

基于一阶矩改进的太阳图像灰度质心算法

宋金虎¹, 张旭², 马大龙³, 窦智³

(1. 一汽奥迪销售有限责任公司, 杭州 310000; 2. 杭州汇萃智能科技有限公司, 杭州 310000;
3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要:提出了一种改进的基于一阶矩算法的太阳图像灰度质心计算方法。与一阶矩算法相比,新算法的像素误差减小了0.742 09 pixel。该算法首先采用梯度法消除太阳图像的背景噪声,然后将图像划分为与指定线对应的区域,在计算这些线的质心之后,最终利用简化质心点和一阶矩计算太阳图像的灰度质心。此外,给出了直线的最佳选择长度(88个点)和最佳间距(7.5°)。通过提取标准圆盘的质心,将该算法的提取精度与一阶矩法进行了比较,结果表明,该方法有效和准确的,可以在亚像素级别有效地提取二维图像灰度的质心。

关键词:梯度算法;线质心;一阶矩;二维图像质心算法

中图分类号: P353

文献标志码: A

文章编号: 1672-9870(2023)03-0107-06

An Improved Method to Calculate the Solar Centroid Based on First Moment

SONG Jinhu¹, ZHANG Xu², MA Dalong³, DOU Zhi³

(1.FAW AUDI Sales Company, Ltd., Hangzhou 310000;

2.Hangzhou Huicui Intelligent Technology Co., Ltd, Hangzhou 310000;

3.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract: An improved method to calculate the solar centroid based on the first moment is proposed in this study. The pixel error of the new algorithm is elevated at least 0.742 09 pixel compared with the first moment method. The gradient method is adopted to eliminate the background noise of solar image. Then, the image is divided into different regions which corresponded to designated lines. After the centroids of these lines are calculated, the centroid of solar image is calculated with these simplified points by first moment method. Furthermore, the optimal length (88 points) and space (7.5°) of the lines are figured out, and these two values can further improve the accuracy of solar centroid. In addition, the extraction accuracy of the proposed algorithm is compared with that of the first moment method by extracting the centroid of the standard disk. The results demonstrate that this method is available and exact and the algorithm can effectively extract the centroid of two-dimensional image at sub-pixel level.

Key words: gradient algorithm; linear centroid; first moment; 2-d image centroid

太阳观测图像灰度质心的准确提取对于空间探测器自校准都具有重要意义。论文提出了一种计算太阳图像灰度质心的算法,通过计算模

收稿日期: 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(42104166)

作者简介: 宋金虎(1986-),男,硕士,工程师, E-mail: jinhu.song@faw-vw.com

拟观测太阳图像以及来自地球静止轨道环境卫星(GOES)上太阳紫外线成像仪(SUVI)观测的太阳图像,验证了算法的准确性和有效性。该算法包括梯度算法、线中心计算方法和一阶矩算法。

传统的图像质心提取算法有重心法和基于重心法的扩展方法。Trebi等人^[1]提出了一种固定阈值求取质心的方法,用于提取太阳探测器观测太阳图像的质心。然而,该算法使用了经验阈值,没有考虑太阳亮度变化的影响。Yue等人^[2]在对太阳图像进行二值化和噪声预处理后,使用重心法计算太阳图像质心。然而,噪声预处理过程中的腐蚀和扩展运算可能会破坏太阳图像的边缘轮廓。Li^[3]基于OSTU阈值分割算法,使用重心法提取太阳图像质心坐标。Xing等人^[4]提出的太阳图像质心算法仍然基于重心法,该方法使用了图像相关算法来去除图像噪声。简而言之,重心法容易受到噪声的影响,尤其是带有阈值的重心法,图像质心的提取精度随阈值的变化而变化^[5]。此外,重心法要求被计算的太阳图像分布均匀且图像的对称性良好,否则,提取的图像质心的准确性将存在较大的误差。

矩方法被广泛应用于图像分类、模式识别和计算机视觉等图像处理和分析。对于二维连续图像, $p+q$ 阶矩 m_{pq} 和中心矩 u_{pq} 可以定义为:

$$\begin{aligned} m_{pq} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x,y) dx dy \\ u_{pq} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x,y) dx dy \end{aligned} \quad (1)$$

其中, p 和 q 是非负整数,对应离散数字图像。上述公式可改写为:

$$\begin{aligned} m_{pq} &= \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N i^p j^q f(i,j) \\ u_{pq} &= \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N (i - i_c)^p (j - j_c)^q f(i,j) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, (i_c, j_c) 是图像质心的坐标, $i_c = m_{10}/m_{00}$, $j_c = m_{01}/m_{00}$ 。因此,图像的质心可以用0阶矩和1阶矩表示^[6]。一般来说,前十个矩计算被广泛用于图像处理,同时,它们都具有实际的物理意义。

例如,第0矩(m_{00})表示物质的质量,第1矩(m_{10} 、 m_{01})表示物质的质心,第2矩(m_{20} 、 m_{02} 、 m_{11})可表示图像的回转半径。此外,第3矩(m_{30} 、 m_{03} 、 m_{12} 、 m_{21})可用于描述方向和倾角^[7]。Hu^[8]在前十个矩的基础上提出了一组不变矩,它具有平移、旋转和尺度不变性的特点。

自20世纪80年代以来,快速矩计算方法发展迅速。基于 δ 方法,将图像分成几行,然后图像的质心或矩是每条线的质心或矩的合成^[9-12]。利用格林理论 $\oint f(x,y) dx dy = \oint [M dx + N dy]$,可以将图像质心或矩函数的二重积分转换为图像边缘的单积分^[13-15]。此外,将图像表示函数进行转换,可以利用转换函数的独特性质来简化计算^[16-17]。在这些算法中,主要计算的是前3阶矩,因为第0阶矩和第1阶矩是最基本和最广泛使用的。因此,越来越多的研究学者关注质心坐标和前两个矩的快速计算问题^[18-20]。

论文中提出了一种改进的基于一阶矩的太阳图像质心计算方法。该方法包括梯度法、线质心法和一阶矩法。利用梯度法消除太阳图像的背景噪声,然后将图像分割成若干线后,计算线的质心。最后,基于线质心和一阶矩算法计算太阳图像质心。

1 方法与计算

提取太阳图像灰度质心的算法分为三个步骤。第一步是使用梯度法去除背景噪声。第二步是将图像分割成若干扇形区域,每个扇形区域按线段处理,并计算确定线的质心。最后,根据线段质心,通过一阶矩获得太阳圆盘质心。

1.1 去除背景

无论是地基太阳望远镜,还是天基太阳望远镜,观察到的太阳图像通常会受到其他杂散光的影响,例如仪器的背景噪声和其他光源的光。提取太阳图像质心的第一步就是消除这些影响。这里,以地面模拟观测的太阳图像为例,如图1所示。图像尺寸为1 024×1 024,对应于探测

器 CCD 像素的分布。文中采用梯度法消除背景噪声。如图 2 所示, 将图像分为 24 个区域, 将每个区域视为一条线, 并计算沿线的太阳强度分布。将图 1 所示的太阳图像, 按照图 2 的方式进行划分, 第一条线段的计算结果如图 3 所示, 绿色星号标记的是该线段的质心, 两个红色星号表示的是通过梯度法计算的边界。同理, 使用该方法, 计算出了 24 对边界。然后, 通过消除分布在红色垂直线之外的灰度值来去除背景噪声。

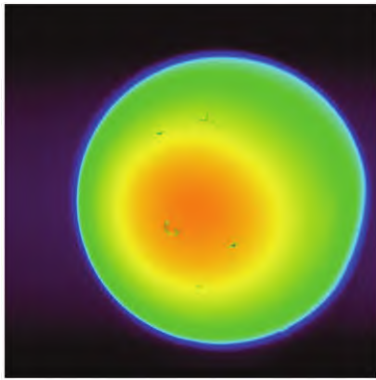


图 1 地面模拟观测的太阳图像

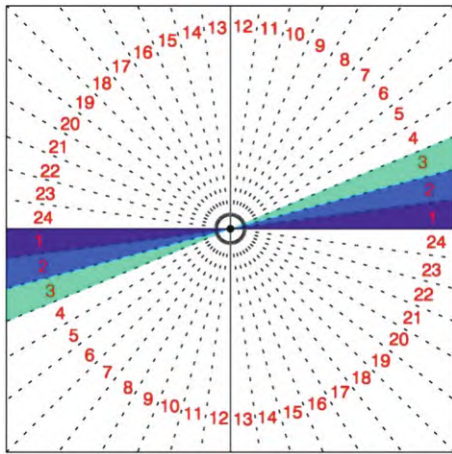


图 2 将图像分为 24 个区域的示意图

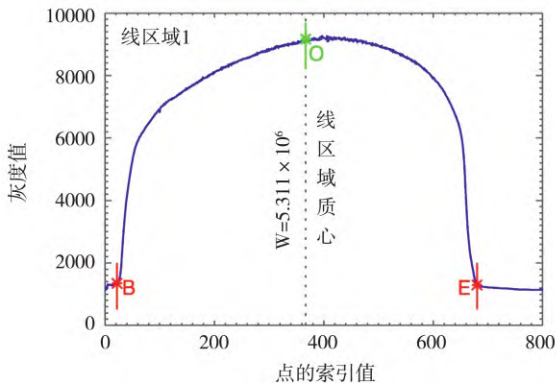


图 3 图像第一条线段质心的计算结果

1.2 线中心

去除背景噪声后, 计算图 2 中每条线段质心的权重和坐标。如图 3 所示, 以线段 1 为例(图 2 中两块紫色区域), 将线段 1 分为 800 段, 每段的值为相应区域内点灰度值的平均值。任意将线段划分为 800 份, 对于划分的数量对最终计算结果的影响, 论文后续会有讨论。根据 B 和 E 之间的值确定该线段的权重 (5.311×10^6) 和坐标 (x_1, y_1)。图 4 给出了利用该方法计算的 24 条线段的质心(包括权重和坐标)。此外, 线的数量的选取也将在后面讨论, 这些质心点将用于确定最终的太阳图像灰度质心。

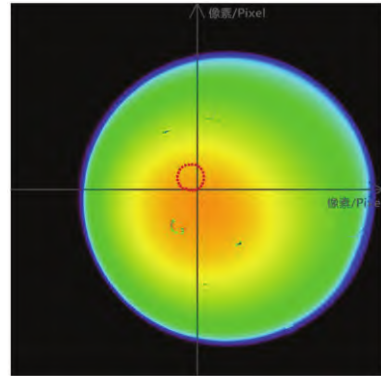


图 4 24 个线质心的分布

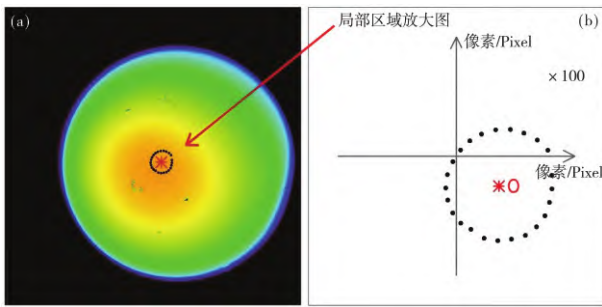
1.3 太阳中心

为了清晰直观地描述基于上述 24 个线质心计算最终太阳图像质心的过程, 图 4 中的 24 个线质心附近区域在图 5(b)中放大了 100 倍。24 个黑点表示 24 条线段的质心。假设这些点的坐标为 (x_n, y_n) , 其中 $n=1, 2, 3, \dots, 24$, 太阳图像质心位于 (x_0, y_0) 。根据一阶矩定理, (x_0, y_0) 可以表示为:

$$x_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot w(x,y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(x,y) dx dy} \tag{3}$$

$$y_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y \cdot w(x,y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(x,y) dx dy} \tag{4}$$

最终, 图 5(a) 和图 5(b) 中的红色星号是使用上述算法提取的太阳图像质心。

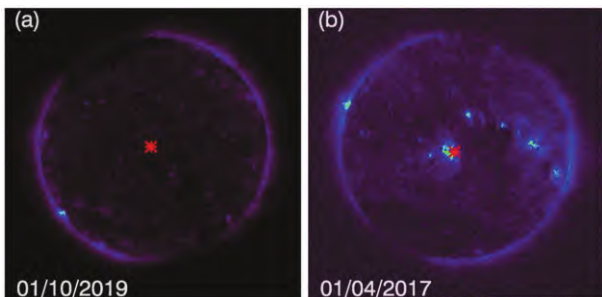


(a) 24个线质心的分布 (b) 局部区域放大图

图5 由线质心计算图像质心的放大图

2 算法验证

为了验证该算法的有效性,将该方法用于提取地球静止轨道环境卫星(GOES)上太阳紫外成像仪(SUVI)观测到的太阳图像。SUVI是一台工作在极紫外波长范围(9.4 nm、13.1 nm、17.1 nm、19.5 nm和30.4 nm)内监测太阳的望远镜。它观测并描述了太阳的复杂活动区域、太阳耀斑和可能引起日冕物质抛射的太阳细丝爆发。19.5 nm的太阳图像如图6所示,观测时间分别为2019年10月1日(图6(a))和2017年4月1日(图6(b)),红色星号是利用上述算法提取的太阳图像灰度质心。与2019年10月1日观测的太阳图像相比,2017年4月1日太阳相对活跃。这两个具体的观测实例表明,无论太阳是宁静状态还是相对活跃状态,该算法都可以有效地提取太阳图像质心。

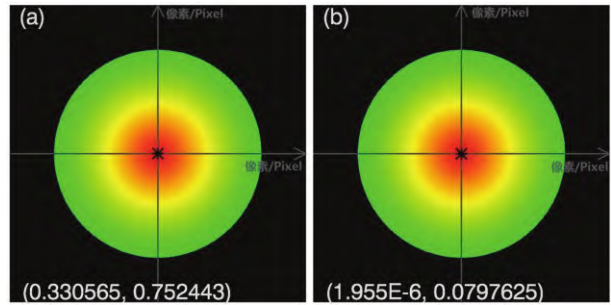


(a) 宁静状态的太阳图像 (b) 相对活跃状态的太阳图像

图6 由文中算法计算的真实太阳图像的质心

同时,为了进一步验证算法的提取精度。文中模拟了一个标准圆盘代替太阳来验证算法。标准圆盘如图7所示,标准圆盘质心的理论值坐标为(0,0)。分别用一阶矩法(图7(a))和文中

所提算法(图7(b))提取了太阳图像质心,由图中两个红色星号表示。太阳质心的坐标在图7(a)和图7(b)的左下角给出。可以看出,与一阶矩法相比,新算法的像素误差减小了0.742 09 pixel,精度提高了90.29%。在算法计算过程中,将太阳圆盘分割成的线段数量将影响最终提取质心的精度。



(a) 一阶矩的计算结果 (b) 文中算法的计算结果

图7 标准圆盘的质心提取结果对比

表1给出了在不同划分情况下的提取质心结果。基于标准圆盘进行计算,质心由x坐标和y坐标给出,R表示提取的质心与真实几何中心之间的欧拉距离。结果表明,在满足计算精度的前提下,选取48条直线是合理的,对应的线间距为7.5°,直线的最佳选择长度为88个点。

表1 不同线区域个数划分情况下的提取质心结果

线区域个数	横坐标/Pixel	纵坐标/Pixel	距离/Pixel
12	1.59064E-06	8.04504E-02	8.04504E-02
24	1.95512E-06	7.97625E-02	7.97625E-02
36	2.50437E-06	7.96362E-02	7.96362E-02
48	2.76561E-06	7.95921E-02	7.95921E-02
60	2.95543E-06	7.95719E-02	7.95719E-02
72	3.39368E-06	7.95610E-02	7.95610E-02
84	3.60058E-06	7.95543E-02	7.95543E-02
96	3.25417E-06	7.95500E-02	7.95500E-02
108	3.72067E-06	7.95470E-02	7.95470E-02
120	2.75566E-06	7.95449E-02	7.95449E-02
132	4.40137E-06	7.95434E-02	7.95434E-02
144	3.22374E-06	7.95424E-02	7.95424E-02
156	4.93807E-06	7.95418E-02	7.95418E-02
168	4.45580E-06	7.95413E-02	7.95413E-02
180	4.33745E-06	7.95405E-02	7.95405E-02
192	3.91589E-06	7.95397E-02	7.95397E-02
204	5.20670E-06	7.95397E-02	7.95397E-02

续表1

线区域个数	横坐标/Pixel	纵坐标/Pixel	距离/Pixel
216	2.82454E-06	7.95391E-02	7.95391E-02
228	6.11575E-06	7.95394E-02	7.95394E-02
240	3.63794E-06	7.95389E-02	7.95389E-02
252	5.27809E-06	7.95389E-02	7.95389E-02
264	2.63951E-06	7.95381E-02	7.95381E-02
276	4.39874E-06	7.95380E-02	7.95380E-02
288	3.17459E-06	7.95380E-02	7.95380E-02
300	3.67976E-06	7.95379E-02	7.95379E-02
312	3.11228E-06	7.95382E-02	7.95382E-02
324	3.66157E-06	7.95373E-02	7.95373E-02
336	3.60627E-06	7.95378E-02	7.95378E-02
348	4.84651E-06	7.95372E-02	7.95372E-02
360	6.13278E-06	7.95394E-02	7.95394E-02

3 结论

上述实验表明,该算法与一阶矩算法相比,提取的太阳图像质心精度有所提高。由于该算法将图像分割成若干线段,从而大大提高了该方法的运算速度。论文中使用的实验数据是基于地面模拟观测太阳图像计算的,同时也验证了该方法对已经在轨观测到的太阳图像灰度质心计算的适用性。进一步引申可以得出,该算法适用于提取任何二维图像质心。

总之,论文给出了一种改进的基于一阶矩法的太阳图像灰度质心计算算法。本研究基于地面模拟观测太阳图像展开,同时,使用SUVI/GOES拍摄的真实太阳图像验证了该算法的可行性。此外,通过模拟一个标准圆盘代替太阳来计算太阳质心,并将该算法的质心提取精度与一阶矩法的计算结果进行了比较。结果表明,与一阶矩法相比,该算法的精度提高了90.29%。如果将太阳圆盘分割成更多的线段,则提取精度将进一步提高。实验表明,在满足计算精度的前提下,选择48条线段是合理的。通过类比,该算法可以用于提取任何二维图像的质心。具体计算步骤如下:

(1)使用梯度方法去除图像背景噪声,这一步可以与第二步同时完成。

(2)将图像分成若干线段,并计算确定线段的质心。

(3)基于线段质心,使用一阶矩法计算太阳图像灰度质心。

参考文献

- [1] TREBI O A, HUNTSBERGER T, CHENG Y, et al. Design and analysis of a sun sensor for planetary rover absolute heading detection [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 17(6): 939-947.
- [2] YUE F Z, CUI P Y, CUI H T, et al. Algorithm research on lunar rover autonomous heading detection [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006, 27(3): 501-504.
- [3] LI J G. Technical research on lunar rover position and attitude determination [M]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [4] XING F, YOU Z, ZHANG G, et al. A novel active pixels sensor (APS) based sun sensor based on a feature extraction and image correlation (FEIC) technique [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(12): 1-9.
- [5] ARES J, ARINES J. Influence of thresholding on centroid statistics: full analytical description [J]. Applied Optics, 2004, 43(31): 5796-5805.
- [6] WANG B, ZHI Q C, ZHANG Z X, et al. Computation of center of mass for gray level image based on differential moments factor [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(10): 1360-1365.
- [7] SINGER M. A general approach to moment calculation for polygons and line segments [J]. Pattern Recognition, 1993, 26(7): 1019-1028.
- [8] HU M K. Visual pattern recognition by moment invariants [J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962, 8(1): 179-187.
- [9] ZAKARIA M F, VROOMEN L J, ZSOMBOR M P L A, et al. Fast algorithm for the computation of moment invariants [J]. Pattern Recognition, 1987, 20(6): 639-643.
- [10] DAI M, BAYLOU P, NAJIM M. An efficient algorithm for computation of shape moments from run-length

- codes or chain codes [J]. *Pattern Recognition*, 1992, 25 (10): 1119–1128.
- [11] LI B C. A new computation of geometric moments [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(1): 109–113.
- [12] WANG B, LIU X X, GENG G H, et al. A new fast algorithm for geometric moments based on compensating principle [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2003, 40(7): 1042–1048.
- [13] PHILIPS W. A new fast algorithm for moment computation [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(11): 1619–1621.
- [14] LI B C, SHEN J. Fast computation of moment invariants [J]. *Pattern Recognition*, 1991, 24(8): 807–813.
- [15] YANG L, ALBREGTSEN F. Fast and exact computation of Cartesian geometric moments using discrete Green's theorem [J]. *Pattern Recognition*, 1996, 29(7): 1061–1073.
- [16] FU C W, YEN J C, CHANG S. Calculation of moment invariants via Hadamard transform [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(2): 287–294.
- [17] BELKASIM S, KAMEL M. Fast computation of 2-D image moments using biaxial transform [J]. *Pattern Recognition*, 2001, 34(9): 1867–1887.
- [18] LUAN X, ZHU T. Fast algorithm for searching centroids of 2D arbitrary object [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1999, 4(5): 372–376.
- [19] SONG K O, HUANG F G, ZHU T Y. A fast interactive decent algorithm for searching centroids of objects in binary image [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1994, 7(2): 143–149.
- [20] SONG K O, HUANG F G, LAN X T. A fast algorithm for searching and tracking object centroids in binary image [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1998, 11(2): 161–168.