

一种新的星像自动搜索算法

王 嫻, 苏成悦, 王婷婷, 周冬跃

(广东工业大学 物理与光电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 提出了一种基于数学形态学的星像自动搜索和新的 Gauss 拟合对星像中心精确定位的算法. 并将该算法运用到实际观测的 CCD 图像中, 实现了星像自动搜索与精确定位. 测量结果验证了该算法的有效性.

关键词: 数学形态学; 星像搜索; Gauss 拟合

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2009)03-0077-05

星像自动搜索和精确定位越来越受到重视, 它可应用于航天导航和军事等方面. 天体测量的常见工作是对星像中心位置和光度进行测量, 星像中心位置的精确测量需要两个基本步骤: 星像搜索和中心精确定位. 传统的星像搜索与定位建立在照相技术的基础上, 随着 CCD 技术的应用和数字图像处理技术的发展, 星像自动搜索和精确测量变得可能.

在早期的照相天体测量技术中, 采用照相技术将星图成像于优质的照相底片上, 再用 PDS (Photometric Data Systems) 系统中的测微密度计对照相底片进行扫描, 并将其转化为二维数字图像. Newell 和 O'Neil (1974) 的 E-方法是通过已测得密度轮廓的数字整形化^[1-2], 该方法可得到精度相当好的图像星等, 但对于高精度要求而言, 该方法仍然只能用于有限的星等范围, 且不适用于密集度高的星像图; Herzog 和 Illingworth (1977) 建立了一种从二维扫描图像中自动计算星像个数的算法^[3], 此算法可用于计算复杂星等, 但不适用于精确光度成像图像; Butcher (1977) 设计的一种交互技术可以用于密集度高的星像图^[4], 且对于某些特殊问题而言是一种最好的方法, 但此方法处理速度较慢, 且设备要求较高; Stetson (1979) 的导数极值搜索算法改进了上述算法^[5], 但此算法仍有以下缺点: 对高密度星像区域的搜索需要一定的人工干预, 对于大量图像而言这无疑增加了工作量和整体处理速度, 且也融入了主观因素, 从而降低了求解精度. 这些算法都是建立在人工操作的基础上, 使用 PDS 进行处理, 并且算法的实现大都基于 UNIX 和 LINUX 操作平台. Peng 等人 (2006) 根据 Stetson 的算法^[6-7], 即星像灰度边缘分布的近似高斯特征及高斯函数的性质, 基于

VC++ 平台设计实现了一种自动星像搜索算法.

星像精确定位问题一直很受重视, 国内外学者在这方面做了许多工作, 并且已经有了一些有效的定位算法, 如: 矩方法、Gauss 拟合法、中值法和寻导法等^[5-9]. Stone 等人对各种定位方法的精度和运算速度等进行了比较和分析^[10-13].

本文从两方面开展研究, 提出了一种基于数学形态学的星像自动搜索和新的 Gauss 拟合对星像中心精确定位的算法.

1 算法描述

1.1 星像搜索

数学形态学是一种新的非线性图像 (信号) 处理和分析理论, 它摒弃了传统的数值建模及分析的观点, 从集合的角度来刻画和分析图像, 具有一套完整的理论、方法及算法体系. 它的基本思想是用具有一定形态的结构元素去度量和提取图像中的对应形状以达到对图像分析和识别的目的. 数学形态学定义了两类基本操作——膨胀和腐蚀. 假设 A 和 B 是 Z^2 中的集合. 定义如下:

膨胀: A 被 B 膨胀定义为

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \Phi\}. \quad (1)$$

腐蚀: A 被 B 腐蚀定义为

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\}. \quad (2)$$

其中, $\hat{B} = \{w \mid w = -b, b \in B\}$, $(B)_z = \{c \mid c = b + z, b \in B\}$, B 称为结构元素. 膨胀与腐蚀是两个基本的形态学运算, 由此又可以定义开、闭等复合形态学运算. 开运算定义为

$$A \circ B = A \ominus B \oplus B. \quad (3)$$

收稿日期: 2009-05-11

基金项目: 广东工业大学 2009 年学生课外学术科技项目 (200912121CB1)

作者简介: 王 嫻 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理.

在精确测量星体中心位置之前, 必须将星体目标与背景分离开, 可以采用一个全局阈值对图像进行阈值分割来实现, 即对图像二值化. 这一过程可用数学语言描述. 设包含目标的图像表示为 $f(x, y)$, 其中, $x = 1, 2, \dots, m, y = 1, 2, \dots, n$, 阈值分割过程表示如下

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & f(x, y) > T, \\ 0 & f(x, y) \leq T. \end{cases} \quad (4)$$

这里的 T 表示背景阈值. 另外还要考虑图像可能遭受宇宙射线的干扰. 宇宙射线是来自宇宙空间的各种高能粒子形成的射流, 在数字图像上表现的主要特征往往是一两个像素灰度值很大, 因此可以对所得二值图像用适当的结构元素进行开操作, 滤除噪声点.

阈值分割及噪声滤除之后即可提取星像及背景区域. 对于星像, 可以直接对所得的二值图像进行连通区域标记. IPT 函数 `bwlabel` 可用于计算一幅二值图像中的所有连接分量. 对于背景 Stetson 指出^[14], 天光背景是陆地夜空散射和 CCD 接收器内部的散射光线等多种因素的结合体, 要确定星像的天光背景值 B , 通常的做法都是在以星像为中心的一个环形区域内找到一个 CCD 计数值来表示该星像的 B 值^[15]. 要使求得的 B 值与真实值的误差尽量减少, 应使内环尽量远离星像中心, 因为星像的 CCD 计数值明显高于背景 CCD 计数值, 如果将星像本身加入到求取背景的环中, 得到的背景值就会比真实的背景值要高. 计算天光背景 B 的环形区域内环半径 N 可利用拟合得到的 H 来估计星像的半径 (以半峰全宽 FWHM 为单位), H 越大 N 越大, N 随 H 的变化幅度如表 1 所示^[13]. 外环半径依据不同的 CCD 图像有不同的取值, 一般而言, 环形区域的面积跟星体区域的面积大致相等. 可以选择适当的结构元素对二值图像进行两次膨胀, 将两次膨胀得到的图像相减, 所得环形区域作为初始的天光背景区域.

表 1 N 随 H 的变化幅度关系

H	N
0~100	1.5
100~300	2.5
300~700	3
700~1000	3.5
1000~1600	4
1600~65535	5

1.2 星像中心定位

根据成像理论, 点光源经过理想光学系统成像

为一个弥散斑, 它的分布函数称为点扩散函数. 当点光源位于光轴轴线上时, 像的表达式为

$$h_p(x, y) = \frac{1}{\pi D_z} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{D_z}\right]. \quad (5)$$

由点扩散函数的表达式可以看出, 其分布是一个二维的高斯分布, 其中 D 为图像扩散系数, z 为偏离理想像面的状态. 实际的光学系统不是理想光学系统, 且星体也会偏离光轴线, 其所成的像将偏离理想像, 但仍可认为其近似符合二维高斯分布. 因此, 可以用高斯曲面对星像的灰度分布进行拟合. 高斯曲面拟合法是建立在星像灰度近似呈高斯曲面分布的理论基础上的, 它的精度与 CCD 传感面上实际所获得的星像与高斯函数的符合程度有关. 根据 Stone 等人的研究, 本文采用下面的函数形式^[10]

$$f(x, y) = B + H \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2R^2}\right]. \quad (6)$$

其中, $f(x, y)$ 代表像素灰度值; B 代表背景, 本文采用 Costa 计算背景的方法来计算 B ^[15]; H 为高斯函数的峰值, 在一定程度上反映了星体的光度信息; x_0, y_0 为高斯函数的中心, 即星像的中心; R 为高斯函数的标准差. H, x_0, y_0 和 R 各参数由拟合式 (6) 得到. 将式 (6) 变形整理得

$$g(x, y) = H \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2R^2}\right]. \quad (7)$$

其中, $g(x, y) = f(x, y) - B$. 传统的高斯拟合法是先利用泰勒公式将式 (7) 在初始值处展开^[10], 并忽略高次项将式 (7) 线性化, 再利用最小二乘法拟合求解得星像中心. 本文将采用一种新的高斯拟合算法, 即对式 (7) 两边取自然对数将高斯函数线性化. 变形整理得

$$g(x, y) \ln(g(x, y)) = g(x, y) \left[H - \frac{x_0^2 + y_0^2}{2R^2} \right] + xg(x, y) \frac{x_0}{R^2} + yg(x, y) \frac{y_0}{R^2} - g(x, y) \frac{x^2 + y^2}{2R^2}. \quad (8)$$

将由 N 个数据点 (星像区域有 N 个像素点) 组成的方程组写成矩阵的形式为

$$\mathbf{A} = \mathbf{BC}, \quad (9)$$

其中, \mathbf{A} 为 $N \times 1$ 向量, 元素为: $\mathbf{a}_i = g(x_i, y_i) \ln(g(x_i, y_i))$ (其中, $i = 1, 2, \dots, N$). \mathbf{B} 为 $N \times 4$ 矩阵, 元素为 $\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} g(x_i, y_i) & x_i g(x_i, y_i) & y_i g(x_i, y_i) & -g(x_i, y_i) \times (x_i^2 + y_i^2) / 2 \end{bmatrix}$ (其中, $i = 1, 2, \dots, N$),

$$\mathbf{C}^T = \left[H - \frac{x_0^2 + y_0^2}{2R^2}, \frac{x_0}{R^2}, \frac{y_0}{R^2}, \frac{1}{R^2} \right]. \quad (11)$$

式 (9) 为超定线性方程组, 利用最小二乘法解方程组即可求得参数 R, H, x_0, y_0 . 利用拟合得到的 H , 根

据表 1 重新选取背景区域及星像, 再次拟合得到星像中心 x_0, y_0

2 算法的实现

实验数据采用 2007 年 10 月 12 日在国家天文台兴隆观测站使用地平式 1 m 反射望远镜观测的 16 幅 CCD 图像资料. 天文望远镜和接收器的参数说明见表 2

表 2 天文望远镜和接收器的参数

焦距	焦比	主镜口径	CCD 视场	CCD 阵列大小	近似比例尺
8 00m	f/8	1 00m	11.8' × 11.5'	1 340 像素 × 1 300 像素	0.53"/像素

阈值法图像分割的关键和难点在于如何取得合适的阈值. 近年来, 国内外研究人员提出了多种选取阈值的方法, 如直方图阈值、类间方差阈值、最大熵阈值、最小误差阈值和模糊阈值等^[16-18]. 国际天文通用的数字图像格式 FITS (Flexible Image Transport System) 为 16 bit 量化的灰度图像, 其灰度级动态范围大, 灰度直方图为单峰值 (记峰值处灰度级为 L), 如图 1 所示 (图示为其中一幅图像的灰度直方图). 由于星图比较单一, 由较暗的背景与较亮的目标 (星像) 构成, 这为选取阈值提供了方便. 这里可根据所测星体的亮度范围选择合适的阈值.

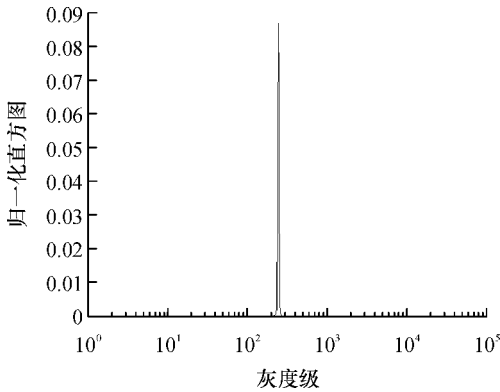


图 1 灰度直方图

得到二值图像后, 根据 1.1 节所描述的方法在二值图像中选取目标及背景区域. 星像是一个弥散斑, 其灰度分布近似呈高斯分布, 在图像上表现为一个近似圆形亮斑. 因此, 本文选择如图 2 所示的圆盘形结构元素对二值图像进行形态学运算. 经分析图像资料及多次实验发现, 用半径 R 为 2 的结构元素对二值图像进行开操作, 可较理想地滤除噪声点. 用 IPT 函数 `bwlabel` 标记连通区域, 即标记星像区域. 由于背景区域要尽可能远离星像, 又要保证背景区域彼此不会连接到一起. 实验验证当阈值 T 取 $1.8L$

时可以先用半径为 1 的结构元素对二值图像进行膨胀操作, 接着用半径为 4 的结构元素再次进行膨胀操作, 将得到的两幅图像相减, 即可提取背景区域. 同样标记连通区域, 即标记背景区域. 这样, 得到星像及其背景编号一致的目标区域. 在所有 CCD 图像对应区域根据 1.2 节所描述的方法测量星像中心. 图 3 所示为 T 取 $1.8L$ 时检测到的星的示意图. 图 4 为 T 取 $1.15L$ 时检测到的星的示意图. 星像旁边的数字标记为星的编号, 为显示方便, 示意图为原始图像的正值图像.

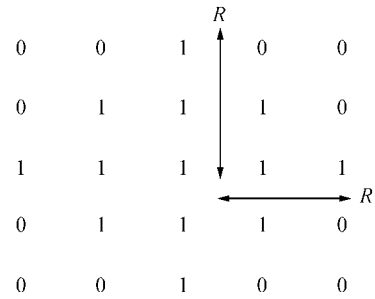


图 2 结构元素示意图

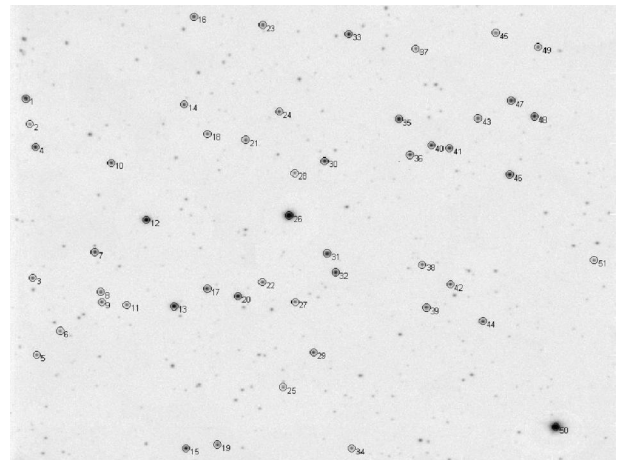


图 3 $T = 1.8L$ 时, 检测结果示意图

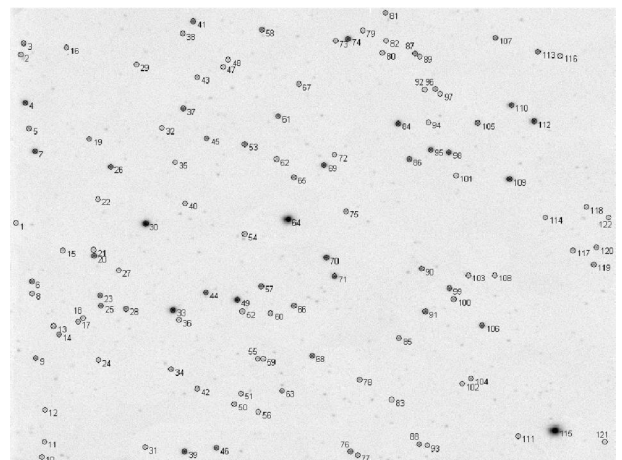


图 4 $T = 1.15L$ 时, 检测结果示意图

3 精度分析

由于望远镜消旋系统的不完善使得由 CCD 系统观测的图像会存在一定的系统偏差. 这种偏差是望远镜在跟踪天体星像时, 由于星像本身存在平移、旋转等运动, 望远镜需要通过消旋系统的旋转、平移来与星像运动保持一致. 当两者的运动方向和速度不一致时, 就会使得由 CCD 记录的天体星像的位置与星像本来的位置存在一定的偏差, 这种偏差并不是测量方法带来的, 应最大限度扣除这种由仪器系统所带来的系统偏差. 图 5 为未消除系统误差之前其中一幅图像的中心位置与平均中心位置偏差矢量图. 图 6 所示为扣除系统误差之后的中心位置与平均中心位置偏差矢量图. 要反映目标星像所发生的平移、缩放、二维旋转和错切等运动变化, 这里采用 6 参数的仿射变换模型^[13]. 即

$$\begin{cases} \Delta x_{ij} = ax_i + by_i + c \\ \Delta y_{ij} = dx_i + ey_i + f \end{cases} \quad (12)$$

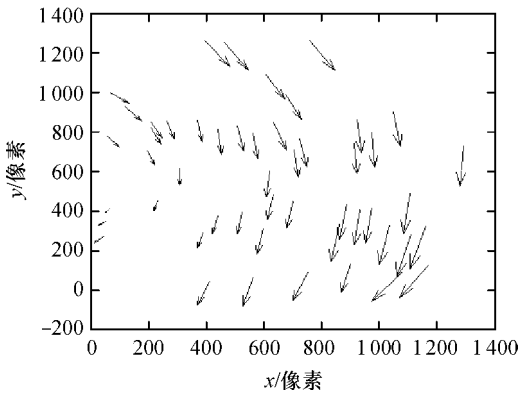


图 5 扣除系统误差前

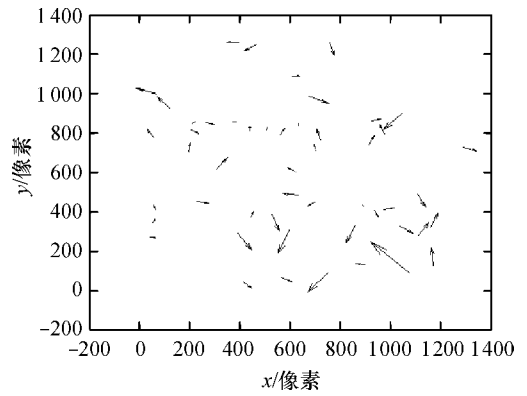
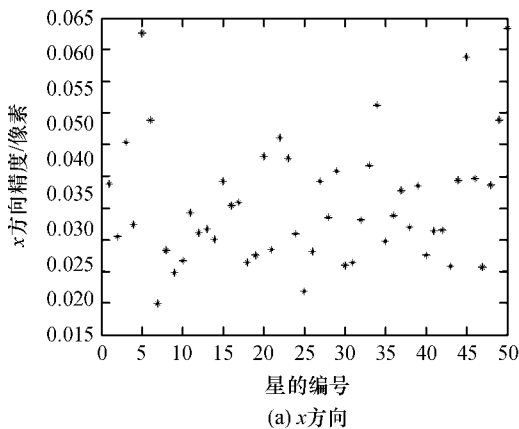


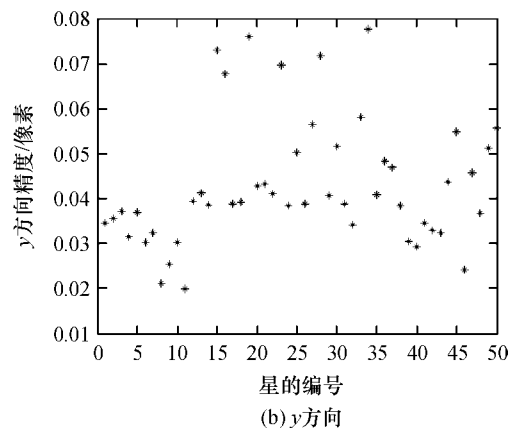
图 6 扣除系统误差后

其中, x_i, y_i 为第 i 颗星体中心坐标的平均值; $\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$ 为第 j 幅图像中第 i 颗星的中心坐标与第 i 颗星体的平均坐标的偏差; a, b, c, d, e, f 为待定常数, 对于一幅图像而言就一组参数. 因此, 将第 j 幅图像的 $x_{ij}, y_{ij}, \Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$ 代入式 (12), 利用最小二乘法解方程组求得 6 参数. 再将 6 参数及 x_{ij}, y_{ij} 代入式 (12) 求第 j 幅图像中每颗星体的系统误差 $\Delta x'_{ij}, \Delta y'_{ij}$. 在统计分析测量精度时, 从每颗星的坐标偏差 $\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij}$ 中减去系统误差 $\Delta x'_{ij}, \Delta y'_{ij}$.

本文对图 3 所示的检测结果进行了统计分析. 一般提取星像中心及光度等信息时不测量饱和星, 由于编号为 50 的星像在大部分图像中为饱和故剔除. 图 7 所示为检测结果中心位置的标准偏差. 从图中可看出, x 方向平均定位精度为 0.036 个像素, y 方向平均定位精度为 0.043 个像素, x 方向的定位精度略优于 y 方向; 有的星 x 方向精度高, 反而 y 方向的精度低. 有几颗星的精度不到 0.07 个像素, 从图像中得知, 这些星大都为暗星, 如编号为 45 的星, 它的 H 平均不到 300 DN; 或遭受临近星、噪声等的干扰, 如图 8 所示.



(a) x 方向



(b) y 方向

图 7 星像中心位置的标准偏差

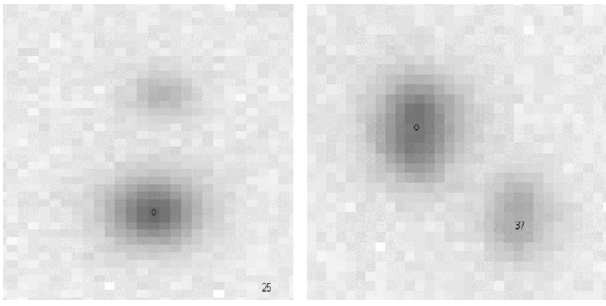


图 8 星图放大显示

4 结论

研究结果表明, 本文提出的基于数学形态学的星像自动搜索和将高斯函数取对数转化为线性拟合的星像中心精确定位算法是有效的, 实现了星像自动搜索与精确定位。基于数学形态学的自动搜索算法简单快捷, 有效地避免了噪声对搜索的干扰, 而滤除噪声不会影响对暗星的搜索, 可根据测量需要设定合适的阈值, 获得不同星等的星。传统的高斯拟合法需要对各个参数有个初始的估计值, 对初始位置的选取较为敏感, 若初始值选择不当其解可能发散。而本文采用的新的高斯拟合算法简化了拟合过程, 不存在上述问题, 平均定位精度达到了 $0.036 \sim 0.043$ 个像素, 与传统的高斯拟法定位精度相当。

致谢: 本文的工作得到了彭青玉教授的指导并使用了提供的图像资料, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Newell E B, Oneil E J Jr. Electrographic stellar photometry [J]. *Electrography and astronomical applications* 1974 1: 153-175.
- [2] McClure R D, Newell B, Barnes J V. PDS Photometry of the Open Cluster NGC 2420 [J]. *PASP*, 1978 90: 170-178.
- [3] Herzog A D, Illingworth G. The structure of globular clusters. I direct plane automated reduction techniques [J].

- Astrophysical Journal Supplement* 1977, 33 55
- [4] Butcher H. A main-sequence luminosity function for the Large Magellanic Cloud [J]. *Astrophysical Journal* 1977, 216 372-380.
- [5] Stetson P B. Photographic stellar photometry with the PDS microdensitometer [J]. *AJ* 1979, 84: 1056-1066.
- [6] 谢小君. CCD 图像星象自动搜索算法的设计与实现 [D]. 广州: 暨南大学, 信息科学技术学院, 2006.
- [7] 谢文忠. CCD 天文图像去噪和对象搜索算法的设计与实现 [D]. 广州: 暨南大学, 信息科学技术学院, 2007.
- [8] Auer L H, van Altena W F. Digital image centering (II) [J]. *AJ* 1978 83 531-537.
- [9] Chiu L-T G. Astrometric techniques with a PDS microdensitometer [J]. *AJ* 1977, 82 842-848.
- [10] Stone R C. A comparison of digital centering algorithms [J]. *AJ* 1989, 97: 1227-1237.
- [11] 季凯帆, 宋谦. CCD 图像的一维定心方法 [J]. *云南天文台台刊*, 1996(4): 69-74.
- [12] 季凯帆, 王锋. CCD 图像的二维修正矩定心方法 [J]. *天文学报*, 1996, 37(1): 85-90.
- [13] 涂玲玲. 基于 CCD 图像的几种定心算法的比较 [D]. 广州: 暨南大学, 信息科学技术学院, 2008.
- [14] Stetson P B. DAOPHOT-A computer program for crowded-field stellar photometry [J]. *ASP*, 1987 99: 191-222.
- [15] Costa G S D. Basic photometry techniques [J]. *ASP Conference Series* 1992, 23: 90-104.
- [16] Nobuyuki Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 1979, 9(1): 62-66.
- [17] Trier O D, Taxt T. Evaluation of binarization methods for document images [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence* IEEE Transactions on 1995 17(3): 312-315.
- [18] Zhang H, Jason E Fritts, Sally A Goldman. Image segmentation evaluation: A survey of unsupervised methods [J]. *Computer Vision and Image Understanding* 2007, 110 (2): 260-280.

A New Flexible Stellar Auto-Searching Algorithm

Wang Xian, Su Cheng-yue, Wang Ting-ting, Zhou Dong-yue

(Faculty of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract A stellar auto-searching algorithm, based on mathematical morphology, was proposed. Then a new centering algorithm—Gaussian Fit—was chosen to calculate the center of the stellar image. Real CCD images were used to test the algorithm. The measurement results show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words mathematical morphology; stellar-searching; Gaussian Fit