

基于 1.2 m 望远镜系统实时自动调焦的清晰度评价算法

杨梦雪^{1,2}, 李祝莲^{1,3}, 李荣旺^{1,3}, 李语强^{1,3*}

¹中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650216;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210034

摘要 望远镜自动调焦技术在提高天文观测效率和观测精度方面有着重要的作用。针对云南天文台 1.2 m 望远镜系统在观测空间目标时受外界多重因素影响下的像点离散、能量分散等问题, 提出了一种改进定心精度的半通量直径(HFD-ICA)实时自动调焦清晰度评价算法。该方法在进行图像预处理的基础上, 采用改进的强度加权质心法(improved IWC), 以亚毫米的精度迭代计算星像质心; 然后测出星像HFD, 根据HFD值用双曲线法拟合出V型调焦曲线。经过大量实验表明, 该算法在指导望远镜调焦时能够迅速找到焦点位置, 其精确定焦率与高精度天文图像处理软件IRAF的计算结果相当, 在调焦过程中平均处理时长为 4.7 s, 耗时仅为IRAF的 1/10, 满足 1.2 m 望远镜自动调焦的实时性与精度要求。所提方法的调焦效率大致提高 37%, 具有一定的可行性与实用性。

关键词 测量; 自动调焦; 望远镜; 图像清晰度; 评价算法

中图分类号 TP272 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221114

1 引言

在光学系统中, 只有物像满足共轭关系时, 才能获得清晰的成像。然而, 由于外界环境以及光学系统自身的影响, 大部分光学系统都需要进行调焦。传统的手动调焦不仅耗时费力, 且调焦精度低。随着自动化和成像系统的发展, 自动调焦技术被提出。望远镜作为天文光学系统的核心设备, 是捕捉天体信息的利器。地基望远镜通常口径较小且观测范围有限, 观测时受多方因素的影响, 成像的正焦位置会发生变化。如果不进行实时调焦, 那么就会造成像点离散、能量分散, 严重影响跟踪测量效果^[1], 因此实现地基望远镜的自动调焦十分重要。

本文主要面向云台 1.2 m 望远镜库德光路成像系统的调焦需求展开研究, 该望远镜的主镜面型为旋转抛物面, 有效通光口径为 1060 mm, 焦距为 1800 mm。为了适应激光测距和自适应光学, 副镜也为旋转抛物面, 其焦距为 240 mm, 主副镜组成共焦点抛物面对, 形成了一个无焦系统^[2]。实现该系统自动调焦的具体思路为: 首先由成像相机拍摄图像, 计算机根据调焦评价算法计算图像的清晰度评价, 并发送控制指令给调

焦执行机构, 直到找到正焦位置。在这个过程中, 图像清晰度评价算法是决定焦点位置的关键, 算法的性能直接决定着望远镜自动调焦的精度。由于天体目标成像的特殊性, 适合用来评价天文图像清晰度的算法比较少。李晓燕等^[3]用计算成像大小和圆度来评价恒星图像清晰度, 该方法计算量小, 但是对于离焦量较大的图像算法失效。黄垒等^[4]利用IRAF软件包计算点源星像的半峰全宽(FWHM)值, 用于评价天文图像清晰度, 该算法的处理精度很高, 但是实时性较差。苑嘉辉等^[5]提出了基于点源强度分布进行点扩展函数(PSF)拟合并计算FWHM的方法, 该方法耗时较少, 但是调焦精度不够高。Weber等^[6]提出了一种基于半通量直径(HFD)的方法, 该方法稳健高效且鲁棒性好, 是目前望远镜调焦最常用的一种方法, 但是他们没有对星像的定心精度进行深入研究, 处理重度离焦星像时会引入一个显著的定心误差。

本文根据 1.2 m 望远镜的成像性能, 结合其观测目标的特性, 在 Weber 等的基础上提出了一种改进定心精度的HFD(HFD-ICA)实时自动调焦清晰度评价算法。该方法首先对采集到的原始图像序列(离焦-聚焦-离焦)进行预处理以消除冗余噪声, 然后采用改进

收稿日期: 2022-05-13; 修回日期: 2022-07-10; 录用日期: 2022-08-10; 网络首发日期: 2022-08-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(12033009)、国家自然科学基金(U1431116)、广东省基础与应用基础研究重大项目(2019B030302001)

通信作者: *lyq@ynao.ac.cn

的强度加权质心法(improved IWC)法,以亚毫米的精度迭代计算星像质心。在精确计算星像质心后,测出星像的 HFD,使用双曲线拟合法拟合出 HFD 值的 V 型调焦曲线。通过大量实验验证了本文提出的 HFD-ICA 法的执行性能相对较高,在实际观测过程中有一定的可行性。

2 问题分析

自动调焦有多种方式,但是无论是采取哪一种方式,改变的都是光学元器件之间的间隔或者元器件与物、像面之间的距离,使得整个系统满足物像共轭关系。实现望远镜自动调焦需要解决各种具有挑战性的技术问题。理想情况下,任何自动调焦方法都应该具备以下特征:1)性能优于手动调焦模式;2)实时性好;3)稳定,即使极端条件下也能找到正确的焦点;4)能够处理任意离焦态的星像。

1.2 m 望远镜目前主要用于卫星激光测距以及空间目标的精密跟踪,在观测时对于非合作目标(如空间碎片等)的预报精度低,需要加宽探测器距离门,这会导致背景噪声增强^[7]。同时受环境等多重因素的影响,观测过程中望远镜的机械结构会发生形变,易使焦面离焦,尤其是在白天空间目标跟踪时,离焦现象出现得更频繁,极大降低了目标探测成功的概率。该望远镜现有的调焦方法还是以人工手动调整为主。在这种情况下,观测人员既需要对离焦信息进行快速检测以手动调整焦距,又需要对观测目标进行实时跟踪搜索以便激光准确击中目标,这是个很大的挑战。实现该望远镜的自动调焦迫在眉睫,首先要做的就是找到合适的调焦评价算法。传统的望远镜调焦评价算法如 Entropy 法、Energy 法等都是在统计分析的基础上实现的,对于这类图像纹理特征不明显、背景噪声大的图像难以保证实时性及抗噪性^[8]。现有的望远镜调焦评价算法的执行性能相对较低,对于高速运动的目标,很难从捕获的图像中提取目标特征,加之系统的硬件不足,无法评估大多数调焦算法与硬件的工程化水平。此外,不同用途的望远镜的观测目标空间结构都不尽相同,其他领域成功的调焦方案和数学模型不一定适用于当前望远镜的调焦,而当前找到一种稳定可靠且适合处理 1.2 m 望远镜调焦的评价算法尤为重要。

3 算法分析与设计

3.1 算法分析

1.2 m 望远镜目标成像多为点源,点源的能量集中度在一定程度上可以用来指导望远镜调焦。目前有两种方法用于表征点源的能量集中度:用于量化星像 PSF 宽度的 FWHM 和 HFD^[9]。FWHM 是星形宽度的测量,它是指在函数(在天文上,这里的函数多为高斯函数)的一个峰当中,前后两个函数值等于峰值一半的点之间的距离,如图 1 所示。

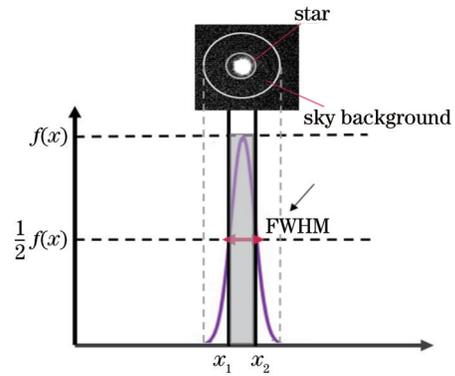


图 1 FWHM 的定义

Fig. 1 Definition of FWHM

高斯函数的函数式为

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中: σ 为方差,体现了星像能量集中度。

函数的 FWHM 为

$$W_{\text{FWHM}} = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma \approx 2.3548\sigma. \quad (2)$$

可以看出, σ 与 FWHM 之间存在着线性关系。处于不同状态的星像有着不同的能量集中度,使得 FWHM 可以作为调焦的清晰度评价法。为了使式(1)能更加直观地描述星像的 FWHM,对其进行变形处理并赋予实际含义^[10]后得到

$$f(x) = a \exp\left[-4(\ln 2) \frac{(x-b)^2}{W_{\text{FWHM}}^2}\right], \quad (3)$$

式中: a 为曲线峰的高度; b 为峰中心的位置。任意实常数 a 、 b 和非零的 W_{FWHM} 可以用来描述这条高斯曲线。不过该算法在执行时,需要进行曲线拟合,相对比较耗时,在本文中该算法仅用作对比分析。

另一种可以用来指导调焦的清晰度评价算法是 HFD(D_{HF}),它最早由 Larry Weber 和 Steve Brady 先提出来。HFD 定义为以恒星图像为中心的圆的直径,其中恒星总通量的一半在圆内,一半在圆外^[7],其数学表达式如下:

$$\sum_{i=1}^N V_i(d_i - R_{\text{HF}}) = 0 \Leftrightarrow R_{\text{HF}} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i d_i}{\sum_{i=1}^N v_i}, \quad (4)$$

$$D_{\text{HF}} = 2R_{\text{HF}}, \quad (5)$$

式中: v_i 为总像素值减去平均背景值的结果; d_i 为从质心到每个像素的距离; N 为外圆中的像素数; R_{HF} 是半通量半径。从图 2 直观地来理解 HFD^[11],图 2(a)是无星像的均匀背景噪声图,每个像素的通量相同,HFD 值为内圆直径,其面积为孔径面积的一半。图 2(b)为孔径内包括暗星的图,星像的中心形成了一座山,非常微弱的光影在它周围延伸,HFD 的值为暗弱光影的直径,HFD 的值比仅有背景噪声的情况小。图 2(c)中有

一个处于正焦状态的星像,背景噪声最小且星形稳定,通量大多分布在质心处,它有着最小的 HFD 值。HFD 方法是通过星像区域内所有的通量来确定的,通常给出了一个单一的值,这种方法对绝大多数状态的

星像适应性都很好。本文从星像定心精度上对 HFD 法进行改进,提出的 HFD-ICA 法在指导望远镜调焦时精度更高。

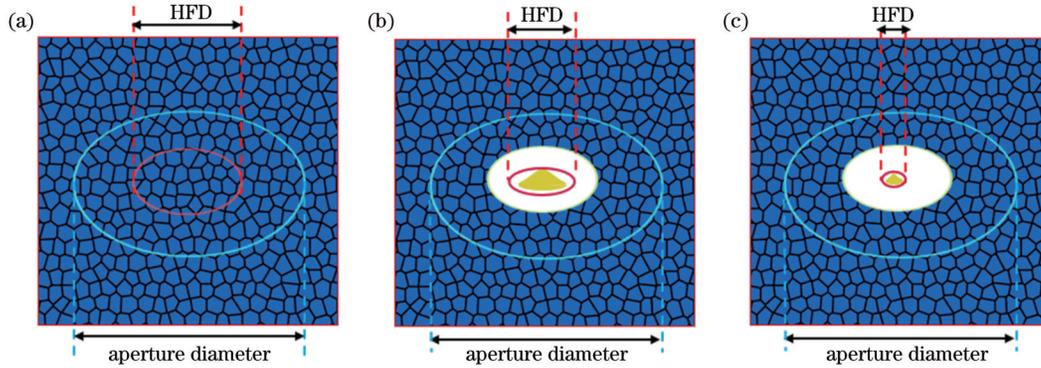


图 2 不同类型图像的 HFD。(a) 噪声图像;(b) 暗星图;(c) 正焦星像

Fig. 2 HFD of different type of images. (a) Noise image; (b) faint star; (c) star in focus

3.2 算法设计

整个算法的设计流程如图 3 所示,首先由安装在库德房的 CMOS 相机拍摄系列离焦-聚焦-离焦的目标图像,成像相机型号为 HAMAMATSU-C13440-20CU,像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m}$,标准像素格式为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,像素分辨率约为 $0.35''$ 。然后使用各向异性扩散方法给图像降噪。Qtsu 阈值法对降噪后的图像做二值化处理,从背景中提取出目标星。

在二值化的基础上对邻近目标的像素进行聚类处理,通过计算目标的边界可以得到目标感兴趣区域 (ROI)。根据确定的 ROI,利用改进的 IWC 算法迭代计算星像的质心,直到质心达到亚像素精度。质心一旦确定,便可以测定出星像的 FWHM 和 HFD 值,进一步对这些值进行处理,可以拟合出指导望远镜调焦的曲线,进而确定望远镜的正焦位置。

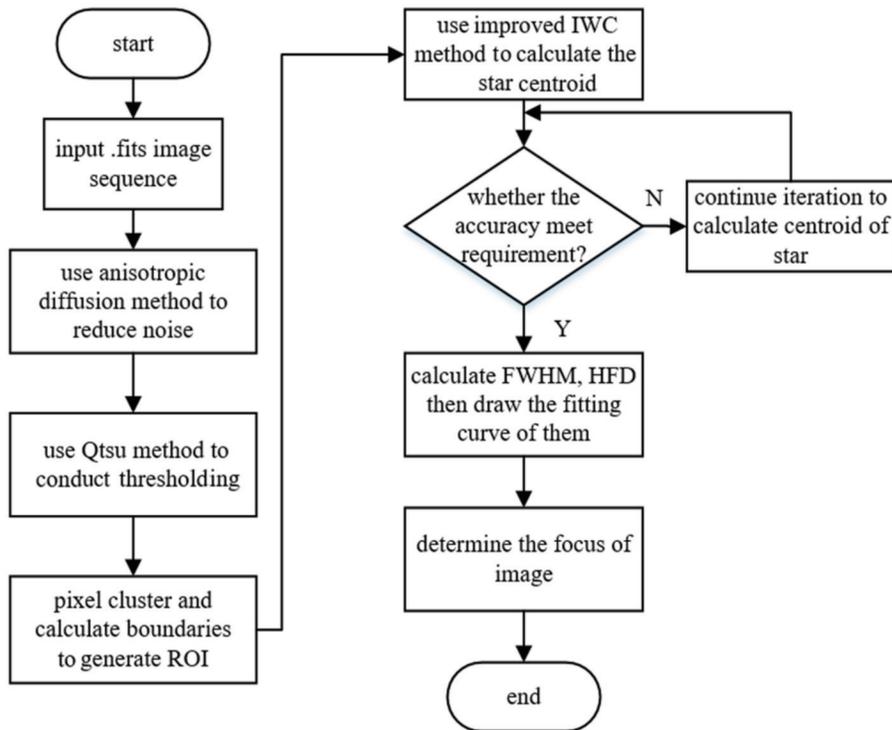


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

4 算法实现

4.1 图像预处理

天文观测的图像中各个像素代表着图像不同部分的值,要通过图像来确定星像的位置和亮度等信息就需要分析图像本身的不一致性。图像预处理的主要目的是消除图像间的差异性,极大地保留真实有用的信息,从而提高特征提取的可靠性。在图像采集时,应尽量选取那些在视场中均匀分布、孤立、信噪比较高、不饱和的星像。星像失真过大容易增加算法执行时的误差。

1) 图像去噪

望远镜拍摄到的含有目标星的图像,通常由于元器件自身以及长时间曝光等影响而携带大量的噪声^[12],在强噪声下目标星亮度很弱,加之目标背景的不均匀性,造成天文图像随方向有一些变化,如图 4(a)所示。Perona 等提出的基于偏微分方程的各向异性扩散法可以用来改善图像的均匀性,整体上实现图像的平滑滤波。各向异性扩散是一种非线性的、空间变异的变换,它根据图像中的像素分布有选择性地对各向异性扩展。因此,所得到的图像保持着线性结构,并保留了图像的边缘和细节,如图 4(b)所示^[13]。与相机拍摄的原图相比,各向异性滤波除了大部分噪声,使得背景更加平坦,目标的边缘和细节也更加突出,星像信噪比(SNR)得到显著提高,有利于后续的星像检测。

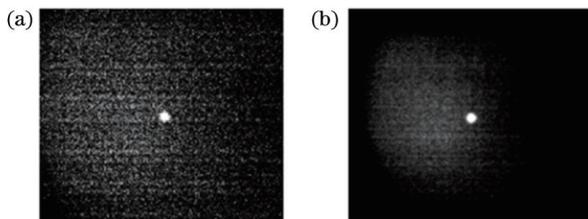


图 4 各向异性扩散法处理之前和之后的图像比较。(a)原始图像;(b)处理之后的图像

Fig. 4 Comparison of images before and after anisotropic diffusion method processing. (a) Original image; (b) image after processing

2) Qtsu 阈值分割

在对图像进行去噪之后,需要提取图像中的目标。将目标与背景分割的过程就是阈值化,即将灰度图像转化成二值图像。实现阈值分割的算法有很多,其中 Otsu^[14]于 1979 年提出的最大类间方差法,是引起较多关注的一种阈值选取方法。用 Otsu 算法对图像进行阈值处理,使前景中所有像素值的方差和背景中所有像素值的方差最小,方差是对扩散的度量。前景像素值的方差越小,像素的灰度级别就越接近,它们就越有可能属于一类像素。该方法的计算过程简单高效,不受目标星等和图像清晰度的影响。本文中的望远镜因视场比较小,在观测过程中通常只有一个目标,从性能

的角度考虑 Otsu 算法最适用。分析图 5 可知,算法对目标和背景实现了很好的分割。

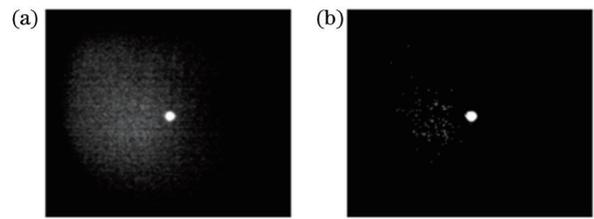


图 5 Qtsu 算法处理前后的图像比较。(a)原始图像;(b)处理之后的图像

Fig. 5 Comparison of images before and after Qtsu algorithm processing. (a) Original image; (b) image after processing

3) 星像聚类

阈值化的结果是一个二值图像,它意味着“1”像素属于星星,“0”像素属于背景。而星像聚类是对阈值化结果的进一步优化。本文的聚类算法是对 Arbabmir 等^[15]算法的一个改进。改进后的聚类算法比较简单,其步骤如下:(1)将二进制图像中的所有白色像素放到一个容器中;(2)从容器中拿出一个白色像素放到一边;(3)将该像素的所有相邻像素从容器中取出并放到一边;(4)直到该像素没有更多的相邻像素时,就对取出的所有相邻像素重复这个操作;(5)保存所有收集到的属于一起的像素,即组成一个相互连接的区域;(6)只要还有像素,继续重复步骤(2)。在星像聚类中,相邻的像素被分组在一起,聚类之后的结果形成了一个像素组列表,这些像素组合在一起构成每个星星的像素族,就确定了 ROI 域,如图 6 所示。

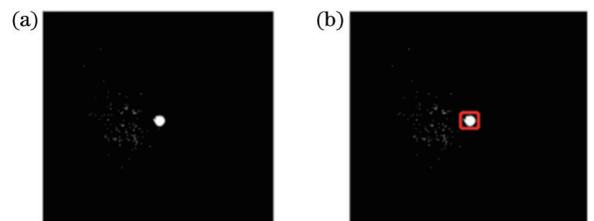


图 6 聚类算法处理前后的图像比较。(a)原始图像;(b)处理之后的图像

Fig. 6 Comparison of images before and after cluster algorithm processing. (a) Original image; (b) image after processing

4.2 计算星像质心

计算星像质心建立在图像预处理的基础上,其目的是精确测出星像的中心。Arbabmir 等^[15]使用归一化重心(CoG)法、迭代加权重心(IWCoG)法和 IWC 法来确定星像的质心,从性能优化的角度确定了 IWCoG 是适合的方法。然而, IWCoG 法计算量很大,且 Arbabmir 等利用模拟噪声和光斑偏移度来进行实验,真实情况下噪声大多分布不均匀,具体选用哪种方法取决于图像的属性。本文通过对 IWC 法的改进后发现其能更高效地处理只包含一个目标源的天文图

像,与其他两种算法相比有着更好的性能,IWC法的具体实现过程如下:

首先令 $I(x,y)$ 为对应的望远镜系统在其焦平面子孔径处的强度函数,IWC法的加权函数是光斑图案的强度分布 I_{ij} ,因此其估计的质心位置为

$$(x_c, y_c) = \left(\frac{\sum_{i,j} I_{ij}^2 X_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}^2}, \frac{\sum_{i,j} I_{ij}^2 Y_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}^2} \right), \quad (6)$$

式中: i, j 分别是 $M \times M$ 图像矩阵中的行、列索引, X_{ij}, Y_{ij} 分别表示第 i 行、第 j 列的横坐标和纵坐标

在 IWC 法中每个像素亮度值都有一个权重,亮度越大则权重越大。改进后算法完成了以下操作:1) 创建一个 3×3 像素矩阵,其中心像素是最亮的,然后把这个中心像素分成 4 个大小相同的子像素,每个子像素都要考虑其周围(上、下、左、右)的像素;2) 用简单的亚像素插值法^[16]分别针对这 4 个子像素值计算新的强度值,选择 4 个子像素中最亮的一个像素作为新的像素中心。接着从头开始进行算法迭代,初始迭代次数 $n=10$,迭代完成后判断误差百分比(CEE)是否达到要求。CEE 的计算公式如下:

$$V_{CEE} = \sqrt{(x_c - x_c^*)^2 + (y_c - y_c^*)^2} \times 100, \quad (7)$$

式中: (x_c^*, y_c^*) 是使用算法估计的质心位置,由于该算法是二次收敛的,所以最终计算结果就是亚像素精度的星像质心。

分别从不同 SNR 和不同光斑尺寸来验证改进的 IWC 算法的性能。图 7(a) 所示为光斑尺寸恒定时算法在不同信噪比下的性能对比,从图中可以看出:SNR 很小时三种算法的性能都比较弱;随着 SNR 的增大,CoG 算法的误差减小,但其误差仍然较大。改进的 IWC 算法表现出优于 IWC_{CoG} 的性能,在 SNR 为 9.5 时,误差降为 0。图 7(b) 是在平均 SNR 恒定时,算法在不同光斑尺寸下的性能比较。随着光斑尺寸的增大,三种算法的误差都逐渐降低,在 $W_{FWHM}=10$ 时,CoG 算法的误差降至 0.13。而改进的 IWC 算法性能依然优于 IWC_{CoG} 算法,最终在 $W_{FWHM}>5$ 后,二者的误差都恒为 0。分析可得 CoG 算法简单,适用于 SNR 和光斑足够大的情况。改进后的 IWC 算法实现了质心误差估计最小化,其性能已经优于 IWC_{CoG},且计算量适中,适合处理本文中低光照、强噪声下的单一目标星。

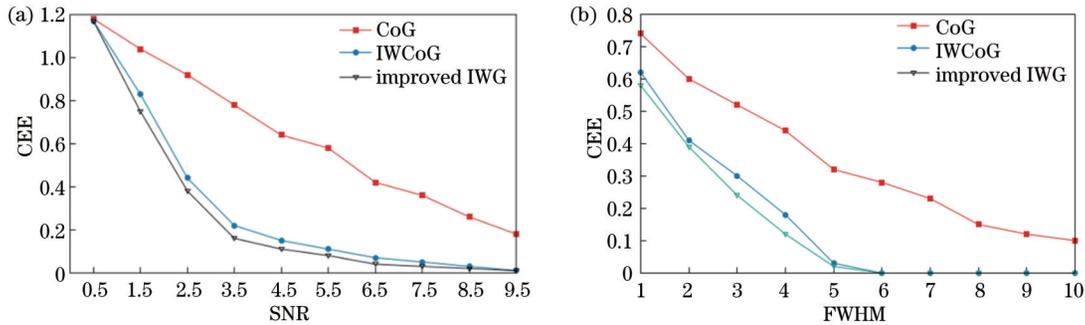


图 7 算法性能对比。(a) FWHM 恒定时算法在不同噪声下的性能对比;(b) SNR 恒定时算法在不同光斑尺寸下的性能对比
Fig. 7 Performance comparison of algorithms. (a) Performance comparison of algorithms under different noise when FWHM is constant; (b) performance comparison of algorithms under different spot sizes when SNR is constant

4.3 高斯曲线测定星像半峰全宽

只有精确计算星像质心才能正确测定星像的 FWHM 和 HFD。算法分析阶段,对 FWHM 的定义进行了解释,本节采用 GNU 科学库中的 GSL^[17]来进行曲线拟合并测定 FWHM,实现拟合的技术是 Levenberg-Marart 算法^[18],利用该方法测定相机拍摄的不同目标星(离焦-聚焦-离焦)的 FWHM,根据目标序列中最小的 FWHM 值来确定望远镜的最佳焦点位置。本节仅展示 NORAD 编号为 33320 的目标处理结果,共计 21 帧图像。图 8 是成像相机在不同焦面位置时对目标 33320 拍摄的部分原始图像序列,目标的特征不断发生变化且部分帧呈现环状,这些都有助于后续检验算法的鲁棒性。

对 33320 目标的图像序列测定 FWHM 时,原始数据点中会有一些异常点,如图 9 所示。

使用 KNN 算法^[19]可以剔除异常点,这样绘制的拟合曲线更加光滑,如图 10 所示,曲线整体呈高斯形状,横轴是光斑尺寸,纵轴是 PSF。PSF 是点光源经过光学系统后的辐射照度分布,可以有效地描述系统的成像能力^[20]。图 11 是根据测定的 FWHM 值拟合出的调焦曲线。望远镜处于离焦态时,点光源的像为光斑;离焦量越大,FWHM 越大;反之,星像的 FWHM 越小,图像清晰度越高。图 10 中的图像编号是对原始数据点进行拟合后按照 FWHM 从小到大排序(对应曲线从上往下),不是原始的图像编号。其中:编号为 1 的图像 FWHM 为 3.2 pixel,对应图 11 中原图像的第 11 帧,为正焦图像;编号为 21 的图像 FWHM 为 10.8 pixel,对应图 11 中原图像的第 21 帧,为离焦量最大的图像。理论情况下,目标星处于正焦位置时,其在 CCD 靶面成像的 FWHM 要达到 3.17 pixel,实际聚焦

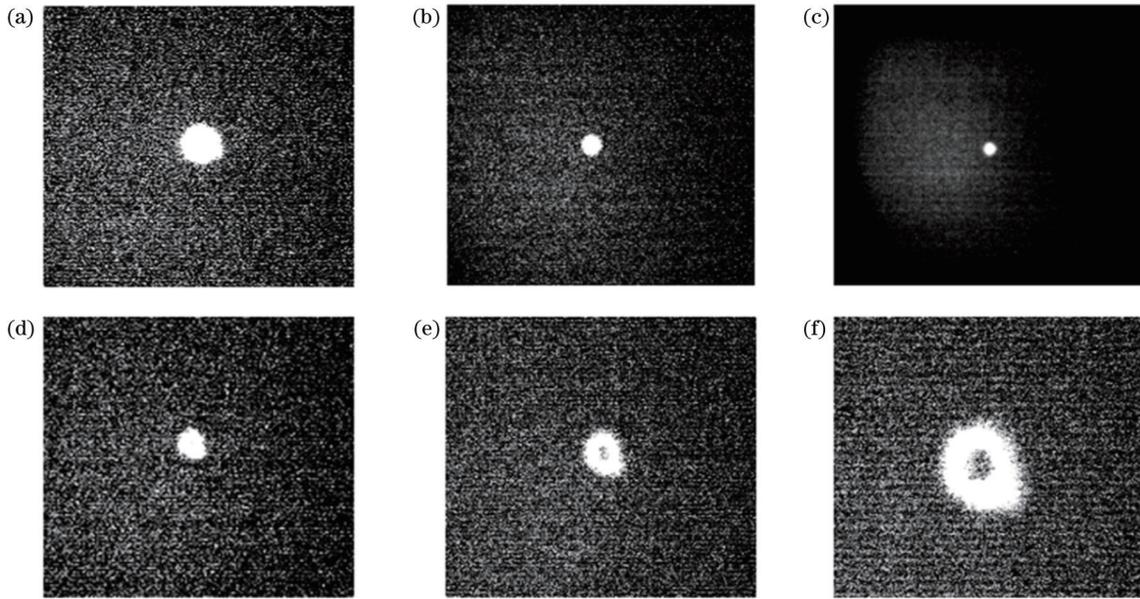


图 8 目标 33320 的部分图像序列
Fig. 8 Partial image sequences of object 33320

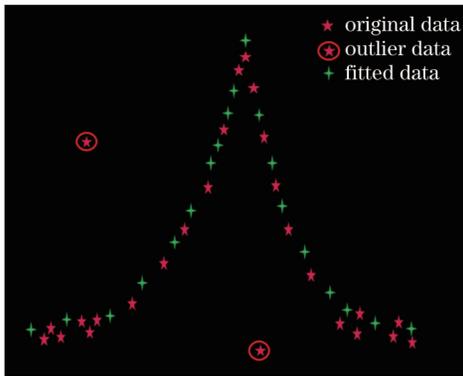


图 9 异常值监测
Fig. 9 Outlier detection

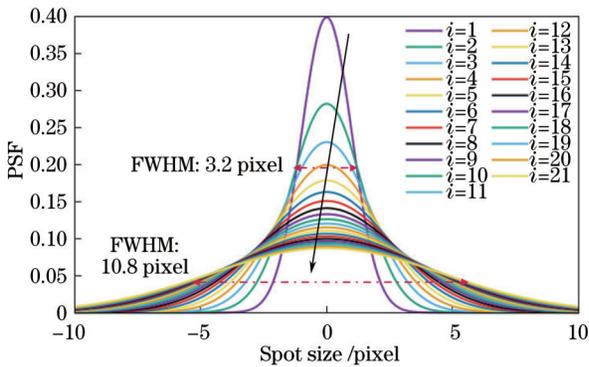


图 10 对编号 33320 的不同图像帧拟合的 FWHM 值(箭头指向 i 增大的方向)
Fig. 10 FWHM values obtained by fitting for different frames of image numbered 33320 (arrow points to direction of increase of i)

后星像的 FWHM 为 3.2 pixel, 与理论值相符。经过大量实验后发现, 尽管 FWHM 法大都能正确找到焦点,

但是严重失焦的星像经常具有环形或圆盘的形状, 与高斯形状不匹配。从图 11 可以看出, 离焦较大时测到的数据点大都严重偏离拟合出的调焦曲线, 在指导调焦时会带来一些误差。另外, 通过测定 FWHM 的方式指导调焦, 需要进行两次拟合, 非常耗时。通常, 为了保证调焦的实时可靠, 在实际调焦过程中一般不选择 FWHM 方法。

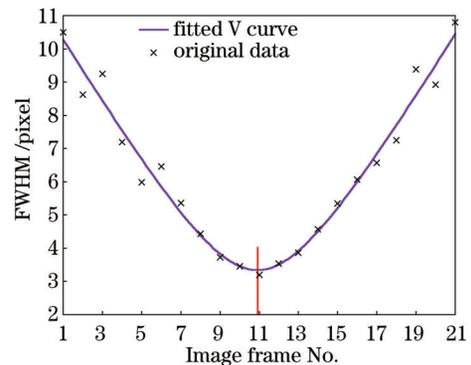


图 11 利用测定的 FWHM 拟合的调焦曲线
Fig. 11 Focusing curve fitted with measured FWHM

4.4 测定星像 HFD

HFD-ICA 法是本文提出的方法。对于完美的高斯星形图像, FWHM 值和 HFD 值在理论上都是 2.3548σ , 但测定 HFD 时不需要进行曲线拟合。HFD 对视觉、恒星通量、薄云或天空背景辉光的变化相对不敏感, 并且可以处理那些看起来像“甜甜圈”的失焦图像。此外, HFD 值随焦点位置呈线性变化, 这使得它在指导调焦方面性能更好。HFD-ICA 法测定星像 HFD 的步骤如下: 1) 从图像中减去平均背景; 2) 通过改进的 IWC 方法提取恒星的质心; 3) 从质心中确定每

个像素的半径;4)按半径增加的顺序对像素进行排序;5)沿直径维度生成像素通量积分;6)从这个积分中确定 HFD。在实现过程中,该策略根据成像器上最亮星的 HFD 值来确定最佳聚焦。这种单星策略很有价值,可以将观测的目标星集中在成像芯片上,减小离轴光学像差(如场曲和彗差)的影响。一般情况下,需多次测量 HFD 值并对结果求平均以增加信噪比,这样能确定相对准确的焦点位置。

根据这个方法,同样对采集到的目标星进行处理,这里也展示 NORAD 编号为 33320 目标的 HFD 值,如图 12 所示。从图 12 中可以看到:这一组数据点整体呈现 V 型,V 曲线是望远镜从焦点外位置移动到焦点,然后进一步向同一方向失焦而形成的,前面的 FWHM 调焦曲线也是如此。

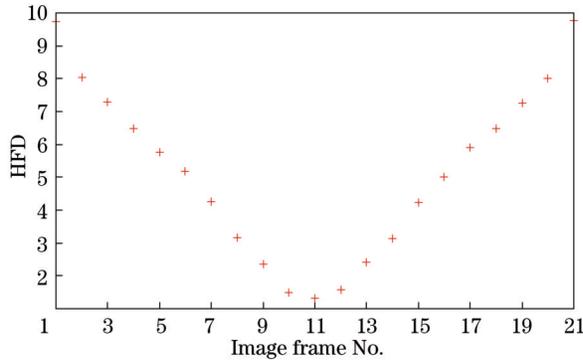


图 12 编号 33320 目标中不同图像帧的 HFD

Fig. 12 HFD of different image frames in target numbered 33320

如果想要从这个 V 曲线(或一组 V 曲线)中确定理想的焦点位置,需要从各个数据点中提取更抽象的标准,例如斜率或局部最小值。通常可以使用尽可能逼近数据点的函数来实现这一点,然后从结果函数中获取相应的曲线参数作为这样的标准。经过分析发现,使用双曲线来拟合上述 V 曲线可以避免算法确定哪些靠近最佳焦点位置的数据点应该保留,哪些应该剔除,具体实现过程如下。首先考虑双曲线函数式^[21-22]:

$$\frac{(y-h)^2}{d^2} - \frac{(x-g)^2}{c^2} = 1, \quad (8)$$

这个函数的中心点不在(0,0)位置,而是在(g,h)的位置,将其改写为

$$Y(x, c, d, g, h) = \pm d \sqrt{1 + \frac{(x-g)^2}{c^2}} + h, \quad (9)$$

式中;x是变量;c、d、g和h是影响曲线位置和形状的参数。式(9)描述了两条双曲线,在这里取正方向上的曲线。计算正方向上双曲线的极限值很容易得到左、右两切线:

$$\begin{cases} \text{left: } \lim_{x \rightarrow -\infty} Y(x, c, d, g, h) = -\frac{d}{c}(x-g) + h \\ \text{right: } \lim_{x \rightarrow +\infty} Y(x, c, d, g, h) = \frac{d}{c}(x-g) + h \end{cases}. \quad (10)$$

根据图 12 中的数据点,利用 Levenberg-Marguardt 算法^[18]来计算 c、d、g、h 等 4 个参数,使生成的曲线尽可能接近数据点。该算法需要对 Y(x, c, d, g, h) 中的每个参数求偏导:

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial c} = -d \frac{(x-g)^2}{c^3 \sqrt{1 + \frac{(x-g)^2}{c^2}}} = -\frac{d(x-g)^2}{c^3 \Phi(x)} \\ \frac{\partial Y}{\partial d} = \sqrt{1 + \frac{(x-g)^2}{c^2}} = \Phi(x) \\ \frac{\partial Y}{\partial g} = -\frac{d}{c^2} \frac{x-g}{\sqrt{1 + \frac{(x-g)^2}{c^2}}} = -\frac{d(x-g)}{c^2 \Phi(x)} \\ \frac{\partial Y}{\partial h} = 1 \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $\Phi(x) = \sqrt{\frac{(x-g)^2}{c^2} + 1}$ 。不同的偏导数构成雅可比矩阵 J:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial Y}{\partial c} & \frac{\partial Y}{\partial d} & \frac{\partial Y}{\partial g} & \frac{\partial Y}{\partial h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{d(x-g)^2}{c^3 \Phi(x)} & \Phi(x) & -\frac{d(x-g)}{c^2 \Phi(x)} & 1 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

另外, Levenberg-Marguardt 算法需要 Y(x, c, d, g, h) 对 x 求一阶和二阶导数:

$$\begin{cases} Y'(x, c, d, g, h) = \frac{d(x-g)}{c^2 \sqrt{\frac{(x-g)^2}{c^2} + 1}} = \frac{d(x-g)}{c^2 \Phi(x)} \\ Y''(x, c, d, g, h) = \frac{d}{c^2 \left[\frac{(x-g)^2}{c^2} + 1 \right]^{\frac{3}{2}}} = \frac{d}{c^2 \Phi^3(x)} \end{cases}. \quad (13)$$

根据以上公式对图 12 中的数据点进行计算后,求得 c=0.88, d=0.78, g=11, h=0.46。绘制出拟合后的曲线如图 13 所示,可以看到该双曲线与原始数据点拟合得很好,左右切线为曲线的两个极限值。参数 c 和 d 的值决定着双曲线的张角, h 值决定曲线在 x 轴上方的位置,参数 g 表示理论上最优的焦点位置,即第 11 帧是正焦图像,与 FWHM 法的结果一致。从 V 形曲线可以看到,在正焦位置附近星像的 HFD 和焦点位置之间的斜率逐渐减小,在正焦位置时该斜率为零。因而,在焦点附近,调焦系统的调整几乎不会引起星像 HFD 的变化。

V 曲线的形状代表了由焦点、望远镜和相机组成

的光学系统的特性,一旦系统存在这样的 V 曲线,算法重用后能在调焦过程中节省大量时间。实验中发现左右两切线的斜率随温度和时间变化非常恒定,这是因为该斜率仅取决于硬件特性,例如光学器件的 F 数、CCD 像素大小和聚焦器齿轮比等。

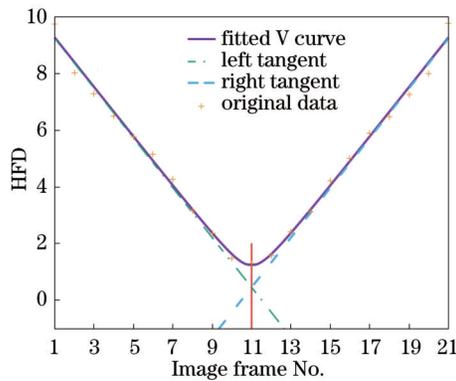


图 13 拟合后的 V 形调焦曲线

Fig. 13 V-shaped focusing curves after fitting

从严格意义上讲,V 形曲线模型仅在曲线为线性、近焦点的区域有效。在实际调焦系统中,调焦的起始位置应在 HFD 与焦点的关系可被视为抛物线的范围内,如果超出其范围可能需要人工操作。经过一段时间的实验后,调焦系统基本已经测定出了限定的调焦范围。在限定范围内,系统根据实时接收的目标星清晰度反馈信息,朝着一定的方向进行自动调焦操作,一旦越过 V 形曲线的另一侧(即一旦 HFD 值在下降一段时间后再次开始增加),自动调焦系统将执行曲线拟合以找到一个预测最小可能 HFD 位置的解决方案,极大地避免了一般望远镜调焦过程中调焦过度的情况。只有当目标星非常散焦,以至于大部分通量淹没在噪声中根本无法分辨时才会出现调焦过度的情况,但这样的情况相对很少。

另外,V 形曲线受视觉、衍射和光学系统缺陷等影响较大时,其指导调焦的性能会被减弱。通常这些影响因素大致分为两类:一是系统误差,包含温度因素、镜筒弯层和望远镜指向等;二是随机误差,包括望远镜装调、加工时的初始像差等。在本文的调焦系统中,系统误差主要来自温度因素,但实际调焦过程中有一个温度补偿模型对其进行修正,因此并不影响 HFD-ICA 算法的有效性。对于望远镜而言,即便在装调、加工过程中进行数次校验后满足设计标准,但是装调、加工像差不可能永远消除。HFD-ICA 算法对 HFD 的度量是稳健的,大多数满足光学设计标准的望远镜,其装调、加工的初始像差都在可控范围内,因而 HFD-ICA 算法性能不会受到影响。除非极端条件下,装调、加工像差非常大,随着越来越多的散焦星体轮廓沉入噪声中,测得的 HFD 值偏大,进而影响近焦点处 HFD 测量以及 V 形曲线模型参数的估计,此时本文算法就会失效。

本文的光学系统中,望远镜的主副镜不是配对加工的。同时,作为成像镜的透镜会带来较小的球差,多块面型精度为 $\lambda/4$ 的折轴平面反射镜亦带来一定的像散。尽管如此,HFD-ICA 算法仍然能保持较好的性能。大量实测数据表明,这些因素引起的星像质量变化远小于系统离焦量对星像像质的影响。当然,无论影响焦点的误差来源于哪,算法最终判断最佳焦点的依据都是实际的星像质量,HFD-ICA 算法尽可能克服外界干扰以指导望远镜调焦。

5 性能评估

HFD-ICA 算法是依据 1.2 m 望远镜系统主要进行天体测量的实际科学目标提出的切实可行的方案。为了验证所提算法的有效性,对相机实测到的 50 组不同目标序列(每组序列包含从离焦-聚焦-离焦的 21 帧图像)进行测试。文中所有算法均是在 Ubuntu 20.04.3 LTS 系统上实现的,编程语言为 C++。分别从精确定焦率、实时性两方面将本文提出的 HFD-ICA 法与高斯曲线测定的 FWHM 法、未改进定心精度的 HFD 法以及天文软包 IRAF 的计算性能进行比较分析。

5.1 精确定焦率比较

精确定焦率用来衡量清晰度评价算法的精度,其值越大,说明算法指导调焦的准确性越高。表 1 展现了 4 种算法对 50 组原始目标序列的精确定焦率对比,分析表 1 可知:FWHM 算法仅能对 45 组目标正确测定焦点,定焦率为 90%;未改进定心精度的 HFD 法能对 47 组目标正确测定焦点,定焦率为 94%;HFD-ICA 算法和 IRAF 软件包未能对其中一组极端条件下星像被完全淹没的目标序列正确定焦,二者定焦率均为 98%,HFD-ICA 算法的定焦率与 IRAF 软件包处理结果相当,且比未改进定心精度的 HFD 法提高了 4 个百分点。

表 1 精确定焦率对比

Table 1 Comparison of precise focusing ratios

Method	FWHM	HFD	HFD-ICA	IRAF
Focusing ratio / %	90	94	98	98

为了验证外界噪声干扰对算法精确定焦率的影响,对 50 组目标序列依次加入噪声百分比为 1%、2%、3%、4%、5%、10% 的高斯白噪声,进一步测定算法的精确定焦率,其结果如表 2 所示。

分析表 2 可知,几乎所有算法在加入少量噪声后,精确定焦率都会受到一定程度的影响,造成这种现象的原因是:加入噪声后,星像点周围的灰度值发生了改变,给算法的处理带来了干扰。因此,在进行图像特征提取之前,应该先进行去噪处理。这几种算法中对噪声最敏感的是 FWHM 法,在加入噪声比为 10% 的高

表 2 有噪声扰动时的精确定焦率对比
Table 2 Comparison of precise focusing ratio with noise disturbance unit: %

Noise percentage / %	0	1	2	3	4	5	10
FWHM	90	90	88	88	86	86	84
HFD	94	94	92	92	90	90	88
HFD-ICA	98	98	98	98	98	98	96
IRAF	98	98	98	98	96	94	94

斯白噪声后,FWHM法的精确定焦率降至84%,其次是HFD法,降至88%。而IRAF软件包处理效果和本文的HFD-ICA法之间变化相对较小,但本文算法的抗噪性能明显更好。

5.2 计算时长比较

算法的实时性是评估算法性能的重要指标,尤其是在实时性要求较高的系统中,算法计算时间过长会影响自动调焦系统的整体调焦时间。利用4种算法分别对50组不同目标序列进行处理,比较算法的实时性。由于计算机有随机的各种外部和内部的中断请求,即使是相同内容的计算,每次运行所需要的时间也不尽相同。因此,在具体实验中,将算法对每组目标进行10次处理后的平均运算时间作为算法处理该组目标的耗时。最后,待算法处理完50组目标后,将每个算法的平均处理时长作为算法运行速度的评价参量。表3是4种算法对50组目标处理后的耗时对比,其中Min time表示算法所用的最小时长,Max time表示算法所用的最大时长,Mean time表示算法的平均时长。

表 3 4种算法的计算时长比较

Table 3 Comparison of computing time of four algorithms unit: s

Parameter	Min time	Max time	Mean time
FWHM	22.4	38.9	32.4
HFD	11.6	16.7	14.3
HFD-ICA	3.6	5.8	4.7
IRAF	32.4	48.6	45.7

由表3可知,与其他3种算法相比较,本文的HFD-ICA算法的计算时间较短,实时性最好,相比于HFD法实时性提升了3倍左右。FWHM法因其在测量时需要进行曲线拟合,耗费时间较多,平均处理时长达到了32.4 s,是HFD-ICA耗时的约6.89倍。而精确定焦率相对较高的IRAF软件包,其平均处理时长为45.7 s,是HFD-ICA法的近10倍。如果将IRAF软件用于本文的调焦,极不利于目标的观测,因为有些空间目标过境时间很短,仅有1~2 min。如果调焦的实时性达不到,会错过对该目标的科学观测。

综上所述,本文提出的HFD-ICA法调焦精度高,抗噪性能好,满足系统实时性要求,具有明显的优势。

6 结 论

主要对望远镜自动调焦的图像清晰度评价算法进行了研究。通过系列实验验证了HFD-ICA法在指导1.2 m望远镜系统自动调焦时,算法稳定高效,鲁棒性好,能处理那些严重失焦的图像帧。该算法比未改进定心精度的HFD法在性能上有所提升,其精确定焦率与高精度天文图像处理软件IRAF相当,均达到了98%。算法在指导调焦过程中的平均处理时长仅为4.7 s,耗时为IRAF的1/10,满足调焦系统的实时性要求。相比系统原来的手动调焦,本研究使系统的平均调焦效率大致提高37%,在一定程度上为未来台站全自动化观测提供了基础,同时也为其他望远镜系统的自动调焦提供了参考。下一步将探讨更为复杂的离焦情况,并结合具体的硬件信息、外界干扰规律等,进一步优化调焦精度。

参 考 文 献

- 黄国兴, 刘艺鹏, 彭宏, 等. 洛伦兹拟合点扩展函数的遥感图像复原方法[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1628003.
Huang G X, Liu Y P, Peng H, et al. Remote sensing image restoration method based on Lorentz fitting point spread function [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1628003.
- 李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104004.
Li Y Q, Fu H L, Li R W, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan observatories[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104004.
- 李晓燕, 朱庆生. 一种基于图像清晰度评价的天文望远镜自动调焦系统[J]. 天文研究与技术, 2008, 5(3): 294-298.
Li X Y, Zhu Q S. An automatic focusing system of astronomical telescope based on image definition evaluation[J]. Astronomical Research & Technology, 2008, 5(3): 294-298.
- 黄垒, 辛立平, 韩旭辉, 等. 广角天文望远镜的自动调焦[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 174-183.
Huang L, Xin L P, Han X H, et al. Auto-focusing of wide-angle astronomical telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 174-183.
- 苑嘉辉, 蔡洪波, 刘奇, 等. 广角望远镜实时自动调焦的清晰度评价方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1368-1377.
Yuan J H, Cai H B, Liu Q, et al. Definition evaluation method for real-time auto-focusing of wide-angle telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(5): 1368-1377.
- Weber L, Brady S. Fast auto-focus method and software for CCD-based telescopes[EB/OL]. [2022-04-13]. <https://www.ccdware.com/Files/ITS%20Paper.pdf>.
- 门涛, 谌钊, 徐蓉, 等. 空间目标激光测距技术发展现状及趋势[J]. 激光与红外, 2018, 48(12): 1451-1457.
Men T, Chen Z, Xu R, et al. Development status and tendency of space target laser ranging technique[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(12): 1451-1457.
- 谭伟, 齐文雯, 何红艳, 等. 一种推扫型敏捷遥感卫星上自动调焦技术[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0528002.
Tan W, Qi W W, He H Y, et al. An on-board autofocusing method for scanning agile remote sensing satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0528002.
- Tang P Y, Liu J J, Zhang G Y, et al. Automatic focusing system of BSST in Antarctic[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9678: 967816.
- 康浩然, 左营喜, 姜铮, 等. 南极5 m太赫兹望远镜指向与调焦

- 校准精度分析[J]. 天文学报, 2018, 59(2): 51-61.
- Kang H R, Zuo Y X, Lou Z, et al. Accuracy analysis of the pointing and focusing calibration of the 5 m terahertz telescope for dome A in Antarctica[J]. Acta Astronomica Sinica, 2018, 59(2): 51-61.
- [11] Miyashita K. Half flux diameter-applicate to determination for faint star event[EB/OL]. (2007-10-01) [2022-04-13]. https://astro-limovie.info/occultation_observation/halffluxdiameter/halffluxdiameter_en.html.
- [12] 曾海飞, 韩昌佩, 李凯, 等. 改进的梯度阈值图像清晰度评价算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(22): 2211001.
- Zeng H F, Han C P, Li K, et al. Improved gradient threshold image sharpness evaluation algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(22): 2211001.
- [13] Xie M H, Wang Z M. Anisotropic nonlinear diffusion approach to single image resolution enhancement[J]. Optoelectronics Letters, 2005, 1(2): 144-147.
- [14] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [15] Arbabmir M V, Mohammadi S M, Salahshour S, et al. Improving night sky star image processing algorithm for star sensors[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(4): 794-801.
- [16] Lee S, Cho K. Design of sub-pixel interpolation circuit for real-time multi-decoder supporting 4K-UHD video images[J]. Journal of IKEEE, 2015, 19(1): 1-9.
- [17] Mark G, James T, Brian G, et al. GSLCPP: a header-only, Modern C++-library wrapping the GNU scientific library[EB/OL]. (2007-07-02) [2022-04-17]. <https://www.gnu.org/software/gsl/doc/html/index.html>.
- [18] Umar A O, Sulaiman I M, Mamat M, et al. On damping parameters of Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least square problems[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1734(1): 012018.
- [19] Vaishnav M P, Devi K S, Srinivasan P, et al. Detection and classification of groundnut leaf diseases using KNN classifier [C]//2019 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking, March 29-30, 2019, Pondicherry, India. New York: IEEE Press, 2019.
- [20] 谢向生, 刘忆琨, 梁浩文, 等. 散斑相关成像: 从点扩展函数到光场全要素[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111004.
- Xie X S, Liu Y K, Liang H W, et al. Speckle correlation imaging: from point spread functions to light field plenoptics[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111004.
- [21] Weisstein E W. Hyperbola-from MathWorld: a wolfram web resource[EB/OL]. [2022-04-13]. <https://mathworld.wolfram.com/Hyperbola.html>.
- [22] Courant R, Robbins H. What is mathematics? An elementary approach to ideas and methods[M]. 2nd ed. London: Oxford University Press, 1996: 75-76.

Sharpness Evaluation Algorithm Based on Real-Time Automatic Focusing of 1.2 m Telescope System

Yang Mengxue^{1,2}, Li Zhulian^{1,3}, Li Rongwang^{1,3}, Li Yuqiang^{1,3*}

¹Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, Yunnan, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Key Laboratory of Space Object & Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210034, Jiangsu, China

Abstract

Objective As a precise optical instrument, a telescope is subject to changes in its focus position due to atmospheric disturbances, temperature changes, and installation errors. If real-time focusing is not performed, the image may be distorted, which would seriously affect the tracking and measurement effects of the telescope. With the improvement of the intelligence level, automatic focusing technology is applied to the focusing of the telescope system. The algorithm to evaluate the image sharpness is the key to the decision of the focus position of the telescope's automatic focusing technology, whose performance directly determines the accuracy of automatic focusing. The traditional algorithm for evaluating the focusing of a telescope is implemented on the basis of statistical analysis, which can hardly ensure the real-time performance and noise immunity of astronomical images. Most of the existing algorithms have relatively poor performance, and it is difficult for them to extract target features from the captured images of high-speed moving targets. Moreover, it is often impossible to evaluate the engineering level of algorithms and hardware due to insufficient hardware experiments on the system. To solve the above problems, this study proposes a half-flux diameter real-time auto-focusing sharpness evaluation algorithm with improved centering accuracy (HFD-ICA). The algorithm has a low cost, high real-time performance, and good stability and is suitable for the focusing of most telescope systems. It is expected that this method can improve the autofocusing performance of telescopes and provide references for research in related fields.

Methods First, the acquired raw image sequence (defocus-focus-defocus) is denoised by the anisotropic diffusion method. Then, the denoised image is binarized by the Qtsu threshold method, and the target star is extracted from the background. Upon binarization, the pixels adjacent to the target are clustered, and the boundary of the target is calculated

to obtain the target region of interest (ROI). According to the determined ROI domain, the improved intensity-weighted centroid (improved IWC) method is used to iteratively calculate the centroid of the star image until the centroid reaches the accuracy level of sub-pixels. After the centroid is determined, the half-flux diameter (HFD) value of the star image is measured by the HFD-ICA method, and the hyperbolic fitting method is used to further process these values. The V-shaped curve that guides the focusing of the telescope can be drawn, and the focus position of the telescope can be determined.

Results and Discussions The HFD value measured by the proposed algorithm is V-shaped with the focus position, and the V-shaped curve represents the characteristics of the optical system consisting of the focus, telescope, and camera (Fig. 13). The focusing accuracy of the HFD-ICA algorithm is high, and its fixed focus rate is equivalent to that of the high-precision astronomical image processing software IRAF, both reaching 98% (Table 1). The anti-noise performance test of the algorithm shows that after the addition of a small amount of noise, the gray value around the star point changes, which interferes with the processing performance of the algorithm, and the precise fixed focusing rate of the algorithm is affected to a certain extent. In comparison, the anti-noise performance of HFD-ICA is the best (Table 2). Furthermore, compared with other algorithms in terms of operation time, the HFD-ICA algorithm has a faster calculation time and the best real-time performance. Compared with the results of the HFD method, the real-time performance is improved by about four times. The full width at half maximum (FWHM) method takes a lot of time because it requires curve fitting during measurement. The average processing time reaches 32.4 s, which is about 6.89 times that of HFD-ICA. The software IRAF with relatively high processing accuracy has an average processing time as high as 45.7 s, which is nearly 10 times longer than that of the HFD-ICA method (Table 3).

Conclusions This paper mainly studies the algorithm for evaluating the image sharpness under the automatic focusing of telescopes. The experiments verify that the HFD-ICA method is stable, efficient, and robust and can handle the image frames seriously out of focus when it is used to guide the automatic focusing of the 1.2 m telescope system. Compared with the HFD method without improved centering accuracy, the algorithm has improved performance, and its precise fixed focusing rate is comparable to that of the high-precision astronomical image processing software IRAF, both reaching 98%. The average processing time of the algorithm in the process of guiding focusing is only 4.7 s, 1/10 of that of IRAF, which meets the real-time requirements of the focusing system. Compared with the case of the system's original manual focusing, this study improves the system's average focusing efficiency by roughly 37%. To a certain extent, the research lays the foundation for the fully automated observation of future stations and also provides a reference for the automatic focusing of other telescope systems.

Key words measurement; autofocus; telescope; image sharpness; evaluation algorithm