于 YOLOv9-SOEP 与双目立体视觉的输电线路山火火焰高度测量 [J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(8) : 258-268.
- LAI D Y, QIU ZH B, YANG Z D, et al. Flame height measurement of transmission lines wildfire based on YOLOv9-SOEP and binocular stereo vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(8) : 258-268.
- [19] JEE M J, BLAKESLEE J P, SIRIANI M, et al. Principal component analysis of the time-and position-dependent point-spread function of the advanced camera for surveys [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007, 119(862) : 1403-1409.
- [20] JIA P, LI X Y, LI ZH Y, et al. Point spread function modeling for wide-field small-aperture telescopes with a denoising autoencoder [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 493(1) : 651-660.
- [21] HAVER S. The extended nijboer-zernike diffraction theory and its applications [J]. Applied Sciences, 2010; 9789078314127.
- [22] JORGE N, STEPHEN J W. Numerical optimization [M]. New York: Springer, 2006.
- [23] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-Reference image quality assessment in the spatial domain [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(12) : 4695-4708.
- [24] MITTAL A, SOUNDARARAJAN R, BOVIK A C. Making a "completely blind" image quality analyzer [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 22(3) : 209-212.

作者简介



彭越洋, 2021 年于西南交通大学获得学士学位, 现为中国科学院大学博士研究生, 主要研究方向为空间光学遥感器设计。

E-mail: 13992547069@163.com

Peng Yueyang received his B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2021.

He is currently a doctoral student at the University of Chinese Academy of Sciences. His main research interest is the design of space optical remote sensors.



傅紫源, 2012 年于北京理工大学获得学士学位, 2017 年于美国马里兰大学帕克分校获得硕士学位, 现为上海卫星工程研究所历任卫星型号数传分系统设计师、卫星总体设计师, 主要研究方向为卫星数传分系统设计、卫星总体设计。

E-mail: fuziyuan@vip.163.com

Fu Ziyuan received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2012, and his M. Sc. degree from the University of Maryland, College Park in 2017. He is currently a satellite data transmission subsystem designer and satellite chief designer at the Shanghai Satellite Engineering Institute. His main research interests include satellite data transmission subsystem design and satellite overall design.



陈长征(通信作者), 2000 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2007 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为长春光学精密机械与物理研究所研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间光学遥感器总体设计。

E-mail: chencz@ciomp.ac.cn

Chen Changzheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2000, and his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2007. He is currently a researcher and doctoral supervisor at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is the overall design of space optical remote sensors.