

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-02-0143-10

天顶筒测量世界时的 CCD 星图处理方法

蒋梦源^{1,2,3}, 尹东山^{1,2,3}, 李海波⁴, 高玉平^{1,2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049;

2. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

3. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;

4. 海军 91710 部队, 和龙 133506)

摘要:为实现 UT1 自主测量, 中国科学院国家授时中心建立了基于新型数字照相天顶筒的 UT1 测量网络。该新型天顶筒采用 CCD (charge coupled device) 代替传统胶片作为感光元件, 以提高观测效率和测量精度。本文分析了天顶筒 CCD 星图噪声特性, 发现以高斯噪声为主, 对比了多种滤波算法, 发现高斯滤波算法对星图的降噪效果更好。根据实拍星图灰度分布的星像区域远小于背景噪声区域、星像灰度值高于背景噪声灰度值等特征, 选取合适阈值对整幅星图进行分割, 很好地将星像从背景噪声中分离出来。比较了多种星像质心位置的计算方法, 发现加权质心算法效果更好。通过实测数据检验, 建立了一套适用于天顶筒星图处理的方案。

关键词: CCD 星图; 滤波; 阈值分割; 质心提取

CCD star map processing method for measuring UT1 with zenith telescope

JIANG Meng-yuan^{1,2,3}, YIN Dong-shan^{1,2,3}, LI Hai-bo⁴, GAO Yu-ping^{1,2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

4. Navy 91710, Helong 133506, China)

Abstract: In order to realize the autonomous measurement of UT1, the National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences established a Digital Photographic Zenith Telescope network. In order to improve the observing efficiency and measurement accuracy, the Digital Photographic Zenith Telescope uses CCD instead of the traditional film. In this paper, we analyzed the noise characteristics of the CCD star map, and found that Gaussian noise is the main noise source. So we compared a variety of filtering algorithms, and among them the Gaussian filtering algorithm exhibited better noise reduction performance than the others. According to the gray

收稿日期: 2019-10-23; 接受日期: 2020-01-21

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2018JM1031); 国家自然科学基金面上资助项目 (11973046); 国家自然科学基金重大研究计划资助项目 (91736207)

作者简介: 蒋梦源, 女, 硕士, 主要从事天体测量学研究。

distribution characteristics of the real star map, the star image region is far smaller than the background noise region, and the star image gray value is higher than that of the background noise, we can select appropriate threshold value to segment the whole star map, which could separate the star image from the background noise well. In this paper, we compared several methods for calculating the centroid position of star image, and the weighted centroid algorithm was found to be more effective. Based on the research, we developed a set of optimal scheme for star map processing.

Key words: CCD (charge coupled device) star map; filter; threshold segmentation; weighted centroid algorithm

0 引言

天顶筒测量的基本工作原理是对天顶区域进行拍照,对拍摄到的星图进行处理,提取星图上星像位置,根据星图上星像位置和恒星视位置,对星图进行识别,得到星像与恒星的对应关系,解算星图中心点在天球上的指向点的视赤经和视赤纬,即铅垂线在天球上的指向点的视赤经和视赤纬。

新型天顶筒采用电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)进行成像,电荷耦合器件是一种新型半导体器件。它先将光学信号转化为电信号,再根据模数转化,将拍摄到的星图以数字信号的形式进行存储。相比于传统底片,CCD存在畸变小、轻便、噪声低、可集成化等优点^[1]。采用CCD作为感光元件来代替传统胶片,可以提高观测效率和测量精度。

为实现UT1自主测量,中国科学院国家授时中心建立了基于新型数字照相天顶筒的UT1测量网络。天顶筒拍摄的星图以FITS(flexible image transport system)格式进行存储,且像素为 $3\ 056 \times 3\ 056$,像元尺寸为 $9\ \mu\text{m} \times 9\ \mu\text{m}$ 。FITS格式是一种专门用于天文工作的图像存储格式,它产生于20世纪70年代后期,它能很好地标准化,移植性好,并且可以包含关于图像的描述参数,几乎现在的天文软件均支持这种格式^[2]。

星图处理是数据处理的关键部分。星图处理提高图像的信噪比,并提高最终的星像质心位置测量精度。由于星图存在噪声,需要先对星图进行滤波处理。并将星像所在区域与背景区域分割开来。通常一颗星像所占据的像素从几个到上百个不等,而我们需要实现的是亚像素级别的位置测量精度,需要根据星像的灰度分布特征采用合适的算法进行计算。综上,我们的星图处理流程为:滤波、图像分割和质心位置计算。

1 CCD星图处理方案

在天文图像处理中常用的滤波算法有高斯滤波、均值滤波、中值滤波等,图像分割算法有基于阈值分割算法、基于区域分割算法、基于边缘分割算法等^[3],CCD相机自身结构、观测环境、大气条件等因素会使得CCD星图的噪声类型、灰度直方图和星像畸变等方面存在其自身特殊性。因此,对于CCD星图处理,需要结合观测台站的实际情况,分析CCD星图的特征,选择适合CCD星图的滤波方法和图像分割方法。至于星像质心位置计算,还需要根据我们提取到的星像信息具体分析,选择位置误差更小的方法。由于高性能CCD相机拍摄的星图上星像较多,且每晚拍摄的底片有数百张之多,因此我们希望实现星图的自动化处理,形成一套适用于实际星图处理的方案。

1.1 滤波

滤波是图像处理的第一步,目的是降低星图噪声。由于传感器的材质、观测环境和元器件结构等影

响, CCD 照相机拍摄到的星图存在多种噪声, 如暗电流噪声、电荷转移噪声、信号起伏噪声、复位噪声等^[3-8]。根据噪声分布特点, 可以分为高斯噪声、椒盐噪声和泊松噪声。仪器电路各元器件自身噪声及互相影响、图像传感器长期工作温度过高等会在星图上产生高斯噪声。泊松噪声即散粒噪声, 光子散粒噪声符合泊松分布^[9]。椒盐噪声又称脉冲噪声, 它会随机改变一些像素值^[10]。

针对这几类噪声, 常见的滤波方法有高斯滤波、均值滤波、中值滤波等。在图像处理中, 高斯滤波一般有两种实现方式, 一是用离散化窗口滑动卷积, 另一种通过傅里叶变换。离散化窗口滑动卷积是选取一定尺寸大小的滤波器模板, 依次遍历图像上的每个像素。高斯滤波就是将滤波器模板内的像素灰度值做加权平均。均值滤波是对滤波器模板内像素的灰度值做简单平均计算, 其缺点是不能很好地保护图像细节, 有可能会使图像边缘模糊化。中值滤波是采用滤波器模板内像素灰度值的中位数代替滤波器模板中心点对应的像素的灰度值, 在平滑脉冲噪声方面非常有效, 同时它可以保护图像尖锐的边缘, 是一种有效抑制椒盐噪声的滤波算法^[10]。

为得到没有星像的噪声图, 使用洛南观测站天顶筒在关闭圆顶、遮盖镜头的情况下进行连续拍照, 曝光时长 0.5 s。以 10 幅图像为一组, 将一组图像相同位置的灰度值求平均后得到平均后的图像, 分析其灰度分布直方图。

图 1 为平均后图像的噪声灰度分布直方图, 图中曲线为高斯拟合曲线。由该图中的直方图及高斯拟合曲线的符合程度可看出, 图像噪声的主要成分是高斯噪声, 这一类型的噪声对应的像素个数最多, 灰度值也最大, 对图像的影响也最明显。

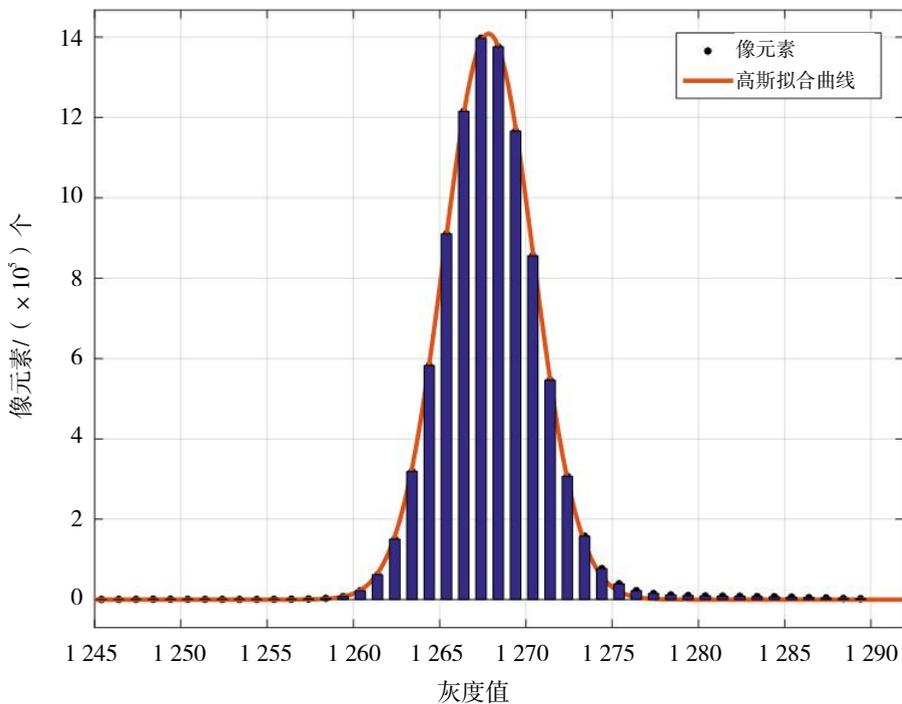


图 1 灰度直方图

对平均后的图像分别计算其各列和各行灰度值的平均值, 分析图像灰度值的空间分布情况。

图 2 和图 3 分别表示平均后的图像各行和各列的灰度平均值, 由图 2 可以看出各行灰度值的平均值在一个灰度值内波动, 由图 3 可以看出列灰度值的平均值总体较稳定, 图像两侧边缘的列方向的灰度值的平均值较高, 中间列中有个别列的灰度值平均值较小。各行各列的灰度值平均值总体稳定, 且不随行

列有明显趋势变化。

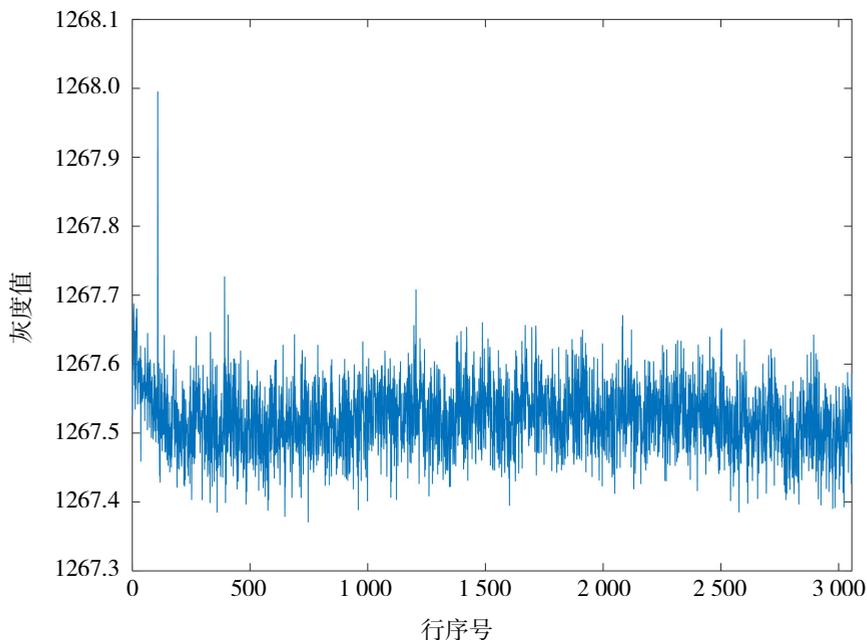


图 2 各行灰度值均值

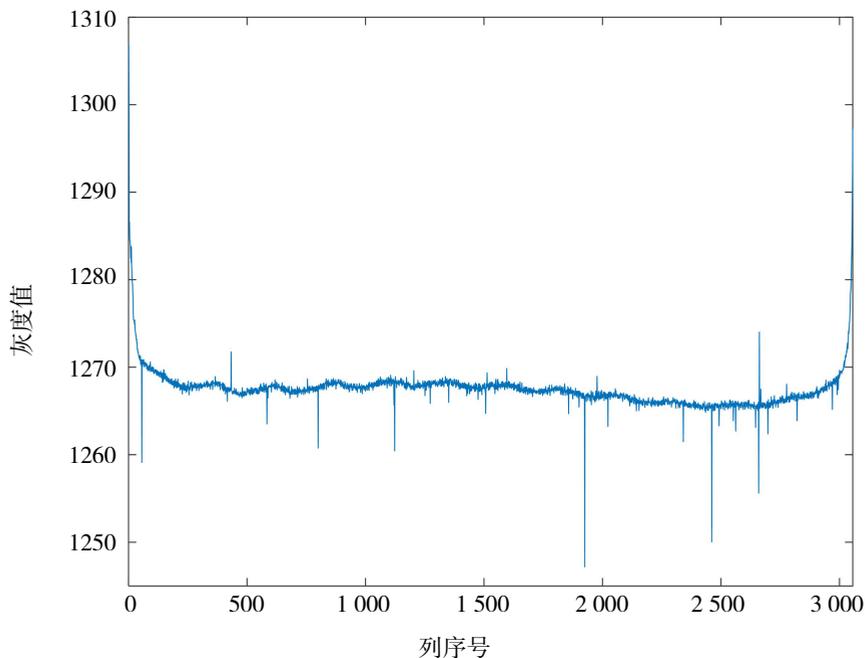


图 3 各列灰度值均值

图 4 和图 5 分别表示平均后图像各行和各列的灰度值的标准差, 各行各列的灰度值的标准差总体平稳, 且不随行列有明显趋势变化。

滤波器模板的大小一般是奇数, 如 3×3 , 5×5 或者 7×7 , 滤波器模板半径越大, 滤波耗时越长^[11], 综合考虑天顶筒所配置的计算能力等因素, 决定采用 3×3 模板分别进行高斯滤波和中值滤波, 并根据峰值信噪比指标对这两种方法进行比较, 选取合适的滤波方法。

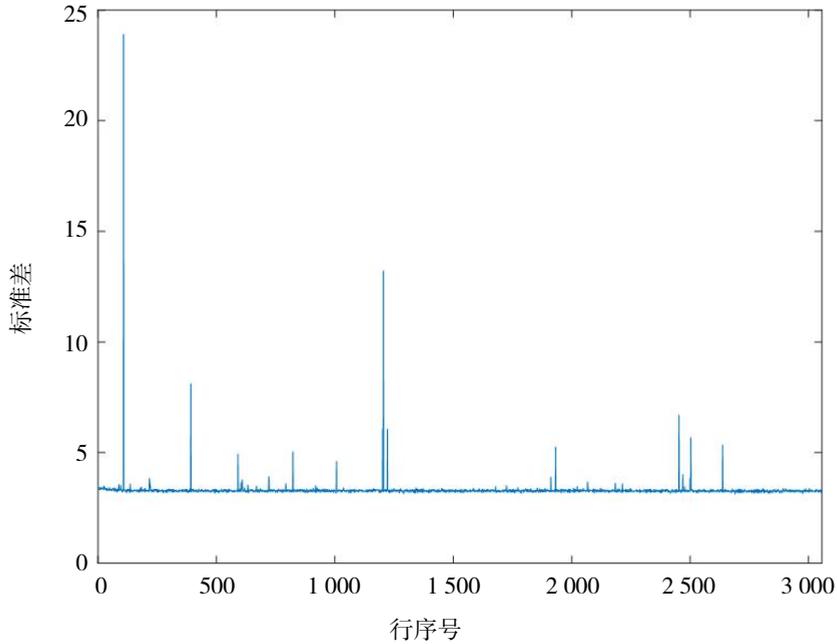


图 4 各行灰度值标准差

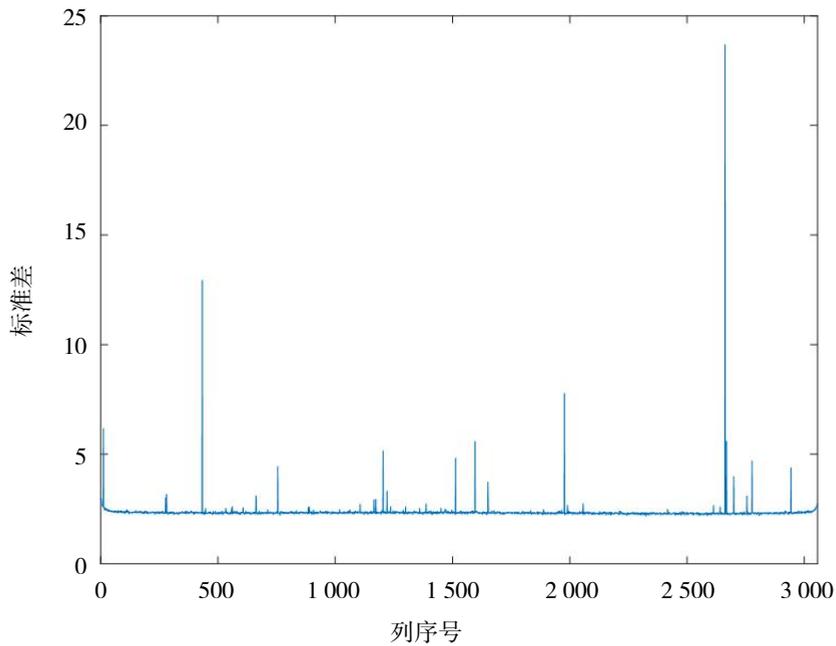


图 5 各列灰度值标准差

峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 常用来衡量图像质量^[12]。它的计算公式见式 (1) 和式 (2) 所示, 其中 X_{PSNR} 的单位是 dB, 数值越大表示失真越小, X_{MSE} (mean square error) 为均方差, 代表了滤波前后灰度值的变化。在后续的滤波实验中, 计算滤波后星图的峰值信噪比, 以此作为衡量滤波好坏的指标。

$$X_{\text{MSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2, \quad (1)$$

$$X_{\text{PSNR}} = 10 \log_{10} \left(\frac{X_{\text{MAX}_1}^2}{X_{\text{MSE}}} \right), \quad (2)$$

式 (1) 和 (2) 中, $m \times n$ 为图像尺寸, I 为原图灰度值, K 为处理后图像灰度值, X_{MAX} 为最大像素值。

1.2 图像分割

图像分割的目的是将星像区域从背景中分割出来。主要方法有：阈值分割法、基于区域的分割方法、基于边缘的分割方法等^[3]。

根据实拍星图的像素灰度分布特性，星图上星像和背景噪声的灰度值处于不同灰度级范围，星像的灰度值大于噪声点的灰度值，且星像区域远小于背景噪声区域。

基于阈值的分割方法具有实现简单、计算量小、性能较稳定等特点^[13]，且它适用于目标和背景处于不同灰度级范围的图像，利用图像中需要提取的目标与背景在灰度上的差异，通过设置合理阈值实现目标与背景的分离。因此，选取基于阈值的分割方法。

阈值分割方法可表示为^[14]

$$g(x,y)=\begin{cases} 0, & f(x,y)\leq T \\ 1, & f(x,y)> T \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中， T 为选取的阈值， $f(x,y)$ 为原始像元点的灰度值， $g(x,y)$ 为阈值分割后对应的灰度值。阈值分割中的阈值选取至关重要，如果阈值选取过小，会导致将很多噪声误认为是星像，如果阈值过大，也有可能剔除掉很多暗星。

阈值的选取有很多种方法，有最大类间方差法、迭代法等。每种方法都有其适用的图像，根据图像灰度特征选取不同的阈值选取法。

最大类间方差法是通过不断调节阈值，使得通过此阈值分割的目标与背景之间的差异最大，进而认为此阈值选取最优^[15]。迭代法原理与最大类间方差法原理类似。

但是由于星像区域远小于背景噪声区域，利用最大类间法和迭代法计算出的阈值较小，阈值分割效果不好。当目标与背景的面积大小比例悬殊时，阈值计算结果不准确，利用此阈值的图像分割效果不好。

通过分析实拍星图的像素灰度分布特性，发现星像区域远小于背景区域，星像灰度值高于背景噪声灰度值，且背景噪声主要为高斯噪声。因此，决定以灰度值均值加3倍标准差作为阈值($T = \mu + 3\sigma$)分割星像与背景噪声。

通常情况下，如果阈值分割得到的星像像素个数小于5，则认为该像素区域为噪声，需要将其剔除。

1.3 质心提取

星像质心位置计算是为了从已经提取到的星像区域上，得到高精度的星像质心位置。

一个星像信号集中在近似圆形的区域内，并且星像能量在区域内呈近似高斯分布^[16]。因此需要计算出星像区域内近似能量最高的点，即星像质心。

关于星像质心提取的方法可分为基于灰度的质心算法和基于边缘的质心算法^[17]，其中基于灰度的方法有：质心法、加权质心法、高斯曲面拟合法等^[18]。分别用这3种方法进行实验，比对得出的星像质心位置，选取最适合的质心提取方法。

质心法是最常见的一种细分定位法，其计算简单，且有一定精度。质心法要求星像灰度分布比较均匀。计算公式如式(4)和(5)所示，其中 $f(x,y)$ 为像元点的灰度值， x 为横坐标， y 为纵坐标。

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f(x,y)x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f(x,y)} \quad (4)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f(x,y)y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f(x,y)} \quad (5)$$

加权质心法是质心法的一种进化形式，加权质心法和质心法相比，其采用灰度值的平方代替了灰度值，它使得离中心较近且灰度值较大的像素点对于中心位置的计算贡献更大。计算公式如式 (6) 和 (7) 所示：

$$x_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f^2(x, y)x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f^2(x, y)}, \quad (6)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f^2(x, y)y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f^2(x, y)}. \quad (7)$$

因为星像在 CCD 上的成像为光斑，其灰度值近似服从高斯分布，因此可以用高斯曲面对其进行拟合。对二维高斯曲面公式两边求导，利用最小二乘法进行曲面拟合，为了计算简便，也可以分别从 x 和 y 方向分别对星像进行拟合^[9]。高斯曲线方程如下：

$$f(x) = Ae^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

$$\ln f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (9)$$

式 (9) 中， a_0 、 a_1 、 a_2 是待求系数，用上述二次多项式拟合 x 方向上的点，并用最小二乘法可以求得各系数，则星像质心点的 x 坐标为 $-\frac{a_1}{2a_2}$ ，同理可计算 y 的坐标。

2 星像质心提取结果

图 6 为 2018 年 11 月 23 日 23:01:56 于洛南观测站拍摄的一张原始星图，曝光时长为 0.5 s。使用上述分析的星图处理方法，对星图进行处理。

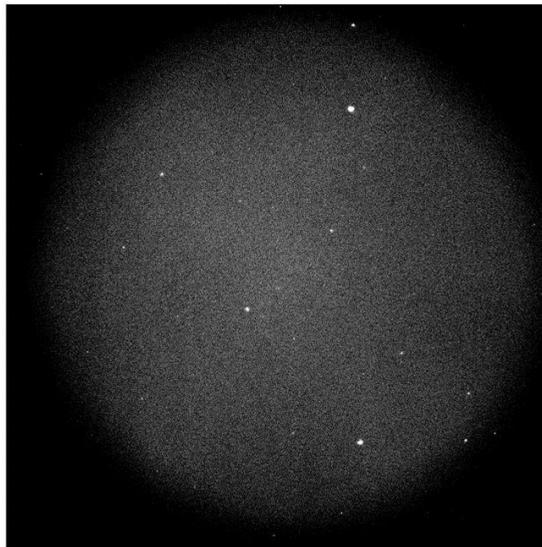


图 6 洛南站拍摄的星图 (2018-11-23)

图 7 为高斯滤波后的星图。高斯滤波后星图的峰值信噪比为 23.91，中值滤波后星图的峰值信噪比为 22.18，高斯滤波加中值滤波后星图的峰值信噪比为 22.80，高斯滤波后的星图的峰值信噪比最大，说

明高斯滤波算法更适合。

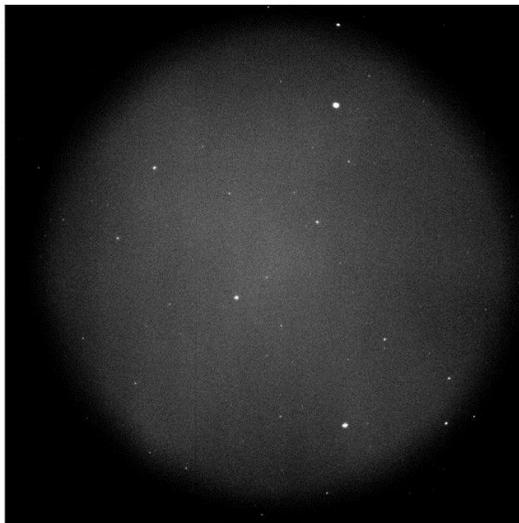


图 7 高斯滤波后星图

滤波工作完成后,在星图上选取几块没有星像只存在噪声的区域,计算噪声灰度值的均值及均方差,以灰度值均值加 3 倍标准差作为阈值($T = \mu + 3\sigma$)分割星像与背景噪声。

图 8 为阈值分割后的星图。阈值分割得到的星像中,根据望远镜的拍摄能力,即使是最暗的星占据的像素个数也有 6 个以上,因此像素个数小于 5 的图像看作噪声点,需要将其剔除。



图 8 阈值分割后星图

根据上述阈值分割提取到的星像,并将星像按照像素大小进行排序编号,序号越小的星像,其像素越小,序号越大的星像,其像素越大。利用 3 种方法分别进行星像质心位置计算,并对 3 种方法的计算结果做对比。

图 9 中点线表示高斯曲面拟合法和质心法算出的质心位置的行差,虚线表示高斯曲面拟合法和加权质心法算出的质心位置的行差,实线表示质心法和加权质心法算出的质心位置的行差。图 10 对应图 9 中的列差。

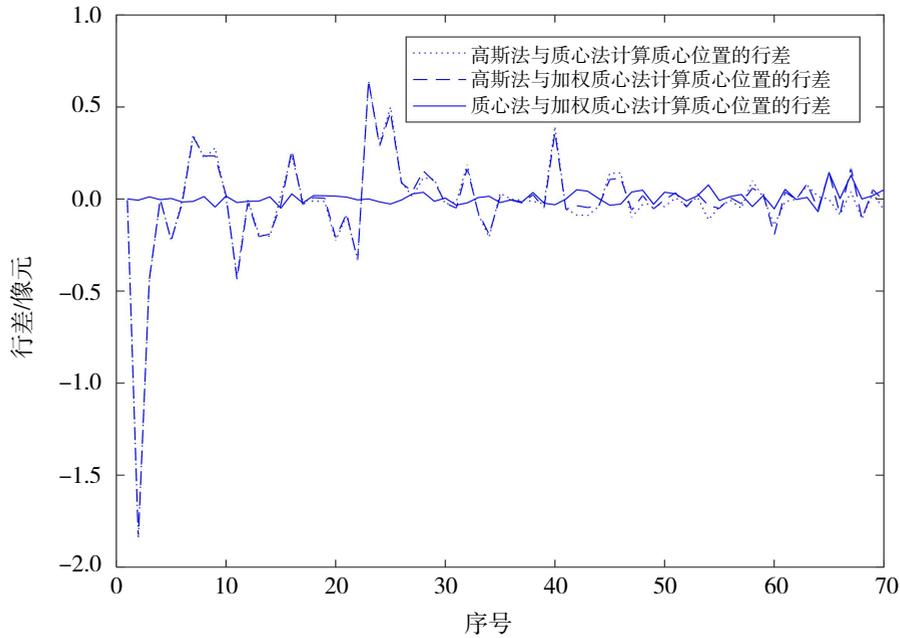


图9 3种方法计算的星像质心在行方向的差异

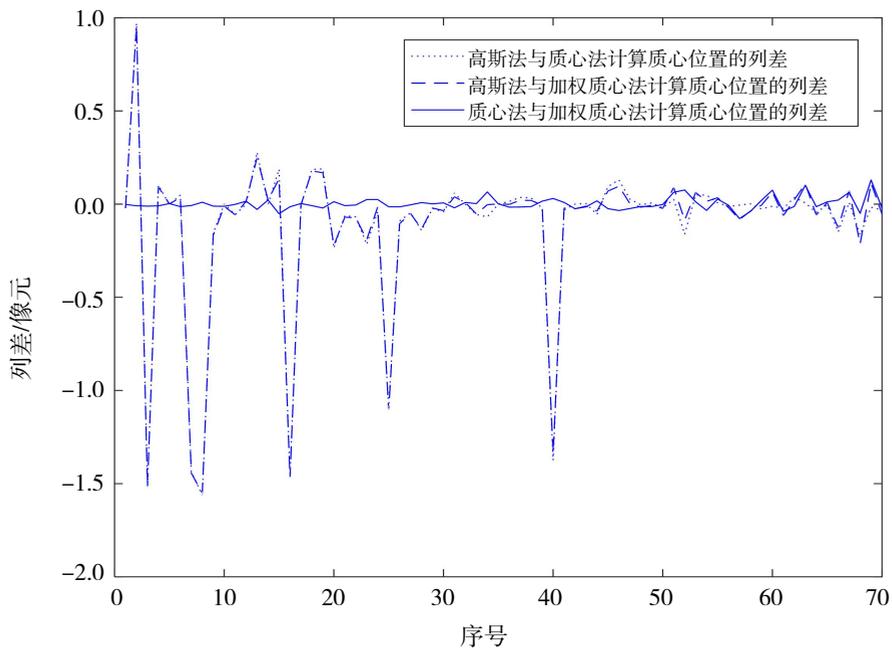


图10 3种方法计算的星像质心在列方向的差异

如图9和10可以看出，实线条一直在0点附近，且波动较小。在横坐标序号较小部分（对应像素较小的星像），点线和虚线条在某些点波动较大。在横坐标序号较大部分（对应像素较大的星像），3线条一直在0点附近，且波动较小。无论星像像素大小，质心法和加权质心法得到的星像质心位置相差很小。但是，高斯曲面拟合法得出的质心位置和另两种算法得出的质心位置对于某些像素较小的星像差异较大。

为了分析高斯曲面拟合法和质心法或者加权质心法得到的结果在某些点上的差异较大，且在列方向上的差异更明显的原因，我们挑选出这些在质心列方向上3种方法计算结果差异较大的星像进行分析，发现这些星像区域较小，像素从几个到十几个不等，星像区域均为狭长区域，并且其灰度分布已不符合高斯分布。因此，在这些星像区域上，利用高斯曲面拟合法计算其质心位置，误差就会过大。与高斯曲

面拟合法相比, 加权质心法的计算结果更稳定, 不存在误差较大的情况。

由于天顶筒观测不是跟踪曝光, 曝光期间的地球自转会导致星像存在拖尾现象。除此之外, 某些星像也存在畸变现象, 畸变是由光学系统加工制作误差导致的。

星图上存在一定数目的星像区域狭长且灰度值分布不符合高斯分布的星像, 这些星像并不适合用高斯曲面拟合法求其质心位置。在星像提取过程中, 我们已经剔除了像素小于 5 的星像, 如果我们再直接剔除掉这些星像, 会导致星图上星像过少, 并对之后的计算带来不便。因此我们需要一个适用于我们星图上所有星像质心位置提取, 且计算结果稳定的方法。

加权质心法计算的星像质心位置比较稳定, 且加权质心法是质心法的一种进化形式, 其采用灰度值的平方代替了灰度值, 它使得离中心较近且灰度值较大的像素点对于中心位置的计算贡献更大。故采用加权质心法计算星像质心位置。

3 结论

本文结合天顶筒拍摄星图的特征, 开展星图处理方法研究分析, 建立一套适用于我们天顶筒观测的星图处理的最优方案, 从而可以更好的提取到星像的质心坐标。实验结果表明, 高斯滤波能很好地降低星图噪声, 在星图上选取几处噪声区域, 以其噪声灰度值的均值加 3 倍均方差 ($T = \mu + 3\sigma$) 作为全局阈值提取星像, 能很好地将星像和背景分开, 提取到星像的有用信息, 根据提取到的星像区域, 加权质心法的计算结果具有更好的稳定性, 且不存在在某些星像上误差较大的情况。

参考文献:

- [1] 刘美莹. CCD 天文观测图像的星图识别和天文定位方法研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2009.
- [2] 冒蔚, 季凯帆, 李彬华, 等. CCD 天体测量学[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
- [3] 邓廷权, 焦颖颖. 图像分割质量评价的二型模糊集方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(32): 217-220.
- [4] 谢玉莹. 星敏感器星图仿真及星点提取算法评估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [5] 董雅潇. 基于小视场星敏感器的星点提取与星图识别算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [6] 刘美莹. CCD 天文观测图像的星图识别和天文定位方法研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2009.
- [7] 苏畅. 星敏感器星图降噪预处理及其硬件实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [8] 李爽. 基于 FPGA 的 CCD 星敏感器星图预处理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [9] 廖育富. 复杂工况背景下星图预处理相关技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2016.
- [10] 周杰. 应用于图像处理的中值滤波改进算法[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [11] 金龙, 王洪元, 张继, 等. 实时 DSP 图像处理高斯滤波优化[J]. 制造业自动化, 2014, 36(12): 63-66.
- [12] 王坤. 数字图像分割和质量评价方法的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [13] 吕燕. 基于阈值算法图像分割的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [14] 聂饶. 基于 CCD 星敏感器的星图识别[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [15] 蔡梅艳, 吴庆宪, 姜长生, 等. 改进 Otsu 法的目标图像分割[J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 118-151.
- [16] 沈晓芳, 刘朝山. 星敏感器中的图像预处理技术[J]. 河南科学, 2016, 34(4): 471-476.
- [17] SHORTIS M R, CLARKE T A, SHORT T. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images[J]. SPIE, 1994: 239-250.
- [18] 王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1672-1677.
- [19] 张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.