

基于面源信息的 F/39 光路自动调焦技术研究

Research of F/39 Optical System Automatic Focusing Technology Based on Surface Target

王二超/WANG Er- chao^{1,2}, 郜广军/GAO Guang- jun¹, 耿立红/GENG Li- hong¹, 姜爱民/JIANG Ai- min¹

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

2. 中国科学院研究生院, 北京 100012

1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

[摘要] 自动调焦技术在现代天文望远镜中发挥着重要作用。对于大型的空间望远镜, 由于发射和在轨工作环境复杂, 且常要求在多波段下工作, 从而使得在轨自动调焦成为必不可少的一项关键技术。根据空间太阳望远镜^[1](Solar Space Telescope, SST) F/39 主光路在轨工作的调焦需求, 在地面调焦实验系统中, 以分辨率板为目标源进行了图像边缘法、图像标准差和图像熵等多种调焦判据的实验研究。结果表明, 在所选取判据中, 基于 Sobel 与 Prewitt 算子的图像边缘法只需加减运算, 易于硬件实现且半峰值宽度小, 波形陡峭, 重复检焦精度达到 0.06 mm, 在选取调焦判据中性能最优。

[关键词] 自动调焦; 图像处理; 空间太阳望远镜

[中图分类号] P111.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)08-0025-03

Abstract: Automatic focusing (AF) technology plays an important role in modern astronomical telescopes. Because of the complicated launch and on-orbital working condition, and working with multiband, AF technology is a key technology for large space telescopes. Based on the focusing requirement of F/39 subsystem of Solar Space Telescope (SST), a ground focusing experiment system is set up. With a resolving board as target, we examine focusing criterions based on image edge detection, image variance and entropy. The experiment result shows that the criterion based on Sobel arithmetic operator has narrow peak width and repeat AF accuracy of 0.06 mm. In addition, this criterion is easy to be implemented on hardware because it needs only add & subtract operations.

Key Words: automatic focusing; image processing; solar space telescope

CLC Number: P111.2

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)08-0025-03

大型空间望远镜在发射升空过程中要经历剧烈的震动和温度、气压变化, 在轨道运行时各部分受到的太阳辐射以及不同时间吸收的热量不同, 这些因素会引起镜面曲率半径、面形及器件位置间隔等光学参数的变化, 从而导致离焦。经验性的分析模拟不能完全确定这些实际变化因素对焦面的影响^[2], 为了确保实现望远镜的高分辨率, 必须对系统进行实时的闭环自动调焦。同时, 许多望远镜还有多个工作波段的要求, 本身需要通过调焦机构寻找不同的焦面。这些使得在轨自动调焦技术的引入成为必然。

与一般空间望远镜不同, 空间太阳望远镜的观测对象是非相干太阳面源, 其调焦模式是基于面源信息的。所谓基于面源信息的自动调焦, 就是通过驱动调焦运动部件, 利用检焦技术在像面获得目标源的图像信息, 根据调焦判据值的大小找到最佳的成像位置。可见调焦判据对于调焦技术的实现至关重要。为进一步模拟 SST 调焦判据的效果, 在依据 SST 主光学望远镜的调焦原理建

立的 F/39 光路自动调焦实验系统中, 分析测试了边缘提取、图像标准差和图像熵等几种调焦判据, 为 SST 在轨自动调焦提供了必要的实验参考。

1 调焦判据原理分析

理想的调焦判据必须满足以下几点^[3]: 无偏性: 三像面与理想焦面重合时, 参数取极值; 有效性: 只有齐焦时, 参数才取极值; 一致性: 能反映离焦极性, 保证正确调焦方向。

常用的空域调焦判据可分为 5 种^[4], 分别为图像边缘法、波峰波谷法、对比度法、相关法与直方图法。本次实验中主要选取了图像边缘法中的 Sobel、Prewitt 和 4 点边缘 3 种算子、对比度法中的图像标准差比较法和直方图法中的图像熵方法, 下面对这几种判据算法进行介绍。

收稿日期: 2006-05-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJCX2-SW-T04)

作者简介: 王二超, 男, 北京市朝阳区大屯路甲 20 号中国科学院国家天文台, 硕士研究生, 主要研究方向为自动调焦;

E-mail: eao@sst.bao.ac.cn

郜广军(通讯作者), 男, 中国科学院国家天文台, 博士后, 主要研究方向为图像处理; E-mail: gaogj@sst.bao.ac.cn

1.1 边缘信息检测^[9]

图像中的高频信息对应的是图像的细节,即图像的边缘信息。离焦图像必然细节丢失,边缘模糊。

$$R = \sum_{j=1}^N \sum_{i=2}^M |g(x_i, y_j) - g(x_{i-1}, y_j)| + \sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^M |g(x_i, y_j) - g(x_i, y_{j-1})| \quad (1)$$

公式(1)实际是对亮度梯度的计算, R 值越大则图像细节越多、越清晰。

常用到的边缘算子有 Sobel 边缘算子和 Prewitt 算子。Sobel 边缘算子表示为:

$$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Prewitt 边缘算子表示为:

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

本实验中还选取了 4 点边缘算子进行对比实验:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

在实际图像处理过程中,将获得的不同像面上的图像矩阵与上述边缘算子作卷积,求得图像的边缘特征,并将返回的边缘特征值累加求和,对应结果最大的就是离焦量最小的图像,该图像对应的边缘信息最丰富。此类算法只用到了加减运算,而 Sobel 算子中的系数 2 也可以通过加法完成,计算简单,易于硬件实现,运算速度快。

1.2 图像标准差比较法

标准差比较法实质上是利用了图像合焦状态下对比度最好的特性,而当图像离焦时,图像变得模糊,则图像各像元间的能量差相对减少,图像标准差^[4]为:

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(x_i, y_j) - \bar{g}]^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

$\bar{g}$ 是单个图像所有像元接收能量的平均值, $g(x_i, y_j)$ 是像面上第 (x_i, y_j) 像元接收到的能量。使 δ 值为最大的点即对应系统的齐焦位置。算法中用到了乘方运算,速度稍慢。

1.3 图像熵的方法

借用信息论中熵的概念,在焦图像的灰度多样性要多于离焦图像的多样性,而它们的熵是不一样的。定义熵为:

$$F_{\text{entropy}} = - \sum P_k \log_2 P_k \quad (3)$$

P_k 为某一灰度级上出现的像元数的相对频率。

从统计的观点来说,成像时离焦量越大,成像部分就越处于无序状态,图像的熵值就会越来越大,所以可以用最小图像熵作为合焦判断^[6]。算法中除了加减以及乘除法外,还有对数运算,运算量较大。

2 F/39 光路自动调焦实验系统

光学系统仿真分析表明,在正确调焦的前提下,成像镜的位置偏离对系统成像质量不敏感^[9],所以 SST 主光学望远镜 F/39 主光路采用调整成像镜位置来完成主光路的调焦。具体过程为:光学系统成像在位于预定位置的星载 CCD 上,星上数据处理单元对接收到的图像进行计算比较后发出控制指令,通过闭环的自动调焦系统移动成像镜,使系统所成的目标像(焦平面)正好落在 CCD 的成像接收平面上。

整个实验系统以 F/39 主光路为基础,实验系统的组成和布局如图 1 所示。系统主要由光源、滤光片、物面、2 套成像镜、2 块平面镜、电控导轨和 CCD 相机组成。为消除地面震动的影响,上述器件安装在气浮平台上。处理计算机单独放置在平台旁边,负责控制计算。

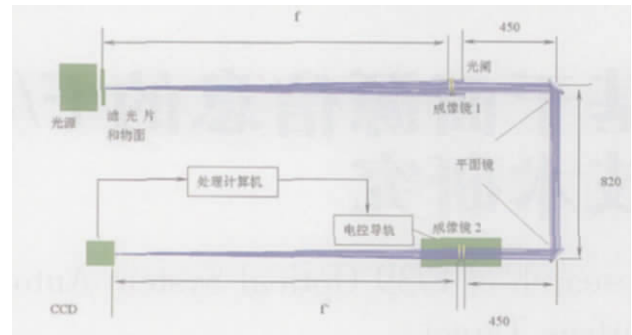


图 1 地面自动调焦实验系统组成示意图

Fig. 1 Schematic drawing of ground automatic focus experimental system

实验平台中,物面位于成像镜 1 的物方焦平面上,在光源照射下经过成像镜 1 产生平行光束。平行光束经 2 块平面镜折转方向后进入成像镜 2,并汇聚到 CCD 传感器上(CCD 位于成像镜 2 的像方焦平面上)。光阑位于成像镜 2 的物方焦平面上,从而使得整个系统成为像方远心光路,与实际的 SST 主望远镜 F/39 主光路相符。实验中计算机控制电控导轨按设定步距带动成像镜 2 运动,同时采集图像计算,并记录判据值与位置信息,进而对各种判据进行分析对比。

为了研究系统在不同波段下的调焦情况,选用中心波长为 $\lambda_1=441.6 \text{ nm}$, $\lambda_2=632.8 \text{ nm}$ 的 2 个干涉滤光片,这 2 个波长均在主望远镜的工作范围内。成像镜采用 SST 主光学系统的备份件,CCD 相机采用 DALSA 的 1M30 相机,12 bit 动态范围,分辨率 1024×1024 。这些使得实验结果可以更确切地模拟 SST 实际工作时的调焦情况。

系统中处理计算机控制软件的工作过程见图 2。计算机通过 PCI 采集卡采集 CCD 图像,通过串口 1 采集位置信息,串口 2 与电机控制箱通讯进而控制导轨电机运动,整个过程实现自动对焦。

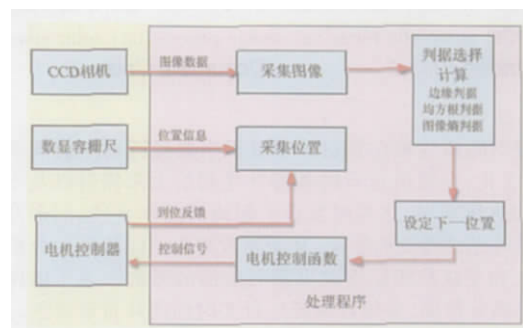


图 2 系统控制框图

Fig. 2 System control diagram

3 对比试验结果及分析

实验中,在 $\lambda_2=632.8 \text{ nm}$ 和 $\lambda_1=441.6 \text{ nm}$ 的滤光片波段下,对图 3 中的分辨率板图像分别使用边缘判据中的 4 点边缘算子、Sobel 算子、边缘 Prewitt 算子、标准差判据和图像熵判据进行自动调焦测试。为对比各判据,对数据进行了归一化,单次结果如图 4。

由于透镜对不同波长光的折射率不同,导致 2 个波段下焦面位置并不相同。如图 4 中所示,二者位置相差 18 mm 左右。

为减小光源亮度变化与系统误差的影响,在重复调焦中用四次曲线对每次调焦结果进行了拟合。取拟合曲线的极值位置为最佳焦面位置。重复调焦结果见图 5。

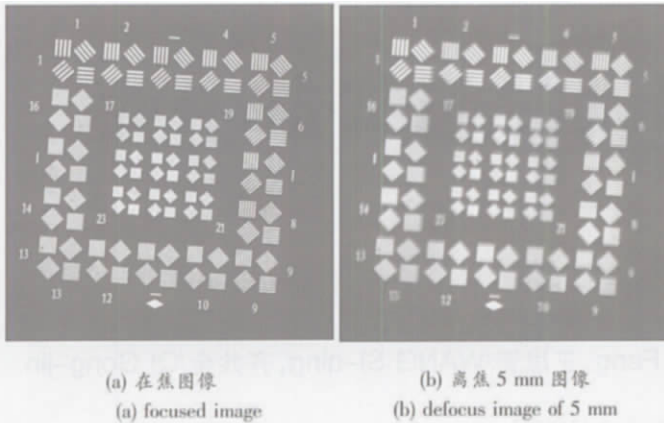


图 3 分辨率板在焦与离焦图像

Fig. 3 Focused and defocus image of resolving board

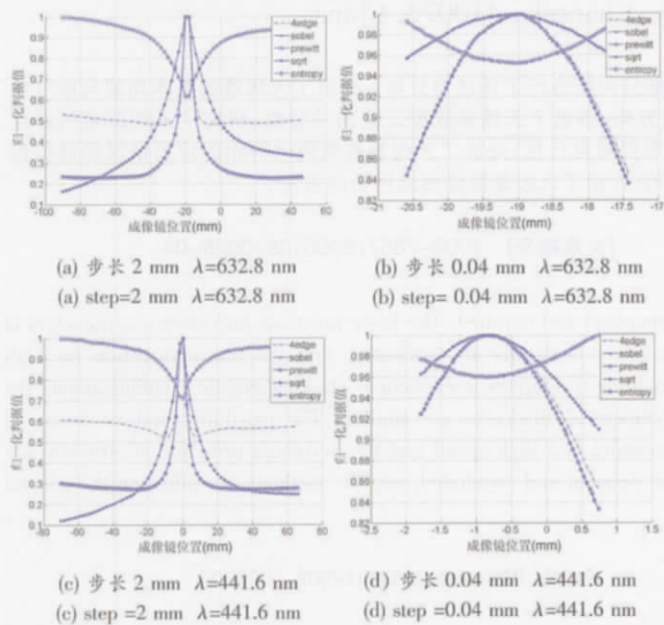
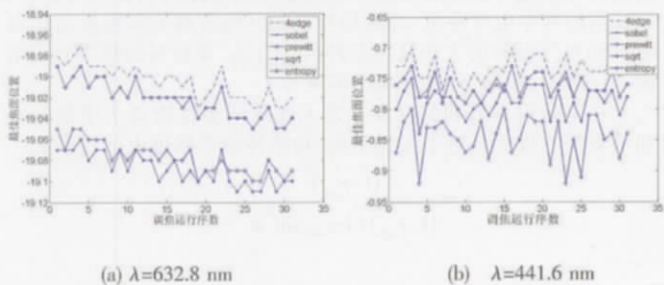
图 4 不同波长与步距下调焦判据值随成像镜位置变化曲线
Fig. 4 Focusing criteria-position curve with different wavelengths and step distances

图 5 重复调焦拟合焦面位置

Fig. 5 Fitting focal plane position of repeating focus

为了对几种调焦判据进行定量的分析对比, 定义了如下 4 个量化参数^[4]。

1) 重复精度: 多次重复调焦, 确定焦面位置间距离差的最大值。

2) 半峰值宽度: 调焦曲线中判据值在峰值 50% 以上区间的宽度; 其值越小, 峰值曲线越尖锐, 也就越容易精确定位焦面位置。

3) 检焦范围: 曲线峰值两侧一直单调下降的区间范围; 其值越大, 判据作用区间就越大。

4) 伪峰值数: 局部极值。

依据这 4 个量化参数对实验结果分析处理, 得到表 1 数据。

表 1 $\lambda_1=632.8$ nm, $\lambda_2=441.6$ nm 时调焦判据性能比较
Tbl. 1 Focusing criteria performance,
 $\lambda_1=632.8$ nm, $\lambda_2=441.6$ nm

判据	重复精度/mm		半峰值宽度/mm		检焦范围/mm		伪峰值数	
	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2
四点边缘	0.06	0.07	20	16**	26	16	0	0
Sobel	0.06	0.06	14	12	58	36	0	0
Prewitt	0.06	0.06	14	12	60	38	0	0
标准差	0.07	0.08	36	22	110	100	0	0
图像熵	0.08	0.17	40***	35***	100	80	0	0

注: * 重复调焦 30 次, 每次用四次方曲线拟合, 取极大值位置为调焦位置;

** 取 55% 峰值以上区间宽度;

*** 图像熵焦面在极大值处, 半峰值宽度按极大值 1.5 倍取。

从结果中可以看出以下规律。

1) 四点边缘、Sobel 算子、Prewitt 算子、标准差算子 30 次重复检焦拟合精度在 0.1 mm 以内, 其中 Sobel 与 Prewitt 达到 0.06 mm, 精度最高。

2) Sobel 算子与 prewitt 算子算法相近, 二者的 4 项性能指标极为接近, 判据效果最佳。

3) 四点边缘算子运算量最小, 但检焦范围小, 半峰值宽度与重复精度均小于 Sobel 算子和 Prewitt 算子。

4) 图像熵判据在重复检焦精度最大值大于 0.15 mm, 半峰值宽度、运算量大于其他几种方法。

5) 良好的调焦判据应有高的重复调焦精度、窄的半峰值宽度、宽的作用范围、少的伪峰值数与小的运算量, Sobel 算子与 Prewitt 算子量化参数相似, 在实验测试中指标最优。

4 结论

针对分辨率板图像, 依据调焦函数的 5 个性能参数对 5 种调焦判据做了实验研究。结果显示, Sobel 算子与 Prewitt 算子指标均衡, 性能最优。其中 Sobel 算子有系数 2 的加权, 对低对比度的太阳米粒组织像的边缘更敏感^[9], 在以后的实际选择中可以重点考虑。需要指出的是, 目前实验中做的是针对分辨率板的静止图像调焦判据测试, 而日面像对调焦判据性能的影响以及日面变化对调焦过程的影响在以后的工作中还要进一步地分析考虑。

参考文献 (References)

- [1] 中科院国家天文台 SST 研究组, 德国马普高层大气研究所. SST: A 相研究报告[R], 1997.
- [2] 郭玲华, 丁晓青, 方卯发. 空间太阳望远镜在轨自动调焦的最小图像熵判据[J]. 光学技术, 2003 (7): 391- 393.
- [3] 郑玉珍, 吴勇, 倪旭翔. 实时自动对焦的研究[J]. 光电工程, 2004 (4): 64- 66.
- [4] SANTOS A, ORTIZ DE SOLORZANO C, DE LA PENA J, et al. Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis[M]. Journal of Microscopy, 1997(188): 264- 72.
- [5] 王 慎. 空间太阳望远镜在轨自动调焦技术研究 [D]. 中国科学院国家天文台, 2004.
- [6] 郭玲华. 空间光学遥感器在轨自动调焦的研究 [D]. 中国科学院国家天文台, 2005.

(责任编辑 黄永明)