

文章编号 1004-924X(2015)01-0174-10

广角天文望远镜的自动调焦

黄 奎^{1,2}, 辛立平¹, 韩旭辉¹, 魏建彦^{1*}

- (1. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:介绍了一种基于步进电机(无位置检测传感器)和像质反馈的广角天文望远镜自动调焦系统,该系统由步进电机位置开环控制系统和图像清晰度评价系统组成。基于天文图像的特点,提出利用天体点源星像的半高全宽(FWHM)作为图像清晰度的评价参数;为了提高系统精度,对定位控制系统进行了误差分析;测定了调焦当量、光学焦深、系统回差、步进脉冲当量等系统关键机构参数,进而高精度地修正了系统定位误差;分析和测定了温度变化和像质变化的相关性,明确了调焦方向和温度变化之间的定性关系;设计了焦深边缘定位策略,实现了快速调焦。该系统具有“容错”和“自学习”功能,具有较高的自动化和智能化程度。将系统设计应用于 SVOM 天文卫星地基广角相机阵^[1-2](GWAC),实际测试和天文观测表明,调焦系统的定位精度为 $\pm 3.0 \mu\text{m}$,调焦精度为 0.05 pixel,且一次调焦过程即可获得最佳像质,调焦效率较高,系统运行也很稳定,基本满足天文观测的需求。

关键词:广角天文望远镜;自动调焦;步进电机;位置开环;像质反馈;图像清晰度评价

中图分类号:P111.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152301.0174

Auto-focusing of wide-angle astronomical telescope

HUANG Lei^{1,2}, Xin Li-ping¹, HAN Xu-hui¹, WEI Jian-yan^{1*}

- (1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wjy@nao.cas.cn

Abstract: An auto-focusing system based on a step motor (without position detection sensor) and image quality feedback for an astronomical telescope was introduced, which consists of a step motor position open-loop control subsystem and an image definition evaluation subsystem. Based on the characteristics of astronomical images, the Full Width at Half Maximum (FWHM) of point source images of stars was used as image definition evaluation parameters. In order to achieve high efficiency of focusing process, the error of the position control system was analyzed. Then, the focusing equivalent, focal depth, system backlash and the step pulse equivalence were measured to correct the system position errors effectively. By analyzing and measuring the correlation between temperature change and image quality change, the qualitative relationship between focusing direction and temperature change was obtained. Moreover, the focal depth edge positioning policy of the focal plane was designed and a fast process focusing was achieved. The system has fault-tolerant function and self

收稿日期:2014-07-08;修订日期:2014-08-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1331202);国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB845800)

learning ability, so it shows higher levels on automation and intelligence. The design above mentioned was applied to a Ground-based Wide-Angle Camera (GWAC) array of SVOM astronomy satellite. Measurement results and astronomical observations show that positioning accuracy of the auto-focusing system is $\pm 3.0 \mu\text{m}$ and the focusing accuracy is 0.05 pixel. As it can obtain the best image quality only by one focusing process, it has higher focusing efficiency while containing stable running.

Key words: wide-angle astronomical telescope; auto-focusing; step motor; position open-loop; image quality feedback; image definition evaluation

1 引 言

天文望远镜一般工作在野外环境,用于观测恒星星点。在观测恒星的过程中,全夜温差大,望远镜机械机构会发生形变^[3],使得焦面离焦;地球大气湍流造成的大气扰动也会引起星点亮暗发生变化,从而影响星像清晰度。如何保持焦点位置、克服大气扰动的影响以获取最佳像质,是光学天文望远镜需要解决的问题。

解决这个问题有 3 种方法:(1)手动法,通过人工操作的方式实现调焦;(2)通过位置检测,利用像质反馈实现自动调焦;(3)建立温度变化和焦距变化的对应函数关系,利用望远镜实时温度数据自动调焦^[4-5]。

天文观测的发展对自动调焦提出了迫切的需求。一方面,远程望远镜包括空间望远镜技术的迅速发展对望远镜系统提出了很高的自动化要求;另一方面,阵列式的天文观测设备发展,几乎不可能通过手动法实现调焦。

本文以中法合作天文卫星 SVOM 项目的地面观测系统地基广角相机阵(Ground Wide-angle Cameras, GWAC)为研究对象,开展广角天文望远镜的自动调焦技术研究。GWAC 由 36 个广角望远镜组成,每台望远镜的口径为 18 cm,焦距为 22 cm,采用 4 000 pixel \times 4 000 pixel、像元大小为 12 μm 的背照明 CCD 探测器。主要科学目标是监测伽玛射线暴的光学瞬时辐射和其它剧烈变化天体。

作为地基望远镜阵列, GWAC 的 36 台望远镜需要同时工作,如果采用人工手动调焦,工作效率低,工作强度大。同时,由于 GWAC 望远镜为

广角小焦比光学系统,焦深非常短,与大型望远镜,如国家天文台 2.16 m 望远镜、1 m 望远镜等相比,对调焦更敏感,更易受到温度变化等因素的影响,对调焦的精度要求也更高^[6-7]。

根据 GWAC 广角望远镜的星像像元较大、焦深短、大气视宁度对星像质量影响较小的特点,设计了一种基于图像清晰度评价分析反馈的天文望远镜自动调焦系统,通过对步进脉冲当量校准以及调焦当量、系统回差、焦深等系统机构参数的分析、测定和图像清晰度评价算法,结合软件控制策略,实现了广角天文望远镜高效的自动调焦过程。同时,通过“自学习”和“容错”等功能的设计,提高了系统的自动化和智能化程度^[8]。

2 调焦系统原理方法

2.1 系统需求分析

2.1.1 调焦判据的选择

相对望远镜的焦距,可以认为天体目标的物距处在无穷远处,且大部分为点源。点源在焦面探测器上成像的像质通常可以用高斯函数来描述,如图 1 所示。高斯函数中表征能量集中度的参数为 σ 。在天文学中,通常利用半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)来表征,FWHM 与 σ 有固定关系, $\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma = 2.355\sigma$ 。FWHM 反映了星体的能量集中度。FWHM 的测量精度与星像的采样程度、星体本身的信噪比以及天光亮度的分布等因素相关,采样越高,亮度分布拟合越好,测量精度越高;信噪比越高,测量精度越高。同时,天光亮度的分布不均匀也会影响同等亮度的信噪比。所以 FWHM 的计算中尽

量选择高信噪比、不饱和的星体进行计算,可提高 FWHM 的计算精度。

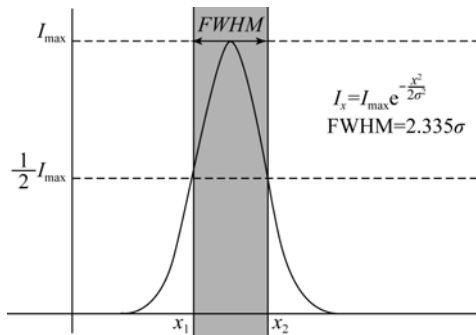


图 1 FWHM 定义示意图

Fig. 1 Definition of FWHM

影响天文望远镜 FWHM 的因素主要有望远镜自身光学质量、大气视宁度和离焦程度。望远镜自身光学质量主要是由设计和装配决定,出厂时即已确定;对于大像元(像元大小为 11.25")的

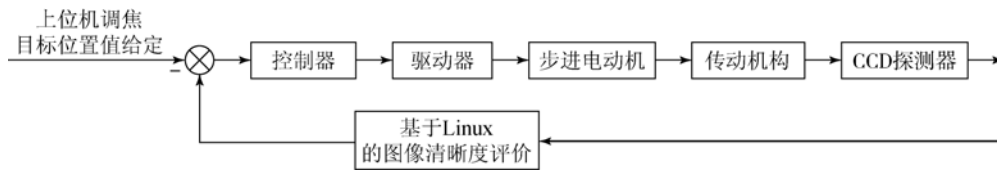


图 2 自动调焦系统控制原理方框图

Fig. 2 Control principle diagram of auto-focusing system

(2) 关键设备选型

为了适应望远镜工作现场防尘、防电磁干扰等的要求,选用工业控制计算机作为控制系统上位机;选用具有高速脉冲输出能力的可编程控制器(Programmable Logic Controller, PLC)作为系统控制器(下位机);执行机构选用步进电动机,并配置具有电子细分能力的步进电机驱动器,以获得平滑的运动输出。

2.2.2 软件系统设计

自动调焦系统软件主要由上位机控制程序、PLC 底层控制程序和图像清晰度评价程序组成。

(1) 上位机控制程序设计

基于 VC++ 平台的上位机控制软件主要由图像清晰度评价输入模块、自动调焦策略解释/

GWAC 角天文望远镜, 2" 的大气视宁度对于 FWHM 不会产生明显的影响;对于温度变化引起的离焦,调焦系统执行机构应能精确补偿相应的焦距偏差量。

综上,设计望远镜调焦系统,需要考虑两个条件:(1)FWHM 可检测;(2)焦距变化可补偿。

2.1.2 关键性能需求

评价天文望远镜自动调焦系统性能的关键性能要求为控制精确、调焦快速^[9]和系统可靠。

2.2 系统设计

2.2.1 硬件系统设计

(1) 自动控制系统原理设计

本系统基于步进电机的位置开环控制,通过像质反馈的方式实现望远镜的自动调焦。主要由上位机、控制器、步进电机、传动机构及 CCD 等组成。控制系统原理如图 2 所示:

执行模块和调焦控制信号输出模块组成。

1) 图像清晰度评价采集模块

上位机控制程序通过 TCP/IP 协议与图像处理计算机通讯,接收星像 FWHM,作为调焦的判据。

2) 自动调焦策略解释/执行模块

上位机控制程序依据调焦判据,通过调焦控制策略自动生成实现 CCD 焦面定位操作的控制指令。

3) 通讯模块

通讯模块主要执行输出指令到 PLC 以及接收 PLC 发送的 CCD 焦面位置和状态信息,它由基于微软提供的 MSCOMM 通讯控件实现。

自动调焦系统调焦控制策略如图 3 所示。

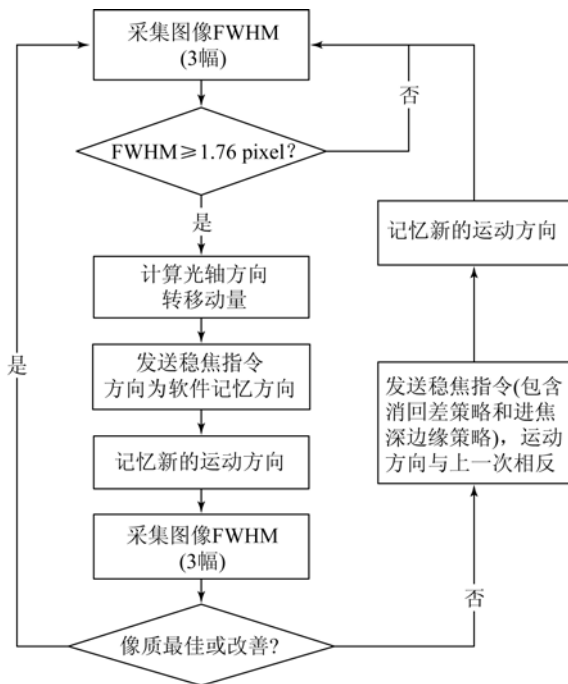


图 3 自动调焦策略流程图

Fig. 3 Flow chart for auto-focusing method

(2) PLC 底层控制程序设计

PLC 底层控制程序的主要功能是按照位置控制要求产生步进电机控制脉冲,实现精确定位。西门子 S7-200 PLC 内嵌 PTO/PWM 脉冲发生器模块,可以定制位置控制脉冲,从而实现理论精度为 1 Cts 的定位。应用带有脉冲包络的 PTO 功能实现对步进电机的位置控制,通过定制和改写脉冲包络相应的控制字,步进电机将按照“梯形”曲线轨迹实现升速、匀速和降速运行,并输出规定数量的脉冲数,达到平稳运行和定位。

2.2.3 图像清晰度评价策略设计

目前,提出了多种自动调焦算法^[10-12]。考虑到天文观测中采集的星像主要是点源,可以使用星体的半高全宽(FWHM)来进行图像清晰度评价。为此,自动调焦系统开发了图像质量实时分析软件。调焦控制软件将通过 FWHM 大小的变化来确定调焦量。

星像 FWHM 测量流程如图 4 所示。CCD 采集的天文图像将直接被写入基于 linux 系统的数据处理计算机。分析软件则不间断的监测。如果已经产生了新的图像,软件将马上进入分析状态。

首先软件会对新图像自动分析背景的噪声水平,提取信噪比大于 10 sigma 的星体,然后使用天文数据处理软件包 IRAF^[13]对亮度适中的星体进行星体亮度轮廓拟合,并给出 FWHM 值。星体轮廓拟合函数选择了 Moffat 函数:

$$F(r) = F_0 \left[1 + \left(\frac{r}{\alpha} \right)^2 \right]^{-\beta} \quad (1)$$

半高位置定义为:

$$F(r) = 0.5 F_0 \quad (2)$$

则 FWHM 与 Moffat 各参数之间的关系为:

$$FWHM = \alpha * 2 * (2^{\frac{1}{\beta}})^{0.5} \quad (3)$$

依据轮廓大小和形状,将剔除可能由于宇宙线、热噪声、大星系等目标的干扰。在剩余图像各区域均匀分布的目标中,多次递归并计算出 FWHM 的平均值。最后通过 socket 程序将 FWHM 平均值发送到调焦控制计算机,作为后续调焦的参考数据。

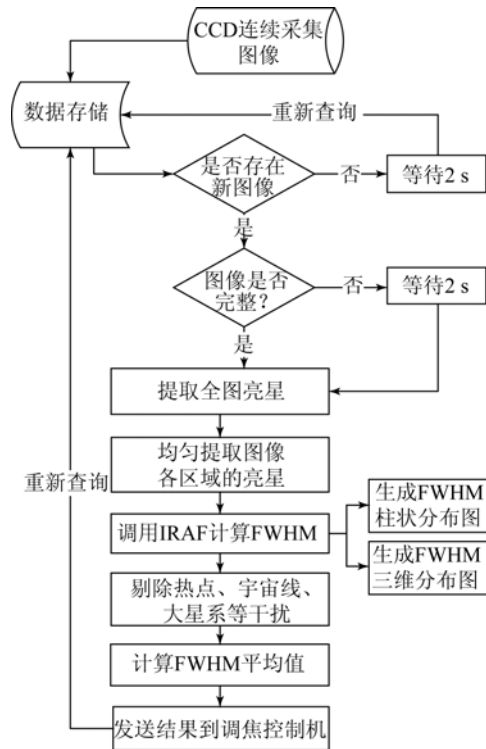


图 4 星像 FWHM 测量流程图

Fig. 4 Flow chart for Star FWHM measurement

2.2.4 调焦效率设计

为了实现快速调焦,利用焦深的特点进行焦深

边缘定位设计,减少了调焦次数,提高了调焦效率。

(1) 温度相关性分析

定性分析离焦方向和温度变化之间的相关性即为温度相关性分析。温度相关性分析为调焦方向判断和焦深边缘定位提供了依据。

(2) 调焦方向控制逻辑

调焦方向与调焦前 CCD 焦面的位置相关, CCD 焦面在焦内与在焦外的调焦方向相反。借助温度相关性分析结果,确定每次调焦动作的方向,可有效避免调焦失败,从而提高调焦的效率。

(3) 焦深边缘定位设计

对于天文夜间观测,温度变化通常具有趋势性,从而使得 CCD 焦面移动也具有趋势性。利用焦深内星像像质基本不变的特点,依据温度相关性分析结果,调焦时可定位 CCD 焦面到移动趋势方向相反的一侧,当焦面由于温度变化发生移动时,需要移动接近整个焦深的距离才会发生离焦,大大延长了相邻两次调焦间隔的时间,明显减少了调焦的次数,提高了调焦效率。

2.2.5 调焦可靠性设计

为了提高系统的可靠性和适应性,分别进行了系统简化设计、智能化设计、容错设计和冗余设计。

(1) 简化设计

选用步进电机作为控制系统的动力执行元件,抛弃了直线位移传感器,是一种无位移(或角度)传感器的位置开环控制系统。

(2) 智能化设计

发生调焦方向错误时,会增大光学系统的离焦程度,降低调焦的效率。智能化设计会自动纠正调焦方向错误,并依据 CCD 焦面移动具有趋势性的特点,随后的调焦过程将自动保持正确的调焦方向。如果温度趋势观测中发生改变,通过上述过程,调焦系统仍可迅速纠正错误并回归正确的调焦逻辑。上述过程表明,系统具有一定的“自学习”功能。

(3) 容错设计

通常只需采集一幅图像的 FWHM 即可完成

自动调焦,但考虑到像质由于跟踪的不稳定性或其它因素导致的突然跳变,为了不使自动调焦系统因此产生误动作,对连续 3 帧图像进行判读,只有全部 3 帧图像的 FWHM 均大于稳焦阈值,步进电机才会执行调焦动作,使得系统具有一定的“容错”功能。

(4) 冗余设计

步进电机和控制器选型时,分别在力矩和输入输出通道方面留有充足的裕量。选取大气视宁度参数时,在不明显降低星像像质的条件下,尽量放大其影响,确保系统获取最佳的像质。

3 实验测试

GWAC 采取沿光轴方向调节 CCD 焦平面位置的调焦方式,调焦行程为 ± 1 mm,调焦执行机构为步进电机。采用多级齿轮配合高精度丝杠传动方式。

3.1 测试依据

GWAC 每台望远镜 CCD 探测器对应 $12.80^\circ \times 12.80^\circ$ (方形),单个 CCD 像元对应的空间张角为 $11.25''$ 。

对于 GWAC 广角望远镜样机的检测表明,望远镜本身的 FWHM 约为 1.70 pixel。国家天文台兴隆观测基地大气视宁度通常为 $2''$ 。为了增加系统的冗余度,采用视宁度为 $4''$ 作为计算参数。当视宁度为 $4''$ 时, GWAC 样机的 FWHM 为:

$$FWHM_{GWAC} = \sqrt{1.70^2 + \left(\frac{4}{11.25}\right)^2} = 1.74.$$

像质从 1.70 pixel 下降为 1.74 pixel,对科学目标不会造成明显影响。

GWAC 光学系统设计焦深为 $28 \mu\text{m}$,考虑系统冗余度,设计时取 $\pm 1/5$ 的焦深,即 $\pm 5.6 \mu\text{m}$ 作为调焦系统定位精度要求。

根据以上分析, GWAC 自动调焦系统技术指标为:

(1) 定位精度

调焦系统定位精度指标为 $\pm 5.6 \mu\text{m}$ 。

(2) 调焦精度

当 $FWHM \leq 1.75$ pixel 时,即可认为光学系统处于焦点位置,图像像质最佳;

当 FWHM 超过 1.75 pixel 时,系统自动执行调焦过程,直到图像的 FWHM 锁定在 1.75 pixel 以内。



图 5 GWAC 望远镜样机
Fig. 5 GWAC telescope prototype

3.2 温度相关性测试

通过多个整夜无调焦过程的自动跟星实测,并同步测量望远镜的环境温度,完成了温度变化和星像像质变化之间的关系。如图 6、7 所示。

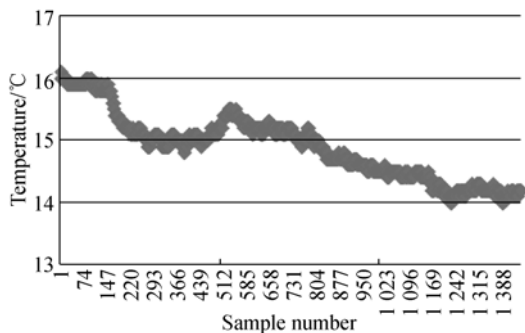


图 6 GWAC 环境温度测量

Fig. 6 GWAC environment temperature measurement

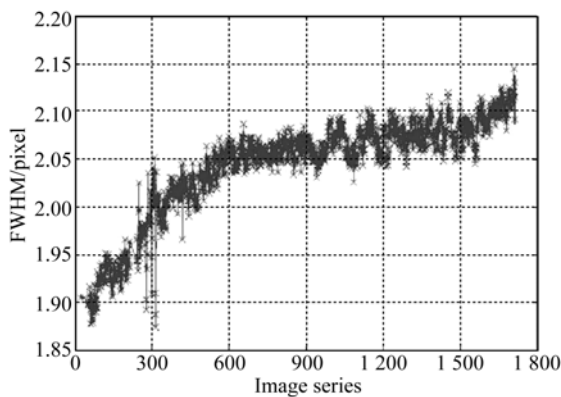


图 7 GWAC 像质相对于环境温度变化的结果

Fig. 7 GWAC image quality changed with the change of environmental temperature

图 6 和 7 的同步测量结果表明了星像像质和温度之间良好的相关性,即像质随着温度的变化而变化:当环境温度逐渐降低时,焦面位置将逐渐向镜盖方向移动;反之,焦面位置将逐渐向相反的方向移动。按照上述规律,当调焦动作发生时,通过获取当前的温度参数,可判知调焦的方向,从而提高了调焦的效率。

3.3 定位精度测试

光轴方向的 CCD 焦平面定位精度是调焦系统的关键技术指标之一,直接影响调焦效果。为了保证测试结果的覆盖性,采用任意位置定位、相邻两个位置反向运动的测试方法。

调焦系统定位精度测试数据如表 1 所示。

表 1 GWAC 调焦系统定位精度

Tab. 1 GWAC positioning measurement (mm)

目标位置	实际位置	目标位置	实际位置
0.077	0.079	-0.067	-0.070
0.029	0.030	-0.018	-0.017
0.052	0.051	-0.094	-0.095
0.217	-0.215	-0.045	-0.046
0.297	0.300	-0.116	-0.117
0.148	0.147	0.100	0.098
0.247	0.246	0.053	0.053

测试数据统计表明,调焦系统定位精度优于 $\pm 3.0 \mu\text{m}$ 。

3.4 现场模拟调试

首先通过人工扰动的方法使望远镜频繁离焦,测试系统对像质变差的反应,测试结果如图 8 所示;在此基础上,测试望远镜连续跟踪时先关闭、后启动时自动调焦系统的有效性,测试结果如图 9 所示。

黑色叉号标记和蓝色上三角标记表示手动离焦后变差的像质;紫红色空心圆圈标记表示调焦方向错误后变差的像质;黑色虚线标记表示调焦方向错误和正确时的分界线。

在上述测试的基础上进一步模拟测试,即夜晚跟星观测时,前半段不启动自动调焦软件,后半段再启动,观察系统的反应,红色点为没有进行任何调焦,绿色点为调焦过程,蓝色点为调焦后的稳

焦过程,小图是调焦过程的放大图(彩图见文章电子版)。

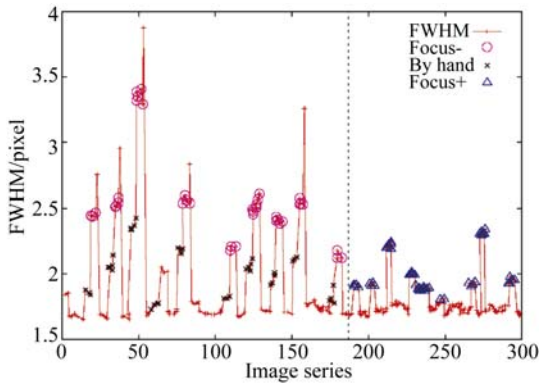


图 8 调焦系统模拟测试

Fig. 8 Simulation test of auto-focusing system

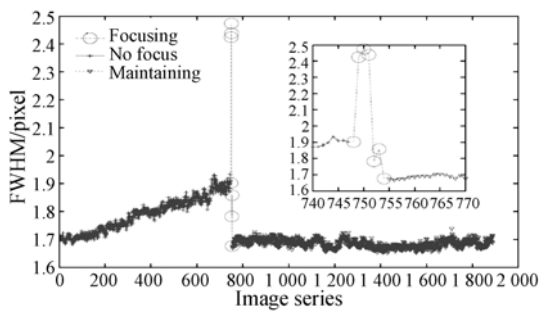


图 9 自动调焦过程图

Fig. 9 Chart of automatically focusing process

图 8 表明,系统调焦策略对超出调焦阈值的像质作出了快速、准确、有效的反应,且在调焦方向错误时,自动进行了纠正并调焦成功。图 9 验证了自动调焦系统的有效性,并证明了焦深边缘定位策略发挥了作用,后半程一直保持了最佳像质。

3.5 系统跟星实测

在系统模拟测试成功后,随后进行了实测验证。图 10 所示为全夜晚自动跟踪观测时的自动调焦过程,图 11 是调焦前后的实测图像对比(彩图见文章电子版)。

图 10 中,绿色圆圈表示自动调焦过程,在 9 h 的连续自动跟踪观测中,系统共进行了 1 次自动调焦,且调焦成功,调焦过程快速无振荡,一次动作即准确锁定了焦点,获得了最佳像质。

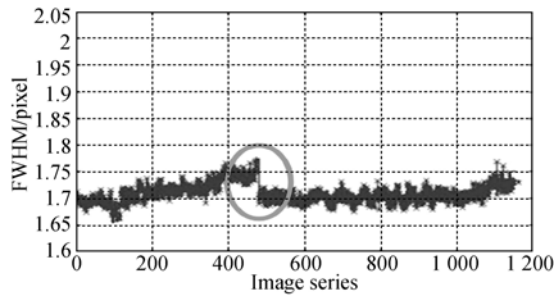


图 10 长时间连续自动跟踪观测

Fig. 10 Long time continual auto-tracking observation

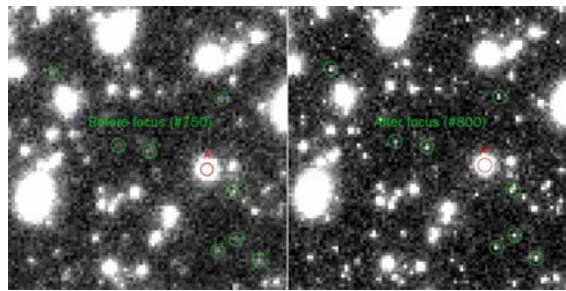


图 11 调焦前后图像对比图

Fig. 11 Comparison photos before and after auto-focusing

图 11 中,左图为调焦前的图像,右图为调焦后的图像。对比左右两图后表明,相对于左图,右图中的星能量更加集中,信噪比也有所提高。从肉眼直接判断就可以发现,在相同的灰色对比度中,用绿色圈标记的典型暗星在右图中(调焦后)比左图中(调焦前)信噪比高(彩图见文章电子版)。

4 结果及误差分析

利用多次现场实测数据,并结合数理统计学方法得到调焦系统定位精度为 $\pm 3.0 \mu\text{m}$,调焦精度为 0.05 pixel。

4.1 定位误差分析

步进电机开环控制系统具有结构简单、稳定可靠的优点^[14]。尽管存在像质反馈环节,但对于缺乏直线位移传感器的步进电机系统,如果不进行误差修正,将会导致调焦过程中需要多次振荡过程才能精确定位,会对调焦的效率产生明显的影响,进而影响到天文观测数据的质量。

每次发生调焦时,需要计算调焦位置相对偏

移量:

$$S = \Delta P \times F_p + M_h, \quad (1)$$

其中: S 为调焦位置相对偏移量; ΔP 为像质变化; F_p 为调焦当量; M_h 为机械回差(反方向时)。

步进电机依靠位置脉冲实现定位控制,依据相对位置偏移量和脉冲当量,可计算出位置控制总脉冲数:

$$P_t = \frac{S}{\delta}, \quad (2)$$

其中: P_t 为总脉冲数; S 为调焦位置相对偏移量。

依据式(1)和(2),脉冲总数为:

$$P_t = (\Delta P \times F_p + M_h) / \delta. \quad (3)$$

式(3)清晰地表达了影响调焦系统定位精度的各个因素:调焦当量为 F_p ;脉冲当量为 δ ;机械回差为 M_h ;图像清晰度评价为 ΔP 。

系统误差分析表明,为了克服步进电机位置开环系统由于机械回差和传动误差带来的定位精度较差的缺点^[15],实现调焦系统的精确定位控制,需要精确测定步进电机脉冲当量、调焦当量、系统回差和系统焦深等系统特性参数;同时,进行了运动方向记忆策略设计,实现了对于系统定位误差的高精度修正。各组数据测量结果如表 2 所示。

表 2 系统关键机构参数测定

Tab. 2 Parameters for key mechanism

测量项目	测量结果	备注
步进脉冲当量 ($\mu\text{m}/100$ pulse)	2.32	多次测量取平均值
机械回差/ μm	16 \pm 2	多组测量误差 $p-p$ 值 多次测量取平均值
调焦当量/ μm	0.05/10	(在焦面 ± 100 μm 内测量)
光学焦深/ μm	25	多次测量取平均值

4.2 调焦精度分析

FWHM 的测量精度将影响调焦精度;其次,大气视宁度对于 GWAC 这样的广角天文望远镜影响仍会作为一个误差因子而存在;最后,焦面在

焦深位置的不同,像质也会产生一定的变化。

4.2.1 FWHM 测量精度

通过选择高信噪比、不饱和的星体作为 FWHM 的计算样本,同时,选择 10 sigma 的星体作为选择星体样本的临界值以保证足够多的样本数,提高了 FWHM 的测量精度。

CCD 焦面在不同的位置,分别测量 FWHM5 组值,测试结果如表 3 所示。

表 3 CCD 焦面不同位置星像的 FWHM

Tab. 3 Star FWHMs of different positions of CCD

focal plane		(pixel)			
位置	FWHM				
位置 1	1.707	1.698	1.705	1.682	1.715
位置 2	1.880	1.876	1.867	1.875	1.870
位置 3	1.975	1.973	1.977	1.969	1.976
位置 4	2.056	2.041	2.032	2.059	2.056
位置 5	1.855	1.851	1.842	1.853	1.855
位置 6	1.927	1.932	1.934	1.938	1.325
位置 7	2.189	2.226	2.210	2.202	2.196
位置 8	1.768	1.771	1.765	1.782	1.766

多次测试结果表明,FWHM 的测量精度为 ± 0.015 pixel。

4.2.2 大气视宁度的影响

国家天文台兴隆观测基地大气视宁度通常为 2",取值 2.5"可覆盖大部分的观测夜。GWAC 望远镜自身的 FWHM 为 1.70 pixel,大气视宁度对于 FWHM 的影响为:

$$FWHM_{GWAC} = \sqrt{1.70^2 + \left(\frac{2.5}{11.25}\right)^2} = 1.72.$$

因此,大气视宁度带来的 FWHM 测量误差为 0.02 pixel。

4.2.3 CCD 焦面在焦深不同位置的影响

先在光轴方向移动 CCD 使之离焦,然后以 5 μm 为步长,逐渐逼近焦深,进入焦深后,继续移

动 CCD,直到移出焦深,记录每次移动后的 3 组 FWHM 值。测试结果如表 4 所示。

表 4 CCD 焦面在焦深不同位置星像的 FWHM

Tab. 4 Star FWHM of different positions of CCD focal plane in focal depth (pixel)

移动次数	FWHM		
第一次	1.798	1.807	1.801
第二次	1.776	1.768	1.771
第三次	1.751	1.749	1.758
第四次	1.724	1.719	1.717
第五次	1.708	1.711	1.697
第六次	1.710	1.706	1.713
第七次	1.697	1.688	1.709
第八次	1.710	1.709	1.694
第九次	1.695	1.712	1.711
第十次	1.706	1.692	1.700
第十一次	1.730	1.728	1.733
第十二次	1.758	1.749	1.753

测试数据表明,在焦深范围内,FWHM 浮动范围为 ± 0.01 pixel,和 FWHM 本身的测量精度基本相同,因此,CCD 焦面在焦深的不同位置,对 FWHM 的影响可以忽略不计。

综合上述分析,FWHM 调焦精度为 0.035 pixel,考虑系统的冗余度和调焦的稳定度,调焦阈值设置为 0.05 pixel,因此,实际得到的调焦精度为 0.05 pixel。

参考文献:

- [1] GOTZ D, PAUL J, BASA S, *et al.*. SVOM: a new mission for gamma-ray burst studies [J]. *AIP Conf. Proc.*, 2009, 1133: 25-30.
- [2] JACQUES P, WEI J Y, STEPHANE B, *et al.*. The Chinese-French SVOM mission for GRBS studies [J]. *CR. Phy.*, 2011, 298: 12-21.
- [3] 刘磊. 空间三反相机调焦范围的确定 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 632-633.
- LIU L. Focusing range of space off-axial TMA optical camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):

5 结 论

本文根据广角天文望远镜星像像质受大气视宁度影响不明显的特点,设计了一种高精度、高效率、高可靠性的自动调焦系统。通过误差修正的方法,步进电机位置开环控制系统获得了较高的定位精度;采取了基于星像半高全宽(FWHM)的图像清晰度评价方法,实现了星像像质测量和反馈;通过温度变化和像质变化之间的相关性测试和定性分析,证明了温度变化和离焦方向之间良好的相关性,进而确定了调焦的方向,并通过光学焦深的实测,最终实现了快速调焦。实验显示,该系统具有较高的可靠性和自动化和智能化程度。实际测试和在 SVOM 天文卫星地基广角相机阵(GWAC)上的实际应用表明,调焦系统定位精度为 $\pm 3.0 \mu\text{m}$,调焦精度为 0.05 pixel,调焦快速有效,一次调焦过程即可获得最佳像质,结构简单、稳定可靠,满足天文观测对于望远镜自动调焦系统的要求。本文介绍的调焦系统设计方法为解决光学天文望远镜自动调焦问题提供了一种新的思路,并建立了一个实用化的范例。

6 致 谢

作者特别感谢硕士研究生陈洪先生在设备调试期间给予的帮助,感谢中国科学院国家天文台裘予雷研究员的有益建议,感谢国家天文台兴隆观测基地的支撑支持,感谢评审专家以及编辑老师的指导。

632-633. (in Chinese)

- [4] 赵飞,王森,邓超,等. 兴隆 1m 光学望远镜消杂散光系统 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 513-520.
- ZHAO F, WANG S, DENG CH, *et al.*. Stray light elimination system of Xinglong 1 m Astronomical Optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 513-520. (in Chinese)
- [5] 赵飞. 大口径天文光学望远镜杂散光问题研究 [D]. 北京:中国科学院国家天文台, 2010: 31-38
- ZHAO F. *Study of stray light of the large diameter astronomical optical telescope* [D]. Beijing: National Astronomical Observatories, Chinese A-

- cademy of Sciences, 2010;31-38. (in Chinese)
- [6] 高东洋,赵飞,邱鹏,等. 基于 OMR 的 2.16 米望远镜积分视场单元方案 [J]. 天文研究与技术, 2012, 2:143-149.
GAO Dong-yang, ZHAO Fei, QIU Peng, *et al.*. 2.16 m Telescope integral field unit of view solution based on OMR [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2012, 2:143-149. (in Chinese)
- [7] 赵飞,王森. 兴隆 1 m 光学望远镜杂散光效应研究 [J]. 天文研究与技术, 2010, 02:158-167.
ZHAO F, WANG S. Study of stray light effect of Xinglong 1 m astronomical optical telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 02:158-167. (in Chinese)
- [8] 吕恒毅,刘杨,薛旭成,等. 遥感相机的智能调焦方法 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5):1261-1262.
LV H Y, LIU Y, XUE X CH, *et al.*. Intelligent focusing method for the remote sensing cameras. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5):1261-1262. (in Chinese)
- [9] 王魏,郑芝寰,沈会良. 多光谱成像系统的快速调焦方法 [J]. 光电工程, 2013, 40(9):36-40
WANG W, ZHENG ZH H, SHEN H L. A fast autofocus method for multispectral imaging system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(9):36-40. (in Chinese)
- [10] 张艳超,孙强,赵建,等. 投影微分法实现多光谱成像仪的自动对焦控制 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(8):2023-2024.
ZHANG Y CH, SUN Q, ZHAO J, *et al.*. Auto-focusing adjustment of multi-spectral imager by differential projection method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):2023-2024. (in Chinese)
- [11] 张来线,孙华燕,郭惠超,等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法 [J]. 光子学报, 2013, 42(5):606-609.
ZHANG L X, SUN H Y, GUO H CH, *et al.*. Auto focusing algorithm based on largest Gray gradient summation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 42(5):606-609. (in Chinese)
- [12] 陶淑苹,张续严,金光. 基于方向 WPS 改进的 TDI CCD 遥感图像清晰度评价函数 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8):2080-2082.
TAO SH P, ZHANG X Y, JIN G. Improvement of the definition evaluation function for TDI CCD remote sensing images by directional wavelet power spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8):2080-2082. (in Chinese)
- [13] 张艳,林众,郭迪福. IRAF 软件中 DAOPHOT 包的应用 [J]. 天文研究与技术, 2011, 8(4):410-412.
ZHANG Y, LIN ZH, GUO D F. An Application of the DAOPHOT Package in the IRAF [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2011, 8(4):410-412. (in Chinese)
- [14] 吕世良,刘金国,贾平,等. 离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(8):2156-2157.
LV SH L, LIU J G, JIA P, *et al.*. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8):2156-2157. (in Chinese)
- [15] 陈洪达,陈永和,史婷婷,等. 空间相机调焦机构误差分析 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(5):1350-1352.
CHEN H D, CHEN Y H, SHI T T, *et al.*. Error analysis for focusing mechanism of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5):1350-1352. (in Chinese)

作者简介:



黄 垒(1975—),男,湖北孝感人,硕士,高级工程师,2004 年于北京科技大学获得硕士学位,主要从事天文技术与方法方面的研究。E-mail: huangl@nao.cas.cn

通讯作者:



魏建彦(1965—),男,江苏溧水人,博士,研究员,博士生导师,1994 年于中国科学院北京天文台获得博士学位,从事天文和光学天文仪器方面的研究。E-mail: wjy@nao.cas.cn