文章编号:1001-5078(2013)05-0518-04 ·红外技术及应用·

多步长最小能量差法恒星亚像素质心计算

韩艳丽[1],刘 峰[2],王 铎[2],张 健[1]
(1. 海军航空工程学院控制工程系,山东 烟台 264001;2. 海军航空工程学院研究生管理大队,山东 烟台 264001)

摘 要:恒星质心的确定对天文导航起着至关重要的作用,白天拍摄的近红外恒星图像,由于极强的天空背景,信噪比极低,恒星目标基本被淹没在背景中,给质心定位带来极大的麻烦。传统的一阶矩法、加权质心法计算简单但是误差较大,尤其在低信噪比条件下。高斯曲面拟合法虽然定位精度较高,但计算复杂。分析恒星成像时能量的分布,提出基于多步长最小能量差的质心定位方法,该方法使用线性叠加缩小质心区域,利用恒星能量分布的对称性,基于试探性质心寻找,求取能量差值的最小值进行质心位置计算,并采用模拟星图验证比较,实验表明,该方法定位精度可达0.001 pixel,对低信噪比条件下的质心计算具有较好的效果。

关键词:能量分布;多步长;最小能量差;亚像素;质心计算
中图分类号:TP391.41 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.05.010

Star sub-pixel centroid calculation based on multi-step minimum energy difference method

HAN Yan-Li[1], LIU Feng[2], WANG Duo[2], ZHANG Jian[1]
(1. Department of Control Engineering, Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Postgraduate Training Brigade, Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: We analyzed the energy distribution in stellar image, and proposed a star target centroid location method based on multi-step minimum energy difference. This method uses the linear superposition to narrow down the centroid area, tries to find the centroid by using the symmetry of the stellar energy distribution, and determines the centroid location when the minimum energy difference appears. And it is compared with the simulated star images. Experiments show that the positioning accuracy of the method is up to 0.001 pixel. It has good effect in calculating the centroid under low SNR conditions.

Key words: energy distribution; multi-step; minimum energy difference; sub-pixel; centroid calculation

1 引 言

利用恒星进行天文导航的过程可分为星图像预处理、星像点质心提取、星图识别和姿态确定四个步骤。其中质心提取的精度将直接影响定位精度,对天文导航算法具有十分重要的意义。恒星质心定位[1]一般可分为基于灰度的和基于边缘的两大类。基于灰度的质心定位常利用恒星成像的灰度分布信息,传统的方法有一阶矩法,质心法、改进的质心法、曲面拟合法等。基于边缘的方法则是利用目标的边缘形状信息,常用的方法有边缘圆拟合、Hough变换等。实际恒星成像像点的灰度分布近似符合二维高斯分布[2],尤其是红外图像存在信噪比低,对比度差的问题[3],边缘较模糊,背景主要是大面积缓慢变化的低频成分[4],宜采用基于灰度的方法进行质心定位。

亚像素级的质心定位技术按处理手段不同可划分为插值技术和拟合技术两类[5]。插值技术易于

作者简介:韩艳丽(1965-),女,教授,硕士生导师,主要研究领域为图像处理,目标识别,光电技术等。E-mail:18660516626@163.com
收稿日期:2012-10-10

实现,但对峰值两侧弱信号依赖性较强,并且抗噪声干扰能力弱;而拟合方法过程复杂,但精度较高。在实际应用中多采用插值的方式进行星点的质心定位,文献[3]通过分析指出,恒星质心定位的误差主要来源于系统误差和随机误差两大类,并指出了目标区域窗口的选择对于质心定位精度具有重大影响。文献[6]分析了不同插值方法对质心定位精度的影响,得出线性插值是较好的插值方法,并且指出,插值点取2~5个即可在一定程度上提高质心定位精度,无限制的插值是不必要的。基于此,本文在分析恒星能量分布的基础上,提出了具有抗噪声干扰能力的基于能量差值的质心定位方法。

2　最小能量差

无论是白天还是夜间拍摄到的恒星图像,反映在图像上,恒星的能量分布都是服从高斯分布的,因此,最小能量差理论的基本思想是:从能量的角度分析,恒星能量是相对于质心对称分布,且离质心越近,能量越大。采用红外相机进行恒星成像,所得图像的像素灰度值与物体的能量成比例关系。在确定恒星质心时,可以先假设某一点(x,y)是质心点,若该点不是质心位置,则关于这一点的恒星能量分布是不对称的,在某一方向上(方便起见,常选取横向或纵向)会存在一定的能量差值,可通过对比该方向的多步长(以降低噪声的干扰)的能量差,来判定该点是不是质心位置,当求取的能量差达到最小时,即可定位质心位置。具体表达如下:

$$\Delta I_x = \left| \sum_{i=1/N}^{l_{\text{left}}} I(x-i,y) - \sum_{i=1/N}^{l_{\text{right}}} I(x+i,y) \right|$$

$$\Delta I_y = \left| \sum_{i=1/N}^{l_{up}} I(x,y+i) - \sum_{i=1/N}^{l_{\text{down}}} I(x,y-i) \right|$$

其中,$I(x,y)$为点(x,y)处的能量;N为插值点个数;ΔI_x为确定x点处为质心位置时,x方向上质心两侧l步长上的能量差值;ΔI_y为确定y点处为质心位置时,y方向上质心两侧l步长上的能量差值;l_{up},l_{down},I_{left},I_{right}分别为上、下、左、右方向的步长,其值的选择依赖于质心区域的大小及插值点的确定,并且l_{up}与l_{down},I_{left}与I_{right}大小分别相等。确定最小的ΔI_x,ΔI_y值,即可确定出质心位置(x,y)。

3　亚像素质心计算

理想的光学系统条件下,恒星成像点小于一个像元,无法通过算法准确定位到亚像素级质心位置,但是由于诸多因素如光学相差,大气传输等的影响,恒星成像一般是一个弥散斑,该弥散斑灰度分布服从高斯分布,基于此,对模拟生成星图进行线性插值。在计算质心的过程中,可先确定出质心区域,进一步减少计算量;然后在质心区域进行能量差值计算,找出最小差值时的质心位置。具体步骤如下:

第一步:质心区域的确定。对生成的星图,先每一列像素值相加,取出最大的1列,然后再每一行像素值相加,取出最大的1行,以像素值最大列和最大行的交点像元作为中心,形成一个3×3大小区域,以该区域为核心区域,在核心区域内进行亚像素的构造,这样可减小计算量,加快确定亚像素质心位置的速度。

第二步:亚像素质心定位。通过在核心区域内进行多步长最小能量差计算质心提取。要进行亚像素级的质心位置确定,首先将图像中的每一个像素点人为地放大,假设所有的像素点占有一定的平面面积,然后根据实际定位精度需求,将放大后的像素点进行细分,即每一个点可看作由若干个更小的点均匀组成,文中根据定位精度和实际情况,将每个点均匀分成4个更小的点[7],插值后(m,n)处的灰度值$f(m,n)$计算如下[5]:

$$f(m,n) = f(i,j)(1-\alpha)(1-\beta) + f(i+1,j)\cdot\alpha(1-\beta) + f(i,j+1)(1-\alpha)\beta + f(i+1,j+1)\alpha\beta$$

其中,$\alpha = \dfrac{x_m - x_i}{x_{i+1} - x_i}$,$\beta = \dfrac{y_n - y_j}{y_{j+1} - y_j}$。

具体计算如图1所示,假设$P_0(x_0,y_0)$点为质心,l_{right}为右侧步长,则计算l步长的图像像素灰度和即为质心右侧能量和(左侧能量和的计算方法相同),通过比较对称方向的能量和之差,进而确定出质心位置。

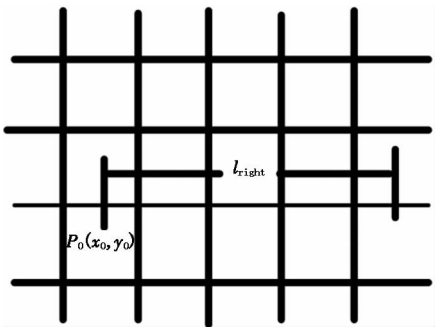

图1　多步长灰度和示意图

Fig. 1　multi-step sum value of gray

4　仿真实验及结果分析

对于真实的图像数据,其定位精度无法直接评判,为验证方法的有效性及准确性,通过生成仿真图像进行不同噪声条件下,不同质心定位方法的定位精度及稳定性分析。仿真数据星像大小为[20,20]像元,采用高斯分布生成仿真图像,图像中噪声采用高斯白噪声,如图2和图3所示。

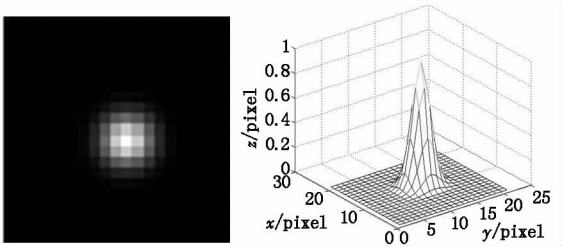

图 2 仿真星像图像

Fig. 2 simulation of single star image

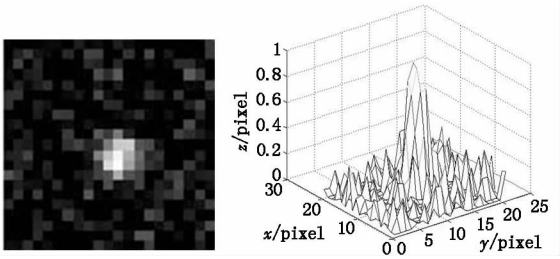

图 3 加入高斯白噪声星像图像

Fig. 3 simulated single star image with Gaussian noise

以左上角为坐标原点,星象中心坐标(11,11),插值点数为 5[7],在不同的信噪比条件下,采用一阶矩质心定位法、平方加权质心定位法、高斯曲面拟合法及基于多步长最小能量差方法分别计算定位精度,采用 40 次定位误差的均值作为该算法的估计误差,结果如表 1 所示。从中可以看出,高斯拟合在高信噪比情况下精度最高,而本文的算法较适合低信噪比条件下的质心定位。

表 1 不同信噪比条件下定位精度比较

Tab. 1 calculates of positioning precision with different SNRs

质心计算方法	信噪比	
	SNR = 3	SNR = 9
一阶矩质心法	0.171	0.041
平方加权质心法	0.124	0.092
高斯曲面拟合法	0.149	0.018
多步长最小能量差法	0.125	0.025

5 恒星图像亚像素质心计算

图 4 为使用近红外小口径相机,早上 6:45 拍摄的北极星 2 等星图像连续 15 帧叠加以后的图像,设备位于固定观测点。可以看出,即使叠加星图在一定程度上增大了信噪比,星图的信噪比仍然很低(SNR = 2.15),目标区域边缘与背景界限不很明显,图像大小为 340 × 340 像元。根据成像设备的大地坐标和探测时刻的光轴指向(方位 0°,俯仰 43°),并考虑到设备测角系统误差,通过计算得到的该 2 等北极星位于图像中(191.287,183.943)点处(没有去除设备测角误差),使用本文算法计算恒星质心位置为(191.712,183.725)。图 5 为提取质心位置后的星图,虚线十字丝交点为理论质心点位置,实线十字丝交点为本文算法结果。

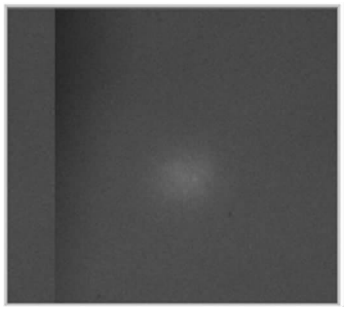

图 4 连续 15 帧叠加近红外星图

Fig. 4 original star image

(a) 确定质心星图 (b) 质心区域放大 100 倍图

(a) centroid star image (b) enlarged 100 size centroid image

图 5 提取值心位置后的星图

Fig. 5 star image after extracting centroid position

6 结 论

恒星质心的定位精度直接影响到天文导航星的匹配和定位精度,在天文导航中起着至为重要的作用。分析了恒星成像时的能量分布,利用高斯分布的特性,采用线性插值方式提高定位质心的精度,提出基于分布特点的多步长最小能量差恒星质心定位方法,仿真实验验证该方法可有效提高定位精度,计算简单,在低信噪比条件下,可较精准地定位恒星质心位置。最后使用该方法对实际拍摄到的 2 等北极星近红外星图进行质心定位,并与理论质心位置进行比较,在计算恒星理论质心位置时,并没有事先检测设备测角误差,而是直接按照出场指标进行计算,所以存在一定的偏差,但影响不大。通过比较,最小能量差方法可较精准地进行质心定位。

参考文献:

[1] Shortis M R, Clarke T A. A comparison of some technique for the subpixel location of discrete target images[J]. SPIE, 1994, 2350: 239 - 250.

[2] Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on

Gaussian distribution[J]. Optics and Precision Engineering,2009,17(7):1672 - 1677. (in Chinese)
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.

[3] Bai Junqi,Zhao Chunguang,Wang Shoufeng,et al. Adaptive wiener filtering noise reductionininfrared images[J]. Opto-Electronic Engineering,2011,11(38):79 - 85. (in Chinese)
白俊奇,赵春光,王寿峰,等. 红外图像中的自适应维纳滤波噪声抑制技术[J]. 光电工程,2011,11(38):79 - 85.

[4] Wan Ming,Zhang Fengming,Hu Shuang. Novel infrared dim and small target detection algorithm based on multi-scale gradient[J]. Acta Optica Sinica,2011,10(31):1011001 - 1 - 011001 - 6. (in Chinese)
万明,张凤鸣,胡双. 基于多步长梯度特征的红外弱小目标检测算法[J]. 光学学报,2011,10(31):1011001 - 1 - 1011001 - 6.

[5] Sun Jinqiu,Zhou Jun,Zhang Zhen,et al. Centroid location for space targets based on energy accumulation[J]. Optics and Precision Engineering,2011,19(12):3043 - 3048. (in Chinese)
孙瑾秋,周军,张臻,等. 基于能量累加的空间目标星相质心定位[J]. 光学 精密工程,2011,19(12):3043 - 3048.

[6] Zhang Chunhua. Research of sky background image dim-small target motion detection technology[D]. Yantai: Aeronautical and Astronautical University,2009. (in Chinese)
张春华. 星空背景图像弱小目标运动检测技术研究[D]. 烟台:海军航空工程学院,2009.

[7] Wang Xuewei,Zhang Chunhua,Zhao Zhao,et al. High accuracy centroid calculation of low SNR star image[J]. Infrared Technology,2009,31(6):342 - 347. (in Chinese)
王学伟,张春华,赵钊,等. 低信噪比星像质心定位算法分析[J]. 红外技术,2009,31(6):342 - 347.