

DOI: 10.12086/oee.2018.170586

## 结合亚像元实时灰度投影 算法的导行系统

宋智明<sup>1,2\*</sup>,柳光乾<sup>2</sup>,屈中权<sup>2</sup> <sup>1</sup>中国科学院大学,北京 100049; <sup>2</sup>中国科学院云南天文台,云南 昆明 650216



摘要:服务于现代天文望远镜的导行系统通常会受到大气和风载等干扰而引起导行信标重心位置计算不准确。为了有 效解决这种问题,本文提出将具备亚像元和实时性的灰度投影算法嵌套到导行系统的重心算法中,从而在几乎不失时 间分辨率的前提下减小一个导行闭环周期内的重心误差,达到提高导行系统性能的目的。首先,分析了高实时小偏差 的导行信标重心计算是实现高性能导行系统的重要前提,并指出灰度投影算法在其中所起的重要作用。其次,分析了 灰度投影算法能够与重心算法结合提高导行系统性能的原因,并针对传统灰度投影算法进行速度和分辨率的改进,以 实现使用亚像元实时灰度投影算法与重心算法结合提高导行系统性能的目的。最后,将所提出的结合亚像元实时灰度 投影算法的导行系统在 400 mm 口径望远镜上进行了测试,测试结果表明,本文所提出的方法能够在几乎不失时间分 辨率的前提下较好地抑制风载的干扰,从而达到了提高导行系统性能的目的。

中图分类号: TP391 文献标志码: A 引用格式: 宋智明,柳光乾,屈中权. 结合亚像元实时灰度投影算法的导行系统[J]. 光电工程,2018,45(8):170586

# The auto guiding system combined with sub-pixel real-time gray projection algorithm

Song Zhiming<sup>1,2\*</sup>, Liu Guangqian<sup>2</sup>, Qu Zhongquan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>2</sup>Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China

Abstract: Guiding systems serving modern astronomical telescopes are usually subjected to atmospheric and wind-borne disturbances that result in inaccurate calculation of the center of gravity of the guiding beacon. In order to solve this problem effectively, the sub-pixel real-time gray projection algorithm is nested into the algorithm of center of gravity of auto guiding system, which reduces the jitter of the center of gravity in a closed-loop cycle of auto guiding system without losing time resolution and achieves the goal of improving the performance of auto guiding system. First of all, in the paper, we analyze that to implement high performance auto guiding system, obtaining high real-time and small error guiding beacon's center of gravity is significant, and point out that gray projection algorithm plays an important role in the course of obtaining the guiding beacon's center of gravity. Furthermore, after analyzing the reason that classic gray projection algorithm is able to be combined with the center of gravity to increase the performance of auto guiding system, we modify the classic gray projection algorithm in the speed and accuracy so

收稿日期: 2017-10-31; 收到修改稿日期: 2018-04-03

基金项目:国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(11527804);国家自然科学基金青年科学基金项目(11703087)

作者简介:宋智明(1988-),男,博士研究生,助理工程师,主要从事天文仪器与方法的研究。E-mail:szm@ynao.ac.cn

as to combine the modified algorithm with the algorithm of center of gravity of auto guiding system and achieve the goal of improving the performance of auto guiding system. Finally, we test our auto guiding system with the algorithms mentioned above in a 400 mm aperture telescope, and conclude that our system can obviously decrease the random jitter caused by wind load at the cost of less decreasing temporal resolution, and achieve the goal of improving its performance.

**Keywords:** auto guiding system; the suppression of wind load; sub-pixel real-time gray projection algorithm **Citation:** Song Z M, Liu G Q, Qu Z Q. The auto guiding system combined with sub-pixel real-time gray projection algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(8): 170586

### 1 引 言

通常,使用天文望远镜对天文目标进行观测时, 需要天文望远镜保持对观测目标长时间和高精度的指 向和跟踪。特别地,在太阳高分辨率成像观测和高精 度光谱观测中,常常需要望远镜长时间跟踪精度达到 亚角秒量级<sup>[1]</sup>。尽管自适应光学系统是一种有效的解 决这一问题的方法,但目前大多数天文望远镜尚无法 使用自适应光学系统。因此,为了满足上述天文观测 要求,在现代高精度天文望远镜中常常配备导行系统。

通常情况下,导行系统是以导行信标的图像重心 偏移量检测和反馈来修正望远镜的长时间指向和跟踪 精度的<sup>[2-4]</sup>。然而,对于地面望远镜的导行系统而言, 导行信标在导行系统中所成的像会因为大气湍流(高 频抖动)和风载(低频抖动)等引入随机抖动,这无疑会 影响信标重心的准确计算,从而影响望远镜的长时间 指向和跟踪精度。

针对抑制高频的大气抖动对导行精度的影响,文献[5]给出了近地大气湍流和高层大气湍流对点源和面源导行信标的影响,并给出了降低重心检测误差的统计方法(一个导行闭环周期内,对重心进行 N 次测量求取算数平均值)。

相对于高频的大气抖动,风载是直接作用在导行 系统和望远镜主体上的,其会使主镜本身产生低频抖 动从而影响导行系统的重心计算精度。如果不考虑风 载对导行系统中重心计算的影响,而只在一个导行系 统闭环周期内直接采取N次重心测量求平均获得补偿 望远镜指向跟踪精度的偏移量,势必造成偏移量不准 确(只考虑大气对导行系统的影响而不考虑风载的干 扰),从而使得导行系统闭环后有较高的误差峰值<sup>[4]</sup>。 为了克服风载引起的低频随机抖动并提高望远镜抗风 性能,常用的方法是提高主镜的伺服系统增益<sup>[6]</sup>,或 者是在主光路中加入基于摆镜反馈控制的光学和机械 稳像方法来提高望远镜长时间指向和跟踪精度<sup>[1,7:9]</sup>。 也就是说,这些改正风载的方法中,导行系统并不直 接参与,这也使得直接使用导行系统抑制风载的方法 很少有文献提及和关注。但是,这些导行系统不直接 参与的改正风载的方法通常只适用于望远镜伺服控制 系统参数已知,且要求望远镜引导光学后端有足够空 间放置风载改正机构的通用型望远镜(如可以同时实 现多通道高分辨率成像观测和光谱观测的云南一米新 真空太阳望远镜 NVST)。

而对于一些口径相对小,且控制系统直接采用市场中的成熟产品(即其控制系统参数未知),同时要求主光路对称和使用尽量少的附加镜子的专用型望远镜而言(如正在研制的用以实现高时间分辨率高精度太阳偏振信号测量的光纤阵列太阳光学望远镜FASOT<sup>[10-11]</sup>),提高望远镜长时间指向和跟踪精度的方法只能借助导行系统,即要求导行系统除了要具备抑制大气高频抖动的能力外,还要具备较强风载抑制能力。因此,提高导行系统自身性能(同时具备抑制大气和风载的能力)是很有意义的。

对于提高导行系统抑制大气高频抖动的能力,关键是提高导行系统一个闭环周期内的信标重心计算次数<sup>[5]</sup>。而对于提高导行系统抑制风载低频抖动的能力,关键是减小风载作用时,导行闭环周期内计算得到的信标重心抖动偏差。即高实时小偏差的信标重心计算是提高导行系统自身性能的有效途径。

目前,在已经公开的文献中,还未找到专门介绍 同时提高导行系统抑制大气和风载的方法,特别是介 绍减小风载干扰下导行信标重心抖动偏差的方法(目 前导行系统大都只采用重心算法,且都只采取 N 次重 心计算求平均提高导行精度)。因此,本文提出利用电 子稳像中的灰度投影算法在算法方面与导行重心获取 算法类似的特点,在对传统灰度投影算法进行亚像元 和实时性改进后嵌套在导行系统信标重心计算中,使 得导行系统在获取当前帧的信标重心的同时,获得当 前帧与前一相邻参考帧的图像偏移量,并将该偏移量 补偿到本次重心坐标中,即实现相邻帧的重心偏移量 补偿。而这个相邻帧的重心补偿对于提高导行系统抗 风性能是有用的。因为导行系统是以启动导行功能时 获得的第一帧信标图像的重心坐标为参考坐标。之后, 每一个导行闭环周期内计算的所有重心坐标与第一帧 参考坐标比较,并将比较结果累加,然后在每一个导 行闭环周期内求取累加结果的算数平均值,以作为导 行闭环反馈量。而风载作用时,当前帧的重心坐标相 对于前一相邻帧的重心坐标会发生较大的偏移(非望 远镜真实跟踪误差引起的偏移),如果将本文的亚像元 实时灰度投影算法嵌套到导行系统中时,这个相邻帧 间的偏移量能够被实时补偿,将补偿后的重心坐标再 与启动导行功能时的第一帧重心参考坐标比较,从而 获得望远镜真实跟踪误差量,达到提高导行系统自身 性能的要求。

## 2 亚像元实时灰度投影算法适用于 改善导行系统性能的原因

图 1 展示了导行系统图像中的信标重心在受到风 载干扰时抖动的示意图。显然,由于风载的作用,当 前图像中的信标重心总会偏离前一相邻参考图像中的 信标重心。如果在每次计算当前图像中的信标重心时, 能把这个偏移量减去或者减小,那么将有利于提高一



图 1 导行系统重心偏移图像。(a) 参考帧图像及两帧重心; (b) 当前帧图像及其重心

Fig. 1 The deviation of center of gravity of the auto guiding system. (a) Reference image and the centers of gravity of reference image and current image; (b) Current image and its center of gravity 个导行闭环周期内的重心计算精度。但是,重心算法 在每次计算重心时是无法知道这个偏移量的。通常, 电子稳像算法具有计算图像相对偏移量的能力,因此, 若能找到一种有效的电子稳像算法,在导行系统计算 重心坐标的同时获得图像偏移量(即在不失时间分辨 率的情况下获得偏移量),并将偏移量减去,那么将能 有效地实现导行系统高实时小偏差的信标重心计算目 标,从而提高导行系统性能。

电子稳像算法经过多年发展已经出现了很多有效 的算法,如基于傅里叶变换求取相关函数的方法[12]、 块匹配法、特征点匹配法、位平面匹配法和灰度投影 法等,相比于其他电子稳像方法而言,灰度投影法在 保持较高检测精度的同时具有较小的计算量,因此是 实现实时稳像的最佳选择[13-14]。更重要的是,灰度投 影算法与重心算法在计算过程中有相似之处,因此能 把他们嵌套在一起计算,从而在不失时间分辨率情况 下获得当前帧重心坐标和前一相邻帧重心坐标偏移 量。另一方面,通过对传统灰度投影的改进,能够进 一步加快算法速度[12,14-17]和精度[18] ,从而使得重心偏移 量补偿精度达到亚像元级别。因此,本文在导行系统 重心坐标计算中融入灰度投影算法,并对传统灰度投 影算法进行亚像元和实时性的改进,以使得改进后的 算法能够有效的结合到导行系统中,从而提高导行系 统性能。

### 3 灰度投影算法及其与重心算法的 嵌套计算

基于灰度投影的电子稳像方法是利用连续灰度图 像序列灰度分布的变化规律,将二维灰度图像投影为 水平和垂直的一维向量,并对投影得到的水平和垂直 的一维向量做一次相关运算,即可准确地获得当前帧 和参考帧运动矢量的方法。其主要由三个步骤组成: 图像灰度投影、投影所得函数的相关计算、相关函数 的最小值搜索。接下来,本文分别对这几个步骤进行 简要介绍,并说明其在算法上和重心算法的相似之处 以及如何利用这种相似性在获得重心的同时获得重心 偏移量。

### 3.1 图像灰度投影

风载等引起的导行系统随机低频抖动反应在图像 上,主要表现为当前帧图像和前一相邻帧参考图像在 水平和垂直方向上的线性变换(几乎没有旋转变换), 其可以表示为

$$X_{\rm C} = X_{\rm R} + \Delta x \quad , \tag{1}$$

$$Y_{\rm C} = Y_{\rm R} + \Delta y \quad , \tag{2}$$

其中: $(X_{c},Y_{c})$ 和 $(X_{R},Y_{R})$ 分别为当前图像和参考图 像像素点坐标,而 $(\Delta x, \Delta y)$ 为低频随机抖动引起的图 像像素点坐标偏移量。这种偏移显然会引起图像重心 的偏移,如图 1(a)和图 1(b)为我们所设计的全日面光 电导行系统当前帧灰度图像和相邻参考帧的图像,它 们由于受到风载干扰而产生了图像偏移,图中日面上 的小红圈表示两幅图像的重心,为了显示重心偏移, 将图 1(b)的重心位置叠加到图 1(a)中。

灰度投影就是将参考的和当前的二维图像映射成 两个独立的一维向量。具体公式如下:

$$X(i) = \sum_{j=1}^{N} \frac{f(i,j)}{N} , \qquad (3)$$

$$Y(j) = \sum_{i=1}^{M} \frac{f(i,j)}{M} , \qquad (4)$$

其中: *i* =1,2,...,*M*; *j* =1,2,...,*N*; *f*(*i*,*j*)为 二维图像对应坐标的像素值,*X*(*i*)和*Y*(*j*)为第*i*行和 第*j*列的灰度投影,*M*和*N*为图像的维度。

利用上述投影公式,对图 1(a)和图 1(b)做灰度投影,得到图 2 所示的四个投影函数  $X_{c}(i)$ 和  $X_{R}(i)$ ,  $Y_{c}(j)$ 和  $Y_{R}(j)$ ,由图 2 可看到图 1 前后两帧导行图像存在相对偏移。



图 2 图 1 的灰度投影结果。(a) X<sub>C</sub>(*i*)和 X<sub>R</sub>(*i*) 的投影; (b) Y<sub>C</sub>(*i*)和 Y<sub>R</sub>(*i*)的投影

Fig. 2 The results of gray projection from Fig. 1. (a) The projections of  $X_{\rm C}(i)$  and  $X_{\rm R}(i)$ ; (b) The projections of  $Y_{\rm C}(i)$  and  $Y_{\rm R}(i)$ 

### 3.2 投影所得函数的相关计算

将  $X_{C}(i)$  和  $X_{R}(i)$  以及  $Y_{C}(j)$  和  $X_{R}(j)$  两两相关 即可得到导行系统图像水平和垂直方向的整数偏移 量。在本文中,采取的相关运算是最小均方误差(mean squared error, MSE)准则,其计算公式为

$$R_{X}(m_{\rm p}) = \sum_{i=1}^{M} \frac{[X_{\rm R}(i) - X_{\rm C}(i + m_{\rm p})]^{2}}{M} \quad , \qquad (5)$$

$$R_{Y}(m_{q}) = \sum_{j=1}^{N} \frac{[Y_{R}(j) - Y_{C}(j + m_{q})]^{2}}{N} , \qquad (6)$$

其中:  $R_X(m_p)$  和  $R_Y(m_q)$  分别表示水平和垂直方向的 相关函数,  $m_p$  和  $m_q$  表示导行系统图像随机抖动引起 的所有可能位移量的集合,也是当前帧和相邻参考帧 位移矢量在相关函数中的搜索宽度,而搜索范围通常 设定为  $2m_p+1$  和  $2m_q+1$ 。

### 3.3 相关函数的最小值搜索

在搜索范围  $2m_p+1$  和  $2m_q+1$  内寻找  $R_x(m_p)$  和  $R_y(m_q)$  的最小值,其最小值对应的坐标,即图像的整 数像元偏移量。图 3(a)和图 3(b)为图 1 通过相关运算 得到的相关函数曲线,从图中可以看到,曲线具有单 峰特性,且在搜索宽度为7,搜索范围为15 的情况下,可以获得导行系统的图像水平偏移为6个整数像元, 垂直偏移为3个整数像元。





Fig. 3 Correlation function curves of horizontal and vertical direction. (a) The curve of  $R_X(m_p)$ ; (b) The curve of  $R_Y(m_q)$ 

3.4 图像重心算法以及灰度投影算法的嵌套

计算图像重心的方法有很多种,一阶矩的方法与 灰度投影算法有相似性,其公式如下:

$$x_{g} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} if(i, j)}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} f(i, j)} , \qquad (7)$$

$$y_{g} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} jf(i,j)}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} f(i,j)}$$
(8)

f(i, j)的取值条件为

$$\begin{cases} f(i, j) = 255, & \text{if } f(i, j) > T \\ f(i, j) = 0, & \text{if } f(i, j) \le T \end{cases}$$

其中: *f*(*i*, *j*)为二维图像对应坐标的像素值, *T*为抑制背景噪声选取的阈值, *M*和 *N*为图像的维度。

从式(7)和式(8)中可以看到,重心坐标的计算需要 一个访问所有图像数据的两重循环,而灰度投影值计 算式(3)和式(4)同样需要访问所有图像数据,同时灰度 投影的相关式(5)和式(6)需要同时获得相邻参考帧和 当前帧的灰度投影值。因此可以将它们都嵌套在重心 计算的两重循环中,从而可以用几乎相同的时间获得 重心坐标和灰度投影的相关函数。为了说明这个嵌套 过程,以示例代码的形式给出整个嵌套过程(图 4 所 示)。从图中可以看到这种嵌套可在计算式(7)和式(8) 的同时,计算相关函数式(5)和式(6)的中间变量的上三 角形。而下三角形可以在计算完重心二重循环后获得, 同时可获得式(5)和式(6)的相关函数 R<sub>x</sub>(m<sub>p</sub>)和  $R_{y}(m_{a})$ 。这可避免计算重心后再计算投影函数式(3) 和式(4),同时节省了计算 $R_{x}(m_{n})$ 和 $R_{y}(m_{a})$ 过程中反 复循环移位操作的时间,显著加快速度,达到几乎同 时获得重心和相关函数值的目的。其中,需要说明的 是 :auto\_guiding\_cycle\_num=0 在伪代码中表示获取相 邻参考帧, auto\_guiding\_cycle\_num≠0 表示获取当前 帧,其值在0与非0直接切换。

# 4 传统灰度投影算法的亚像元和实时性的改进

上述嵌套后,可以快速得到相邻帧的灰度投影算 法的相关函数,然后还需要对相关函数最小值搜索才 能得到图像抖动量。但是传统灰度投影算法存在两个 问题:其一是,相关函数 $R_{\chi}(m_{p})$ 和 $R_{\gamma}(m_{q})$ 的最小值 搜索总共需要迭代次数为 $2m_{p}+2m_{q}+2$ ,实时性差。





Fig. 4 The pseudo code embedded in the algorithm of center of gravity and gray projection algorithm

其二是,相关函数最小值搜索结果为整数像元的偏移 量,而帧间重心偏移量的补偿需要亚像元,以满足望 远镜亚角秒的跟踪精度。因此,针对传统算法的这两 个问题,进行灰度投影算法的改进。目前针对第一个 问题,一些快速灰度投影相关函数最小值搜索方法被 提出<sup>[15-17]</sup>。对于第二个问题,有学者提出对相关函数 进行 K 细分插值来实现亚像素偏移检测<sup>[18]</sup>。但是这些 方法都存在一定的问题,本文针对这些问题,对灰度 投影算法的相关函数最小值搜索的实时性和像元分辨 率进行改进,从而使算法嵌套到导行系统重心算法后, 在获得重心的同时获得重心偏的亚像元偏移量。

### 4.1 灰度投影算法的实时性改进

通常,搜索图3所示灰度投影相关函数最小值, 需要对搜索范围全局搜索。但是,一些快速搜索算法 通常被引入到实时性较高的应用中<sup>[15-17]</sup>。这些算法主 要分为类折半搜索算法<sup>[15]</sup>、从两边到中间的三点搜索 算法<sup>[16]</sup>和从中间到两边的三点搜索算法<sup>[17]</sup>。尽管这些 算法能够加快相关函数最小值的搜索速度,但是它们 依然存在问题,类折半算法在速度和精度上都存在问 题,从两边到中间的三点搜索算法没有考虑相关函数 最小值靠近搜索范围边界时的搜索速度问题,且精度 也存在问题,而从中间到两边的三点搜索算法虽然精 度高,但其没有考虑相关函数最小值位于搜索范围边 界附近时可以减少搜索时间的问题。所以,对精度和 速度都较高的从中间到两边的三点搜索算法进一步改 进,加入相关函数边界检测,在不失精度基础上进一 步加快该算法对某些形状相关函数的搜索速度。

通常,不同口径和机架类型的望远镜在风载作用 时引起导行系统图像偏移量是不同的,文献[7]测量了 12 m/s 风速作用在一米望远镜上引起的导行系统图像 偏移量,该偏移量大概等效于±5 pixels,即搜索相关 函数最小值时的搜索宽度可设置为 *m*=5,而本文为了 适应大多数望远镜的导行系统,特别是前面提到的系 统参数未知,且结构特殊的口径相对小的望远镜导行 系统(抗风能力较弱),选取一个相对较大的搜索宽度 *m*=23 pixels,搜索范围为 *n*=2*m*+1=47 pixels。所以, 本文改进的算法如下:

初始条件:

初始搜索宽度为 *m*=23, 左边界坐标 *L*=1, 右边界 *R*=47, 有效搜索范围 *R*-*L*+1=*n*, 即 *n*=2*m*+1。

搜索步骤:

Step1:在有效搜索范围内(2m+1=n),均匀取 3 个点(a,b,c),同时取出左右边界L和R。计算a、b、 c、L和R的相关函数C(a)、C(b)、C(c)、C(L)和C(R), 判断C(a)、C(b)、C(c)最小值,如果最小值为C(a)进 入Step2,如果最小值为C(c),进入Step4,如果最小 值为C(b),进入Step3;

Step2:判断 C(a)是否小于 C(L),如果是,则进入 Step3。如果 C(L)小于 C(a)进入 Step6;

**Step3**:以最小相关函数值 *C* 对应的坐标为中心, 搜索宽度为(*m*-1)/2 取整,均匀选取 3 个点,*g*,*h*,*i*, 计算 *C*(*g*)、*C*(*h*)、*C*(*i*),并求三者最小值,并修改搜索 宽度为 *m*=(*m*-1)/2。如果修改后的搜索宽度 *m*>2,则 返回 Step3。如果 *m*=2,则以最小相关函数值 *C* 对应 的坐标为中心,选取其左右一个搜索宽度的相关函数, 计算 相关函数最小值对应的下标即为搜索目标 s\_index,退出搜索算法;

 Step4:判断 C(c)是否小于 C(R),如果是,则进入

 Step5。如果 C(R)小于 C(c)进入 Step7;

**Step5**:以最小相关函数值 C 对应的坐标为中心, 搜索宽度为(*m*-1)/2 取整,均匀选取 3 个点,*g*,*h*,*i*, 计算 C(g)、C(h)、C(i),并求三者最小值,并修改搜索 宽度为 m=(m-1)/2。如果修改后的搜索宽度 m>2,则 返回 Step5。如果 m=2,则以最小相关函数值 C 对应 的坐标为中心,选取其左右一个搜索宽度的相关函数, 计算 相关函数最小值对应的下标即为搜索目标 s\_index,退出搜索算法;

**Step6**:以 *a*-1=*n* 为搜索范围, *m*=(*n*-1)/2 为搜索 宽度,如果 *n* 大于等于 2,则返回 Step1,否则,剩余 的 *n*=2 项中对应最小值的坐标为搜索目标 s\_index,退 出搜索算法;

**Step7**:以 *R*-*C*=*n* 为搜索范围, *m*=(*n*-1)/2 为搜索 度,如果 *n* 大于等于 2,则返回 Step1,否则,剩余的 *n*=2 项中对应最小值的坐标为搜索目标 s\_index,退出 搜索算法。

表1 搜索算法比较

Table 1	The comparison among	searching algorithms
	ine companeon among	, could in g algoriante

算法	搜索准确度	搜索迭代次数
全局搜索算法	高	n
类折半搜索算法 <sup>[13]</sup>	高	[log2 <sup>n</sup> ]
两边向中间的三点 搜索算法 <sup>[14]</sup>	低	[2 <sup>log2((n-3)/2)</sup> -2]
中间向两边的三点 搜索算法 <sup>[15]</sup>	高	[2 <sup>log2((n-3)/2)</sup> -2]
本文搜索算法	高	[2 <sup>log2((n-7)/2)</sup> -3]

说明:n为搜索范围,[]表示取整符号

为了说明改进快速搜索算法的优点,将前面提到 的几种搜索算法和本文改进算法在搜索准确度和搜索 过程中所需要的迭代次数做了比较,并将比较结果列 于表1(以相关函数最小值位于最右边附近的特殊搜索 情况为例)。从表1中可以明显地看到,本文的算法在 检测准确度和速度上具有优势。

为了更直观的展现该优势,图 5 给出利用全局搜 索算法、中间向两边的三点搜索算法以及本文算法对 类似图 3 的导行图像进行相关函数搜索的过程(选取 相关函数最小值靠近搜索范围右边界的例子,并设置 搜索宽度为 23,搜索范围为 47)。从图 5(a)中可以看 到,全局搜索算法需要对搜索宽度内所有点进行搜索, 而图 5(b)的中间向两边的三点搜索算法每次选取三个 点,并根据这三个点的大小确定下一次搜索方向,直 到搜索宽度为 1 为止,其需 5 次迭代完成搜索过程。 对于本文算法的搜索过程,从图 5(c)可以看到,2 次 迭代即可准确完成搜索。 显然,本文搜索算法在图像偏移量靠近搜索范围 边界时,可以进一步减少灰度投影算法获取图像偏移 量的时间,因此使用该搜索算法获取灰度投影相关函 数最小值对应的坐标,可以加快灰度投影算法的图像 偏移量检测速度,在获取导行系统信标图像重心坐标 的同时,能够快速高精度获取重心偏移量,从而提高 导行系统性能。



图5 相关函数搜索算法搜索示意图。(a) 全局搜索算法的搜索过程;(b) 中间向两边的三点搜索算法的搜索过程;(c) 本文算法的搜索过程

Fig. 5 The schematic diagrams of the searching algorithm of correlation function. (a) The global searching algorithm; (b) The three point searching algorithm from center to both sides; (c) Algorithm in this paper

### 4.2 灰度投影的分辨率改进

灰度投影相关函数最小值的快速搜索能加速灰度 投影算法获取整数像元偏移的速度,但是为了快速地 获得亚像元的偏移,还需进一步对算法进行改进。文 献[18]采用对灰度投影算法的投影函数(如本文的式(3) 和式(4))进行 K 细分线性插值的方法实现亚像元偏移 检测。但是这种方法在每次获得图像的投影函数后都 要插值,插值后导致数据点变多,相关函数的计算和 搜索时间将会随之增大,而且插值过程也会消耗相应 的时间,不利于在具有较高实时性要求的场合使用。 特别地,插值后数据维度变化,无法与本文提出的重 心算法嵌套。所以本文提出较高实时性的亚像素检测。

从图 3 可以看到, 灰度投影相关函数的曲线为一 个开口向上且具有单峰特性的二次曲线。所以, 如果 能获得该二次曲线的方程( $y = ax^2 + bx + c$  ( $a \neq 0$ )), 然后利用二次函数最小值的坐标为 x = -b/2a 的性 质,即可得到亚像元的偏移量,该偏移量为

$$\Delta x = x_{\min} + \mathrm{d}x \quad , \tag{9}$$

$$\Delta y = y_{\min} + \mathrm{d}x \quad , \tag{10}$$

其中:  $x_{min}$ 和  $y_{min}$ 为整数像元偏移量,其为图 3 所示 函数最小值对应坐标, dx和 dy为小数像元偏移。因 此,本文以灰度投影相关函数最小值对应的坐标为中 心,选取其左右领域共 5 个像素(p[-2],p[-1],p[0], p[1],p[2]),利用最小二乘方法拟合一条二次曲线, 得到拟合后的曲线方程为  $y = \hat{a}x^2 + \hat{b}x + \hat{c}$  ( $\hat{a} \neq 0$ ),则 该二次曲线最小值坐标即为亚像元偏移量中的小数像 元偏坐标:

$$\Delta x = 0 + dx = -\frac{b}{2\hat{a}}$$
  
=  $0.7 \frac{2(p[-2] - p[2]) + (p[-1] - p[1])}{2[p[-2] + p[2] - (p[-1] + 2p[0] + p[1])]}$ , (11)

其中 0 是因为选取以最小值为中心的 5 pixels,最小值 像素的整数坐标即为 0。上式同样适于在 y 方向上的 投影。

获得 dx 后,将其加上前面所述灰度投影相关函数 快速搜索算法得到的相关函数最小值对应的坐标  $x_{min}$ ,即可得到亚像元偏移。该方法只需在搜索到 $y_{min}$ 后,选取其邻域 5 pixels,代入式(11)后将结果与 $x_{min}$ 相 加即可得到亚像元偏移。

为了说明本文方法相比文献[18]介绍的 K 细分方 法在速度和精度上的优势,首先使用与文献[18]相同 的 4 细分线性插值灰度投影算法对本文的导行图像进 行处理(采用一帧类似图 1 的导行图像作为参考图像, 其为 2048 pixels×2048 pixels 的灰度图像,然后使用傅 里叶平移变换性质对参考图像进行亚像元偏移,从而 获得相应的非参考图像,再用 4 细分线性插值灰度投 影算法计算参考图像和非参考图像的偏移量)。处理结 果显示,4 细分插值方法的处理时间为 180 ms 左右(采 用 Intel(R) Core(TM) i7-4790@ 3.6 GHz 的处理器),而 像元分辨率与理论的 0.25 pixels 基本吻合。然后使用 本文方法对同一组数据进行亚像元偏移量的检测,结 果显示,本文方法可以实现 0.02 pixels 的检测精度, 而检测时间只需要 60 ms 左右 (以当前所设计的导行 系统的像元比例尺为 2.3"/pixels,那么该亚像元检测能 实现 0.046"偏移量的检测)。

### 5 算法性能测试

为了验证本文所提出的结合亚像元实时灰度投影 算法的导行系统在性能上的优势,将该导行系统安装 在一个 400 mm 口径的望远镜上进行性能测试。测试 实物如图 6 所示。



图 6 用于算法测试的导行系统 Fig. 6 The auto guiding system used by our algorithm

首先测试比较了一定风载作用下(如图 7(a))没有 结合亚像元实时灰度投影算法、结合本文提出的亚像 元实时灰度投影算法和结合传统的灰度投影算法时 (只将传统灰度投影算法嵌套到重心算法中,而不做任 何亚像元和实时性的改进),导行系统实时图像在 *x* 和 *y* 两个方向相对于导行系统启动时获得的第一帧图像 的重心偏移量(如图 7(b)和图 7(c)所示),同时计算了这 些重心偏移量的均方根值(root mean square, RMS)值 以及三种情况下的导行系统的帧频(如表 2 所示)。从 图 7(b)和图 7(c)的蓝色点划线以及表 2 可以看到,在 一定风载作用下,没有结合亚像元实时灰度投影算法 的导行系统重心偏移量的最大值、RMS 值都比较大, 即重心坐标误差较大,此时导行系统的帧频为 10.67 f/s(本文导行系统采用像元数为 2048 pixels×2048 pixels 的大阵面 SCMOS 相机);结合了传统灰度投影算法的 导行系统(红色点划线)重心偏移量的最大值、RMS 值 相对于没有结合灰度投影的情况下有明显减小,即重 心坐标误差较小,有抑制风载的能力,但是此时导行 系统帧频降低为 7.32 f/s。而结合了本文的亚像元实时



图 7 随机风载作用下导行系统重心抖动对比测试。 (a) 测试时的随机风载测量值; (b) 风载下重心坐标在 X方向上的相对抖动; (c) 风载下重心坐标在 Y方向上 的相对抖动

Fig. 7 The auto guiding system's jitter of the center of gravity in the random wind load. (a) The measured values of wind load in our experiment; (b) The relative jitter of the center of gravity in the *x* direction; (c) The relative jitter of the center of gravity in the *y* direction

Table 2	Table 2         The comparison among jitters of the center of gravity accused by random wind load					
方向	]	没有结合	结合本文的	结合传统的		
x	均方根 RMS/(")	2.46	0.61	0.61		
	峰值 PV/(")	11.30	1.48	1.65		
	帧频/(f⋅s⁻¹)	10.67	8.67	7.32		
Y	均方根 RMS/(")	3.01	0.48	0.41		
	峰值 PV/(")	11.38	1.52	1.68		
	帧频/(f·s <sup>-1</sup> )	10.67	8.67	7.32		

表2 随机风载作用下重心抖动对比测试

灰度投影算法的导行系统(绿色点划线)重心偏移量的 最大值、RMS 值与结合传统的灰度投影算法大致相 同,因为本文的算法和传统算法在精度上是亚像元的 差别,因此它们的区别不会太大,但结合本文算法的 准确性会更高,而此时结合本文算法的导行系统帧频 为 8.67 f/s,比结合传统灰度投影算法高。其中,帧频 的高低决定了一个导行闭环周期可以采用多少帧图像 求取算数平均,体现的是抑制大气高频抖动的能力5, 而重心偏移体现的是抑制风载引起的随机抖动的能 力。根据文献[5]的理论和表 2 所得结果,可以计算出 没有结合灰度投影算法、结合传统灰度投影算法和结 合本文的亚像元实时灰度投影算法时,大气视宁度引 起的导行视位置误差在一个导行闭环周期后的结果分 别为 $0.704/\sqrt{11}$ 、 $0.704/\sqrt{7}$ 和 $0.704/\sqrt{9}$ (没有结合灰 度投影算法时,帧频为10.67 f/s≈11 f/s。结合传统灰度 投影算法时,帧频为7.32 f/s≈7 f/s。结合本文的亚像元 实时灰度投影算法时,帧频为 8.67 f/s≈9 f/s。另外,本 文采用的导行系统的导行望远镜口径为 80 mm, 而导 行闭环周期为 1 s)。这也就是说,本文结合了亚像元 实时灰度投影算法的导行系统抑制大气干扰的能力较 结合传统灰度投影的方法强,但是不如不结合灰度投 影的方法。但是对风载抑制的能力而言,本文结合了 亚像元实时灰度投影算法的导行系统和结合传统灰度 投影算法的导行系统都比不结合灰度投影算法的导行 系统强。综合而言,本文结合了亚像元实时灰度投影 算法的导行系统性能是最好的。

### 6 结 论

导行系统是提高现代天文望远镜长期跟踪和指向 精度的有效手段,而大气视宁度和随机风载是影响导 行系统性能的主要障碍,为了克服这些障碍,达到提 高导行系统自身性能的要求,高实时小偏差的导行信 标重心计算是一种有效的手段。本文利用电子稳像中 的灰度投影算法在计算公式上与导行信标重心算法相 似的特点,在对传统灰度投影算法进行亚像元和实时 性改进后,将两者嵌套计算,从而达到在几乎不失时 间分辨率的情况下获得风载干扰下的导行信标重心坐 标和相邻帧间的重心坐标偏移量,并用偏移量对重心 坐标进行补偿,使得导行系统整体性能显著提高。因 此,本文的方法是提高导行系统自身性能的一种有效 手段,同时也能提高使用这种导行系统的望远镜的长 时间指向和跟踪性能。

### 参考文献

- Mandrini C H, Schmieder B, Démoulin P, et al. Topological analysis of emerging bipole clusters producing violent solar events[J]. Solar Physics, 2014, 289(6): 2041–2071.
- [2] Deng L H. Study on the auto guide unit system of one-meter infrared solar telescope in yunnan observatory[D]. Kunming: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2009. 邓林华. 一米红外太阳望远镜光电导行系统的研究[D]. 昆明: 中 国科学院研究生院云南天文台, 2009.
- [3] Guo J J, Yang Y F, Feng S, et al. High precision guide method for the solar telescope[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 61(10): 1112-1120.
   郭晶晶,杨云飞,冯松,等.太阳望远镜高精度导行方法[J]. 科 学通报, 2016, 61(10): 1112-1120.
- [4] Liu G Q. Research and realization on control system of one meter infrared solar teleseope[D]. Kunming: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2011. 柳光乾. 一米红外太阳望远镜控制系统研制[D]. 昆明: 中国科学 院研究生院云南天文台, 2011.
- [5] Liu G Q, Yang L, Deng L H, et al. Influence of atmospheric turbulence on the accuracy of astronomical telescope auto-guiding system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 7–11. 柳光乾,杨磊,邓林华,等. 大气湍流对天文望远镜光电导行精 度的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 7–11.
- [6] Liu G Q, Cheng X M, Song T F, et al. The influence and control of wind loading on the one meter solar telescope servosystem[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(6): 50-58. 柳光乾,程向明,宋腾飞,等. 一米太阳望远镜风载对伺服系统 的影响及控制[J]. 光电工程, 2011, 38(6): 50-58.
- [7] Li Y Y, Liu G Q. The study on the application of the stabilized

control system for the tip-tilt mirror image in NVST[J]. Astronomical Research & Technology, 2016, **13**(1): 82–92. 李玉艳,柳光乾. 摆镜图像稳定控制系统在 NVST 中的应用研究 [J]. 天文研究与技术, 2016, **13**(1): 82–92.

- [8] Close L M, McCarthy D W. High resolution imaging with a tip-tilt Cassegrain secondary[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1994, **106**(695): 77–86.
- [9] Didkovsky L V, Dolgushyn A, Marquette W, et al. High-order adaptive optical system for big bear solar observatory[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4853: 630–639.
- [10] Dun G T, Qu Z Q. Design of the polarimeter for the fibre arrayed solar optical telescope[J]. Acta Astronomica Sinica, 2012, 53(4): 342–352.

敦广涛, 屈中权. 光纤阵列太阳光学望远镜偏振分析器设计[J]. 天文学报, 2012, **53**(4): 342-352.

- [11] Qu Z Q. A fiber arrayed solar optical telescope (FA-SOT)[C]//Proceedings of 6th Solar Polarization Workshop, 2011, 437: 423.
- [12] Li C S, Jiang A M. The realization of sst's correlation calculation based on FPGA[J]. Journal of Astronautics, 2008, 28(4): 1350–1357.
   李长松, 姜爱民. 空间太阳望远镜相关计算的 FPGA 实现技术[J].

字 大松, 安发氏. 至间入阳至远镜相大计并的 FPGA 实现技术[J] 宇航学报, 2008, **29**(4): 1350–1357.

[13] Wang X Y. The research of real-time electronic image stabilization algorithm based on gray projection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

汪小勇. 基于灰度投影的实时电子稳像算法研究[D]. 杭州: 浙江 大学, 2006.

- [14] Zhang Y C, Wang F, Zhao J, et al. Fast digital image stabilization based on characteristic peak of projection matching[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(6): 1768–1773. 张艳超, 王芳, 赵建, 等. 投影特征峰匹配的快速电子稳像[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6): 1768–1773.
- [15] Sun H. Fast gray projection algorithm and its application to electronic image stabilization[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3): 412–416. 孙辉. 快速灰度投影算法及其在电子稳像中的应用[J]. 光学精密 工程, 2007, 15(3): 412–416.
- [16] Zhang Y X, Zhao X X, Zhang W G, et al. An improved electronic image stabilization algorithm based on gray projection algorithm[J]. *Microelectronics & Computer*, 2008, **25**(11): 212–215. 张永祥,赵晓旭,张伟功,等. 一种基于灰度投影的电子稳像改 进算法[J]. 微电子学与计算机, 2008, **25**(11): 212–215.
- [17] Li B, Wang X T, Yang C Q, et al. Three-point locally adaptive searching in gray scale projection algorithm for electronic image stabilization[J]. Opto-electronic Engineering, 2004, 31(9): 69–72.

李博, 王孝通, 杨常青, 等. 电子稳像的灰度投影三点局域自适 应搜索算法[J]. 光电工程, 2004, **31**(9): 69-72.

[18] Sun H, Zhang Y X, Xiong J W, et al. The application of high resolution gray projection algorithm in electronic image stabilization technology[J]. Optical Technique, 2006, 32(3): 378–380. 孙辉, 张永祥, 熊经武, 等. 高分辨率灰度投影算法及其在电子 稳像中的应用[J]. 光学技术, 2006, 32(3): 378–380.

# The auto guiding system combined with sub-pixel real-time gray projection algorithm

Song Zhiming<sup>1,2\*</sup>, Liu Guangqian<sup>2</sup>, Qu Zhongquan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>2</sup>Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China



Auto guiding software controlling system

Overview: Guiding systems serving modern astronomical telescopes are usually subjected to atmospheric and wind-borne disturbances that result in inaccurate calculation of the center of gravity of the guiding beacon. In order to solve this problem effectively, the sub-pixel real-time gray projection algorithm is nested into the algorithm of center of gravity of auto guiding system, which reduces the jitter of the center of gravity in a closed-loop cycle of auto guiding system without losing time resolution and achieves the goal of improving the performance of auto guiding system. First of all, in the paper, we indicate that the atmospheric turbulence and wind are two things that have a bad influence on the performance of auto guiding system, and then describe some existing methods used to suppress the two things. Afterwards, we have a knowledge about that to suppress the influence of the atmospheric turbulence, in a closed-loop cycle of auto guiding system, the time of calculating guiding beacon's center of gravity is significant, and to suppress the influence of wind, reducing the error of guiding beacon's center of gravity is indispensable. Therefore, we propose an efficient method that takes advantages of gray projection algorithm to calculate the displacement vector between adjacent images of auto guiding system in the time when the guiding beacon's center of gravity is computed, and then compensates the displacement vector for the center of gravity so that the influences from atmospheric turbulence and wind are suppressed, simultaneously. On the other hand, we are aware of that the performance of our method mentioned above can be further improved through rectifying three aspects of our method in algorithm. One is that making use of the structural similarity between gray projection algorithm and the algorithm of guiding beacon's center of gravity, some combinations between the two algorithms can be conducted to speed up their execution. Two is that through comparing with existing searching algorithms of minimum value of correlation function, which are an important part of gray projection algorithm, an efficient searching algorithm named as three point searching is further improved in order to obtain a promotion of computational speed of gray projection algorithm. Three is that based on the characteristic of correlation function of gray projection algorithm, an efficient fitting method in possession of a sub-pixel accuracy is applied to the correlation function so that the gray projection algorithm can obtain a sub-pixel accuracy. Finally, some experiments are conducted, and corresponding results show that our method can efficiently improve the performance of auto guiding system.

Citation: Song Z M, Liu G Q, Qu Z Q. The auto guiding system combined with sub-pixel real-time gray projection algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(8): 170586

Supported by National Natural Science Foundation of China, National Major Scientific Research Instrument Development Project (11527804), and National Natural Science Foundation of China, Youth Science Fund Project (11703087) \*E-mail: szm@ynao.ac.cn