

天文仪器中图像跟踪定位算法的比较研究*

王 丽 丽^{1,2,3†} 胡 中 文^{1,2} 季 杭 馨^{1,2,3}

(1 中国科学院南京天文光学技术研究所 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室 南京 210042)

(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 天文光学观测中采用快速图像跟踪定位可以降低大气视宁度和望远镜跟踪误差的影响, 提高观测效率. 针对天文仪器观测的需要选择了两类共 5 种算法, 通过数值实验和实验室实测对这两类算法在不同噪声背景下的精度和稳定性进行了比较研究, 数值实验和实验室测试的结果表明归一化互相关法和重心法既有较高的精度, 又有较好的抗干扰可靠性, 将分别被应用于 2.16 m 望远镜的高色散光谱仪前置系统和 SONG (Stellar Observations Network Group) 项目的科学仪器.

关键词 望远镜, 技术: 图像处理, 方法: 数值, 方法: 实验室

中图分类号: P 111; **文献标识码:** A

1 引言

现代天文望远镜的科学仪器中, 通过增加图像跟踪定位系统, 可以降低大气视宁度的影响和抑制望远镜跟踪的误差¹, 从而有效提高系统的通光量和科学数据的质量. 这类跟踪 / 改正系统通过计算图像的偏移来修正偏差, 跟踪精度要求高, 改正速度要求快. 针对这些实际需求, 本文利用两类共 5 种算法对其进行了分析比较: 一类是借助图像匹配直接得到图像之间的位移, 选用了互相关算法^[1]; 另一类则是通过光斑图像中心检测结果的差值间接得到位移, 定位光斑中心的算法选择了重心法^[2]、Hough 变换法^[3]、曲面拟合法^[4]以及圆拟合法^[5]等. 然而, 每种算法都有其优点和缺点, 在进行具体应用时, 适当地选择算法是非常重要的, 它直接影响了系统的测量精度和可靠性. 为了对这几种算法的精度及稳定性进行分析并选择合适的算法, 本文作者首先在人工光斑中加入不同水平的随机噪声, 对这些算法的检测结果进行了理论分析; 其次利用 JDW3-250 氦氖激光器、高速相机和一维高精度电动平移台构建测试系统, 用采集到的激光光斑代替天文光学仪器观测中的星象图, 对理论分析结果进行了验证. 本文算法已经应用于实验室光学测试, 并将被集成到相关天文望远镜的科学仪器的控制软件中.

2012-02-15 收到原稿, 2012-04-18 收到修改稿

* 国家自然科学基金项目 (10873023) 资助

† llwang@niaot.ac.cn

¹ Anton Norup Sørensen. SONG General Optical Layout and Functions, 2010 (内部资料)

2 在天文观测仪器中的应用

国家天文台兴隆观测站 2.16 m 望远镜高色散光谱仪拟配备一套 TIP/TILT 大气视宁度改正系统, SONG 项目望远镜的折轴焦点将配置 2 组 TIP/TILT 闭环改正系统^[1], Nasmyth 焦点将配置一套焦点跟踪系统. 在 SONG 望远镜折轴焦点的科学仪器中包括 2 组 TIP/TILT 改正镜, 其利用两组高速相机分别采集科学目标的星像和光学系统光瞳像(望远镜和折轴光学系统的出瞳像, 对应望远镜主镜在仪器端前方的成像), 通过两组高速相机的反馈信号分别控制对应的 TIP/TILT 机构, 实现同时校正光瞳偏移和图像漂移, 从而部分修正大气视宁度较差条件和望远镜跟踪误差的影响, 以增加光谱仪狭缝中的光通量. 仪器中的图像跟踪定位系统包括图像实时高速采集, 图像跟踪定位偏移量计算, 偏移量和控制量校准及实时控制算法等.

鉴于 TIP/TILT 改正系统的性能主要取决于图像处理系统的性能, 本文将侧重介绍图像跟踪定位偏移量算法的选择.

3 几种常用的图像跟踪定位算法

图像跟踪定位实际上就是利用图像之间的偏移量对系统进行反馈调节, 因此对图像位移检测算法的精度和稳定性要求比较高, 本文对归一化互相关法、重心法、Hough 变换法、高斯拟合法及圆拟合法进行了分析研究. 在这几种算法中, 归一化互相关法可以直接得到图像之间的位移, 而其余 4 种方法则需通过光斑图像中心检测结果的差值间接得到位移.

3.1 归一化互相关法

归一化互相关法就是利用数字图像处理技术, 通过检测物体位移前后两幅图像之间的相关性来进行位移测量的方法^[1]. 假设 $f(i, j)$ 为参考图像的图像场, $g(i+u, j+v)$ 为将待检测图像移动了 (u, v) 之后的图像场, (i, j) 为观察平面坐标系, $M \times N$ 为图像尺寸, 则归一化互相关函数为

$$R(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)g(i+u, j+v)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j)]^2 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i+u, j+v)]^2}}. \quad (1)$$

利用 (1) 式计算出两幅图像之间的互相关系数, 这些相关系数包含了其位移信息, 通过合适的算法就能找出相关函数的最大值并算出相关峰的位置 (u, v) , 也即两幅图像之间的位移.

3.2 重心法

重心法可以看作是以灰度为权值的加权型方法, 该算法首先将图像处理为具有 256 级的灰度图像, 然后求出光斑中心, 待检测图像与参考图像光斑中心的差值即为两幅图

像之间的位移, 该算法简单明了, 计算速度快. 假设 $I(i, j)$ 代表位于灰度图中第 i 行第 j 列的像素点的灰度值, 则光斑中心计算公式为^[2]

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N iI(x, y)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(x, y)}, \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N jI(x, y)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(x, y)}. \quad (2)$$

3.3 Hough 变换法

Hough 变换是图像空间和参数空间之间的一种变换^[3]. 采用 Hough 变换检测圆的原理如下: 假设圆的参数方程为 $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, 式中 (x, y) 为图像中的光斑轮廓点, (x_0, y_0) 为光斑中心位置, r 为光斑半径. 利用 Hough 变换检测圆时, 需要预先估计出 x_0 、 y_0 的可能取值范围并对参数空间 (x_0, y_0) 离散化, 进而将图像空间中的每一个轮廓点代入参数方程, 根据计算结果在 3 维空间 (x_0, y_0, r) 内按就近原则逐点进行投票、记录, 得票最多者即为检测结果. 该算法需对参数空间离散化, 限制了测量精度, 参数空间得票最多的点极有可能不唯一, 选择不同的点得到的光斑中心位置差异比较大.

3.4 高斯拟合法

高斯拟合法就是利用高斯曲面拟合光斑分布, 用高斯拟合函数的极值点作为其中心位置^[4]. 光斑的二维高斯分布可表示为

$$I(x, y) = H \exp \left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right]. \quad (3)$$

(3) 式中, H 为高斯分布的幅值, σ_x 、 σ_y 为两个方向的标准差. 对上式两边取对数, 展开平方项将其整理并简化为多项式的形式, 则有

$$z = p_4 + p_3y + p_2x + p_1y^2 + p_0x^2. \quad (4)$$

(4) 式中, p_0 、 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 及 z 为与 (3) 式展开项对应的多项式系数, 将图像中的所有光斑点 (灰度值不为 0 的点) 代入 (4) 式, 利用最小二乘原理即可求得多项式各系数, 进而根据两式对应关系可得光斑中心位置 $x_0 = -p_2/2p_0$, $y_0 = -p_3/2p_1$.

3.5 圆拟合法

基于圆拟合的光斑中心定位算法是根据最小二乘原理用圆来逼近光斑轮廓, 进而得到光斑中心位置的算法^[5]. 假设 E 为光斑轮廓点的集合, 则光斑中心坐标 (x_0, y_0) 可由下式得到:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(\overline{x^2x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2y} + \overline{y^2y} - \overline{x^2y} - \overline{y^3})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \\ y_0 = \frac{(\overline{x^2y} + \overline{y^2y} - \overline{x^2y} - \overline{y^3})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \end{cases}. \quad (5)$$

(5) 式中, $\overline{x^m y^k} = \sum_{i \in E} x_i^m y_i^k / \sum_{i \in E} 1$, ($m = 0, 1, 2, 3$; $k = 0, 1, 2, 3$), (x_i, y_i) 为光斑轮廓点的坐标, 其中 $i \in E$. 圆拟合法的优点是运算速度较快, 精度也比较高, 但容易受二值化阈值的影响, 选择不同的阈值时得到的中心偏差变化比较明显.

4 算法对噪声的敏感度理论分析

在天文望远镜跟踪 / 改正系统中, 为了取得好的改正效果, 图像的采集速度要求达到每秒 60 帧, 因此曝光时间不够长将导致收集到的光子信号不够强, 信噪比不会很高, 特别对于部分暗星, 需要加长曝光时间以提高信噪比, 所以对图像跟踪定位算法的精度和稳定性提出了更高的要求.

为了分析评价不同算法的性能, 本文利用具有高斯分布的人工光斑对其进行了噪声敏感度分析. 具体实现方法是先生成一幅具有 494×656 个像素点的理想光斑图, 其中光斑中心为 (247, 328), 半径为 145 pixel (取向右、向下分别为 x 、 y 轴正向), 并以此作为参考图像 (图 1), 对该理想光斑进行已知量的平移操作便得到两幅光斑图 (此处两个方向的平移量均为 0); 其次在其中一幅理想图中加入均值 μ 为 0, 标准差 σ 分别为 0、0.02、0.04...0.4 的高斯白噪声 (图 2); 最后利用选择的几种算法直接或间接计算在不同噪声水平下加噪图像的位移量, 计算得到的位移量与图像实际平移量的误差就代表了各算法的性能. 从理论上讲, 如果算法足够好, 图像噪声对于位移的贡献应该接近于 0, 但随着噪声的增大而变差.

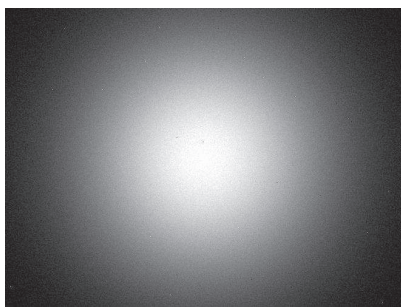


图 1 人工光斑

Fig. 1 Artificial light spot

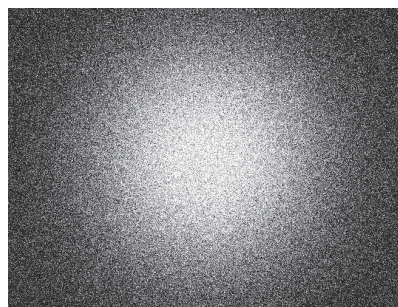


图 2 随机噪声 ($\sigma = 0.3$)

Fig. 2 Random noise ($\sigma = 0.3$)

图 3 即为加入不同标准差的噪声时, 光斑在 x 方向的位移误差检测曲线, 横坐标代表随机噪声的标准差. 图中各算法检测结果都有上下波动, 代表光斑偏移的方向, 这是因为加入随机噪声的不确定性所致, 波动越大, 说明稳定性越差, 波动越小说明稳定性越好, 理论值应该是一条沿着 x 轴过原点的曲线. 从图 3 中可以看出: Hough 变换法和圆拟合法的检测结果较差, 尤其是 Hough 变换法在噪声标准差小于 0.05 时检测结果就出现了大的偏差, 这是因为这两种方法都是基于图像中光斑轮廓的部分数据来进行计算的, 数据量小, 容易受到噪声干扰且与阈值的选取有关, 而其它 3 种方法图像的全部数据均参加计算, 因此这两种算法的数据稳定性较低; 高斯拟合法在噪声标准差小于 0.2 时检

测结果稳定性比较好,但当标准差大于 0.2 时波动则比较明显;重心法和归一化互相关法的检测结果较好,当噪声标准差小于 0.3 时,检测结果波动性较小且大都集中在理想值附近,具有较好的稳定性,当噪声标准差变大时检测结果稳定性也随之下降。当在图像中加入标准差为 0.3 的随机噪声时图像受到的污染已经比较严重,因此重心法和归一化互相关法具有较好的稳定性。

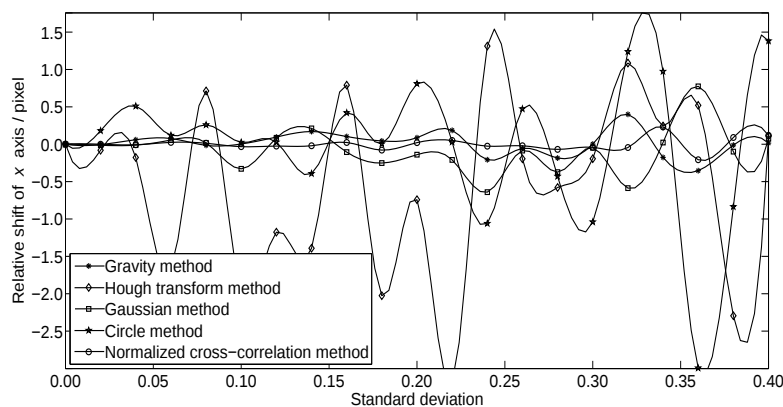


图 3 x 方向位移误差检测结果 ($\mu = 0$)

Fig. 3 Results of shift of x -axis ($\mu = 0$)

为了对这几种算法进行进一步评价,利用 (6) 式计算上述加噪图像的信噪比^[6],分析不同信噪比情况下各算法的位移检测情况。

$$SNR = 10 \lg \left[\frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} s(x, y)^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} n(x, y)^2} \right]. \quad (6)$$

(6) 式中, $s(x, y)$ 为理想图像, $n(x, y)$ 为噪声信号。由上述分析已经知道 Hough 变换法和圆拟合法的检测结果稳定性较差,因此在此只对重心法、高斯拟合法和归一化互相关法进行分析。图 4 即为信噪比不同时 x 方向的位移检测结果,横坐标代表信噪比。从图中可以看出,噪声水平高时高斯拟合法的检测精度稍差,在信噪比大于 10 dB 的时候误差就已经达到 0.2 pixel;归一化互相关法的检测精度要明显高于重心法和高斯拟合法,即使在信噪比等于 5 dB 的情况下,误差也只有 0.1 pixel;重心法的检测精度也较好,在信噪比大于 5 dB 时最大误差不超过 0.2 pixel,而且重心法的计算量较小,计算速度也较快,在精度要求不是非常高时也不失为一种好的算法。因此,综合两组实验进行分析可以得到归一化互相关法和重心法具有较高的稳定性和精度。

5 实验结果及分析

本文作者利用 JDW3-250 氦氖激光器、高速相机、一维高精度电动平移台 (精度好于

0.1 μm , 分辨率达到 0.001 μm)、计算机搭建实验平台, 用采集到的激光光斑代替天文测量中接收到的光斑, 对理论分析结果进行了验证. 实验过程如下: 首先将 CCD 固定在电动平移台上, 调整 CCD 高度使其与激光光源等高, 使光斑位于图像中; 其次控制电动平移台以一定的步长在水平方向移动, 每平移一次拍摄 10 幅图像 (如图 5), 利用本文中介绍的方法分析检测结果的稳定性, 并取这 10 幅图像的平均作为该位置采集到的图片; 连续平移 15 次, 以第 1 个位置的图像作为参考图像, 利用重心法和归一化互相关法计算图像在每个位置的相对位移, 为了保证实验结果的可靠性, 将这一步骤重复进行了 10 次, 得到 10 组图像, 需要注意的是这 10 组图像对应的平移台位置都相同. 实验中采集到的图像由于受到空气中杂质等的影响, 并不直接适用于稳定性分析, 因此需要利用形态学操作 [7-8] 和最大类间方差法对其进行预处理 [8-9].

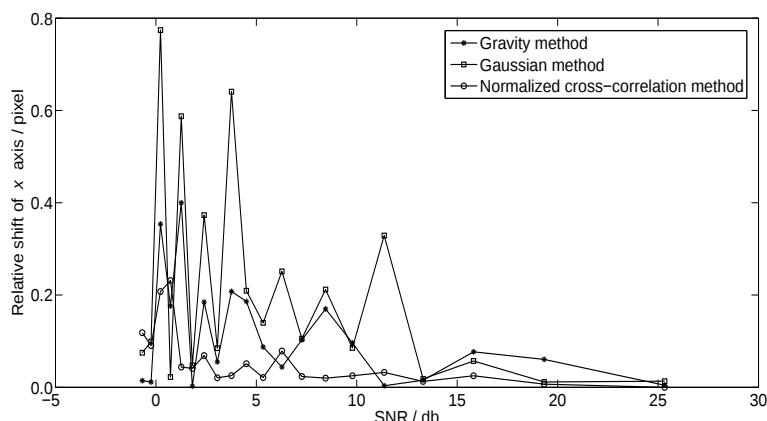


图 4 x 方向位移误差检测结果

Fig. 4 Results of shift of x -axis

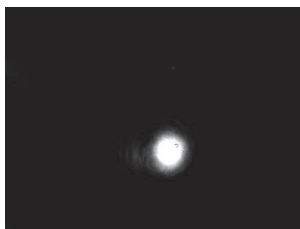


图 5 激光光斑图像

Fig. 5 Laser spot

图 6 即为第 1 组第 1 个位置 10 幅图像的稳定性检测结果, 纵坐标代表 y 方向的位移. 从图中可以看出: Hough 变换法的检测结果稳定性和精度最差, 误差达到了 1 pixel 以上; 圆拟合法的精度和稳定性也较差, 这是因为这两种算法都是基于图像中光斑轮廓

的部分数据进行计算, 而光斑轮廓容易受到空气中杂质、CCD 暗电流散粒噪声、光子散粒噪声等的影响; 高斯拟合法和重心法的检测结果较好, 但由于激光光束的场分布呈高斯分布, 而在天文光学仪器中接收到的光斑图像并不一定呈高斯分布, 故重心法具有较好的可靠性; 归一化互相关法检测结果的波动性要明显低于其它算法, 且大都集中在理想值 0 附近, 因此具有最好的精度和稳定性. 图 7 为第 5 组 15 幅图像的位移检测结果, 由于采集过程中在水平方向等距离采集图片, 理想结果应该为一条直线. 从图 7 中可以看出, 利用重心法间接得到的位移和归一化互相关的检测结果几乎重合, 都呈比较理想的线性分布, 因此重心法和归一化互相关法可以用于位移检测, 具有较好的精度和可靠性.

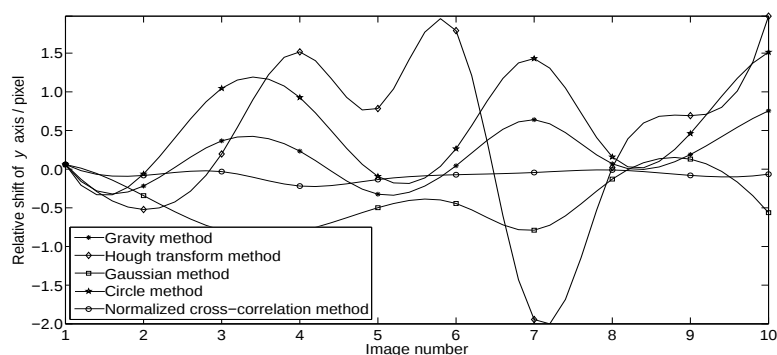


图 6 y 方向稳定性检测结果

Fig. 6 Results of stability measurement of y -axis

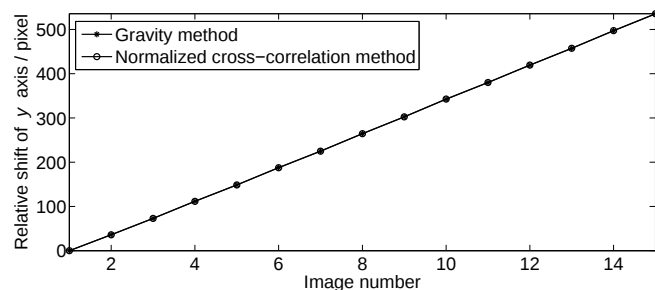


图 7 第 5 组图 y 方向位移检测量与导轨实际平移对比

Fig. 7 Results of image shift of y -axis in the fifth set

6 结论

本文针对天文望远镜中图像跟踪定位系统对图像定位精度的需求, 对几种算法进行

了比较分析. 通过在人工光斑中加入不同水平的噪声对算法误差进行了理论分析, 并用实验中采集到的光斑代替天文观测中接收到的光斑, 对理论分析结果进行了验证. 理论分析和实验实测结果一致, 表明归一化互相关法和重心法具有较高的精度和稳定性, 适用于天文望远镜跟踪定位系统中对图像处理算法的要求. 但这两种算法各有优劣, 重心法计算速度较快, 但精度和稳定性要略差于归一化互相关法, 在实际应用中可依据图像类型和速度要求进行选取.

参 考 文 献

- [1] 魏振忠, 高明, 张广军, 等. 光电工程, 2009, 36: 7
- [2] 陈运锦, 冯莹, 魏立安, 等. 光电工程, 2010, 37: 80
- [3] 杨耀权, 施仁, 于希宁, 等. 光学学报, 1999, 19: 1655
- [4] 李为民, 俞巧云, 胡红专, 等. 光学技术, 2004, 30: 33
- [5] 孔兵, 王昭, 谭玉山. 红外与激光工程, 2002, 31: 275
- [6] 章毓晋. 图像工程 - 图像处理. 北京: 清华大学出版社, 2006: 183-196
- [7] 唐树刚, 党丽萍, 白波. 应用光学, 2008, 29: 693
- [8] 章毓晋. 图像工程 - 图像分析. 北京: 清华大学出版社, 2005: 367-422
- [9] 齐丽娜, 张博, 王战凯. 无线电工程, 2006, 36: 25

A Comparison of Several Image Localization Algorithms in Astronomical Instruments

WANG Li-li^{1,2,3} HU Zhong-wen^{1,2} JI Hang-xin^{1,2,3}

(1 *Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(2 *Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042*)

(3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

ABSTRACT In some modern astronomical telescopes, improving the precision of fast image tracking system can usually reduce the affect of astronomical seeing and suppress the tracking error. Thus, the luminous light and the quality of scientific data can be improved. The errors of tracking/correction systems could be corrected by calculating the offset of images to improve the precision. In this article, five algorithms, including normalized cross-correlation method, gravity method, Hough transform method, Gaussian function fitting method, and circle fitting method, are chosen and studied according to common practical applications. The accuracies and stabilities of these algorithms are compared by experiments carried out in different noise background. The experimental results show that the normalized cross-correlation method and gravity method are of high accuracies and high stabilities, and will be used in the high resolution echelle spectrograph for Xinglong 2.16 meter telescope and instruments of the Stellar Observations Network Group project.

Key words telescopes, techniques: image processing, methods: numerical, methods: laboratory