

文章编号 1004-924X(2011)10-2494-06

多步变权重复合的通用星点聚心

刘太阳¹, 王仕成^{1*}, 刘志国²

(1. 第二炮兵工程学院 科研部, 陕西 西安 710025;

2. 第二炮兵工程学院 301 教研室, 陕西 西安 710025)

摘要:为了解决星敏感器星点质心定位中对过曝光星象的聚心问题,提出一种通用的星象聚心算法。采用先对局部星象区域进行初步计算,进而通过整体复合实现对所有星象的质心定位。首先,结合实拍星图介绍了想象的过曝光星象存在及区域分布;在分析其分布特性的基础上检测各行/列的过曝光区域尺度,根据与尺度相关的规则对相应点的灰度值进行空间缩放;然后利用质心平方加权法对缩放后的点值进行计算,得出局域的初步结果;进而结合过曝光区域的尺度对相应初步计算结果分配权值因子;最后,对全部结果进行复合得到最终结果。实验结果表明,采用提出的算法在全随机模拟情况下,当随机噪声强度达到 30 pixel 时,对星象的聚心精度依然优于 0.05 pixel,能够满足实际应用中聚心算法的精度和适应的要求。

关键词:星敏感器;星点聚心;过曝光区域检测;点值缩放;变权重复合

中图分类号:V448.22 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111910.2494

Universal star centroiding with stepping variant weighting integration

LIU Tai-yang¹, WANG Shi-cheng^{1*}, LIU Zhi-guo²

(1. Department of Technology, HongQing High-Tech Institute, Xi'an 710025, China;

2. 301 Faculty Room, HongQing High-Tech Institute, Xi'an 710025, China)

* Corresponding author, E-mail: wsc@vip.163.com

Abstract: In order to solve the centroiding problem of an over exposed star in star image processing, a universal centroiding algorithm was proposed with "first local calculation and then comprehensive integration". First, the existence of the over exposure stars was confirmed with real star images. Then, by analyzing the grey distribution of over exposed stars, the over-exposure scale of every row/column was detected according to the corresponding grey value and the square weighted mass centroiding was applied to calculation of primary local results. Finally, an over-exposure scale related to scaling scheme was used again to decide corresponding weights of local results and the final result was obtained after a last integration. The simulation results prove that in an all-random experiment mode the final centroiding accuracy has be better than 0.05 pixel even the random noise is 30 pixel. The proposed algorithm is validated to be competent and could satisfy the demand of the centroiding algorithm for the high-accuracy and good adaptability in real applications.

收稿日期:2010-11-15;修订日期:2011-02-15.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA7050411)

Key words: star sensor; star centroiding; over-exposure detection; grey value scaling; variant weighted integration

1 引言

星敏感器是目前精度最高的姿态敏感器件,其软件算法即星图匹配已成为该领域的研究热点^[1],而其中,对星点的检测及星象质心的定位尤为关键^[2]。当前对星象进行定位聚心的算法主要有空间曲面拟合法^[3-5]和质心法^[6-7](及其改进算法)两类。空间曲面拟合算法主要应用高斯模型作为星点能量扩散函数(Point Spread Function, PSF)模型,相比于质心法,其具有更高的精度但计算量相对较大;质心法及其改进算法^[8](如平方加权质心法等)具有运算简洁的优点,在某些情况下能取得与高斯拟合法相当的计算精度,但该方法对高频噪声比较敏感。根据相关文献资料报道,目前一般情况下的星象聚心算法的精度可以达到1/10 pixel,而在一定情况下精度可以达到1/20 pixel左右^[3,9]。

然而,目前绝大部分星心定位算法均假定星象正常完整无畸变,即星点 PSF 为一近似高斯空间曲面。而根据星敏感器的工作原理^[10],其在实际的星图成像中很难避免像元饱和现象,因而造成中心区域过曝光现象。而且,为尽可能敏感数目较多的星点,往往会在一定范围内延长曝光时间,从而对于某些亮星来说会产生过曝光效应。此时星图中星点区域(Region of Interest, ROI)的灰度分布与正常分布差别较大,并直接导致传统算法的性能下降。为此,本文以简洁的平方质心算法为基础,探讨能够适应此类情况的通用的星心定位算法。文章首先对过曝光星象的区域分布特性进行研究,并提出采用过曝光区域检测、区域点值空间缩放以及变权重复合处理等措施解决此问题,最后通过仿真试验对算法进行验证。

2 过曝光条件下的星象

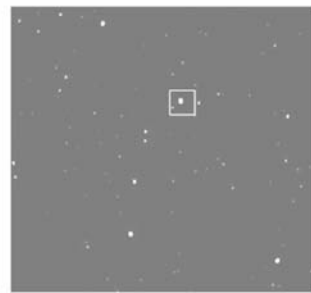
一般情况下,通常采用高斯空间曲面模型表征星点成像区域的灰度分布^[3]。其典型的方程形

式为:

$$p(x_i, y_j) = A \exp\{-[(x_i - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2]/B\} \quad (1)$$

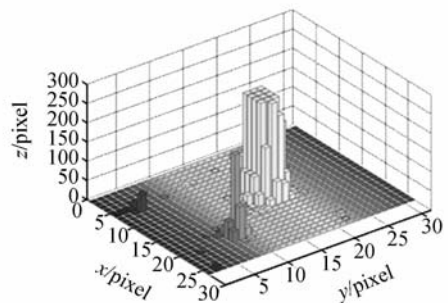
式中, (x_0, y_0) 为曲面中心位置,即星点的理想位置。 A 为曲面峰值参数,与星等和星敏感器曝光时间等硬件因素有关; B 为与高斯曲面形状有关的参数,与星敏感器的散焦设计有关;高斯曲面下的体积以一定关系与星等对应。显然,其在理论上是一个对称的曲面。

而在过曝光条件下,积分时间的变长使得视场中暗星成像更为充分,也使得相应的亮星成像过度,从而会产生星点曲面的畸变。如图1所示,图1(a)为实拍星图,可以明显看出过曝光特性;图1(b)为对应标示区域的空间灰度分布。



(a) 实拍星图

(a) Real star image



(b) 三维空间分布

(b) Grey distribution

图1 过曝光星象

Fig. 1 Over exposed star

结合相应硬件工作原理可知,产生此类现象的原因在于过长的积分时间设置使得亮星高斯模型的实际峰值已经超过了 255,于是最终得到的数据则是一个被灰度值“高度”为 255 的平面切割过的高斯曲面。

图 2 显示过其曲面顶点的纵剖面示意图, x 轴向上与曲面中心,亦即过曝光区域(Over-exposed Region, OER)中心,相距超过 d 的点灰度值 < 255 ,且具有实际代表意义。

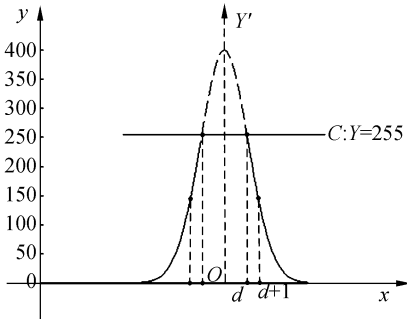


图 2 曲面的纵剖面

Fig. 2 Vertical interpolation of the curve

显然,此时整个星点区域的灰度值空间曲面严重畸变,已经不适合应用普通的聚心算法,而试验结果也表明会产生较大的误差。为此,本文希望通过考察处理 OER 相应的信息及物理意义,挖掘其在质心定位中的价值,以平方加权质心法为基础,结合相应的改进措施来解决此类问题。

3 多步变权重复合的过曝光星象聚心

3.1 总体思想

算法的总体思想为:首先对星点 ROI 区域进行逐行/列检测,判断其是否存在 OER 特征(或是否被 OER 区域侵蚀);若不存在 OER 特征,则以普通平方加权质心法计算出本行/列数据的初步结果;若存在 OER 特征,则检测 OER 尺度,对区域内像素点灰度值进行与距 OER 中心距离相关的空间缩放,再以平方加权质心法计算初步结果;最后,对于各行/列得出的结果,再采用与各行/列 OER 尺度相关的加权复合算法进行处理,从而得到最终结果,算法的流程图如下图 3 所示。

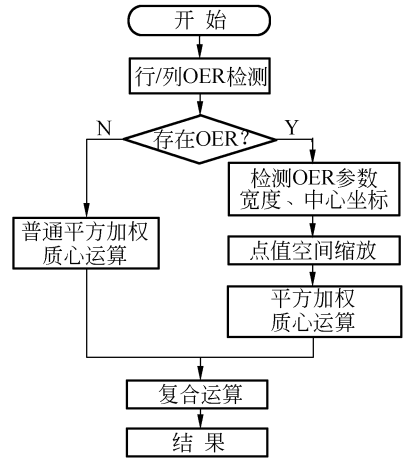


图 3 多步变权重复合的算法原理流程

Fig. 3 Algorithm flow of the scheme

可见在局部运算中,算法意图依据一定规则对像素点灰度值进行反向推导调整以增加其“中心点”位置的意义;而在综合复合中,算法亦期望进一步体现“中心区域”的重要性。总体来说,本方法是一种直观的、结合 OER 区域参数的权重调整。

3.2 结合过曝光区域中心距离的点值缩放

以对星点质心坐标 (x_0, y_0) 中为例对算法进行叙述。结合 Matlab 矩阵数据格式,横向坐标(列)对应 y ,纵向坐标(行)对应 x 。

3.2.1 OER 中心确定

对于一行(设为第 i 行)具备 OER 特征的数据 $P, P = [p_j, j = 1, 2, \dots, m]$, m 为数据向量长度。设 OER 区域下标范围为 $[L_1, L_2]$, 即:

$$\begin{cases} p_j = 255, L_1 \leq j \leq L_2 \\ p_j < 255, \text{else} \end{cases}, \quad (2)$$

则使 OER 中心点的坐标 $L = (L_1 + L_2)/2$, 其宽度 $d_i = |L_1 - L_2|$ 。

3.2.2 缩放因子的确定

得出 OER 中心坐标 L , 对于点 $P(j)$, 计算其与中心距离

$$d = |j - L|, \quad (3)$$

再采用下式对点值进行缩放:

$$P(j) = P(j) \cdot \frac{\epsilon + d}{1 + d}, \quad (4)$$

式中, ϵ 为一调整因子,具体根据实际情况确定。

然后结合平方加权质心法计算本行对应质心坐标 y_0^i 。为节省篇幅起见,不再列出具体计算公式,具体可参考相应文献。

3.3 结合过曝光区域尺度的复合计算

在得出各行计算出的结果 y_i^0 后,采用以下方案对结果进行复合:对于参与计算的 n 行数据,分别检测计算其过曝光区域宽度 d_i ,计算总体过曝光宽度参数 D :

$$D = \sum_{i=1}^n d_i, \tag{5}$$

令第 i 行计算结果在复合中对应的权重为:

$$h_i = \frac{i + d_i}{n + D}, \tag{6}$$

最终计算结果

$$y_0 = \sum_{i=1}^n y_i^0 \cdot h_i, \tag{7}$$

x 方向上的求解可按类似方式进行。

4 仿真实验与结果

为对文中算法进行验证,在 MATLAB 环境下进行了仿真试验。首先,采用全随机生成的方式模拟星点,参数 (A, B, x_0, y_0) 中, A 为 100 到 455 之间的随机数, B 值取 1.0, (x_0, y_0) 随机生成; ϵ 取值 3; 加入均值为 0 的高斯噪声(方差设置见表格), 试验 1 000 次得到的结果如表 1 所示。

其中,高斯噪声方差为 5 时对应的 x 、 y 轴误差分布情况如图 4 所示(图中横坐标 n 表示试验次数,纵坐标 pixel 表示误差单位)。

表 1 全随机模式下的算法误差统计

Tab.1 Error distribution in random mode (pixel)

高斯噪声方差	X 轴平均误差	Y 轴平均误差
5	0.010 4	0.012 7
10	0.012 9	0.019 8
15	0.014 2	0.023 5
20	0.017 0	0.029 3
25	0.019 9	0.033 3
30	0.020 6	0.040 0
50	0.028 8	0.056 9

为进一步检验算法,在固定位置(67.506 5, 41.556 9)生成随机星点信息,其他参数不变,结合不同强度的噪声再统计算法性能,得到结果如表 2 所示。

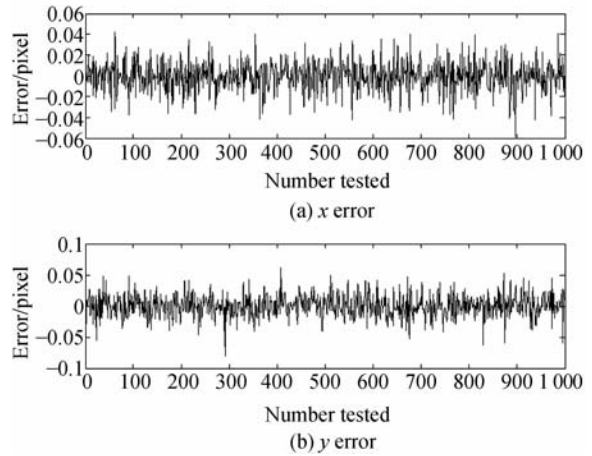


图 4 全随机时误差分布结果

Fig.4 Error distribution in random mode

表 2 固定星点位置时算法误差统计

Tab.2 Error statistic with stabled location (pixel)

高斯噪声方差	X 轴平均误差/均方差	Y 轴平均误差/均方差
5	0.009 2/0.012 1	0.012 2/0.015 3
10	0.014 1/0.019 0	0.018 7/0.023 8
15	0.019 5/0.026 6	0.024 3/0.030 5
20	0.022 1/0.030 5	0.028 6/0.036 7
25	0.027 7/0.038 3	0.035 1/0.045 5
30	0.031 2/0.041 1	0.040 2/0.052 7
50	0.044 7/0.060 8	0.057 4/0.073 4

对应高斯噪声方差为 5 时对应的 x 、 y 轴误差分布情况如图 5 所示(图中坐标定义同图 4)。

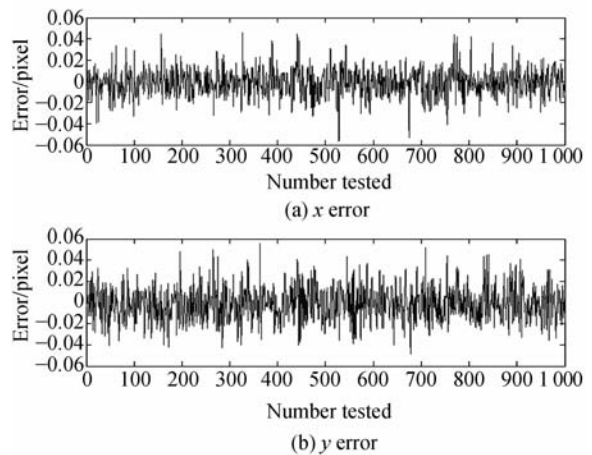


图 5 固定位置时误差分布结果

Fig.5 Error distribution with stabled location

可见,仿真中高斯噪声方差设置为 30 时算法能取

得 1/20 pixel 的精度;而在方差设定为 50 时,也能保证 1/10 pixel 的精度。结合图 4、5 可以看出误差的分布总体均匀,在方差设定为 5 时,绝大多数定位误差不超过 0.05 pixel。在第一次试验中,y 轴向的误差总体稍大,平均定位误差稍高于 1/20 pixel,而均方差始终小于 0.6;第二次试验中,噪声方差达 50 时两个方向上的定位误差依然均不高于 0.1 pixel,均方差亦不超过 0.1,总体效果较好。

最后结合实拍星图,即图 1(a)来源星图进行相应验证。整幅星图中有 7 处星点区域可看作过曝光星点,验证中再另随机选取星图中其他 13 个正常星点,利用算法统一进行处理,将计算结果与实际姿态变换的理论星点质心坐标值进行比较,最后得出结论为:算法整体平均精度要高于 0.02 pixel,而对过曝光星点的平均精度约为 0.03 pixel。其中一次计算结果中关乎过曝光星点的结果对比如下表 3 所示。

表 3 一次实拍星图验证算法误差

Tab. 3 An error report in real validation (pixel)

星点编号	理论坐标(x/y)	计算坐标(x/y)
1	619.193/486.232	619.180/486.251
2	248.717/384.422	248.745/384.397
3	113.638/363.834	113.663/363.850
4	261.062/328.715	261.067/328.675
5	300.343/294.676	300.381/294.639
6	213.334/208.456	213.290/208.455
7	166.165/198.570	166.169/198.604

参考文献:

[1] LIEBIE C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.

[2] 郑胜. 映射二乘向量机及其在天文导航中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2005.

ZHENG S. *Mapped least squares support vector machine and its application in celestial navigation* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)

5 结 论

本文通过挖掘过曝光区域内像素点的信息和物理意义来解决过曝光条件下的星点质心定位问题。通过充分应用星点位置与过曝光区域中心的关系,结合平方加权质心法,有效地对相应点在运算中的权重设置进行了调整。同时,结合分步计算、整体复合的策略,使算法取得了较好的计算精度。仿真结果表明,在全随机仿真模式下,纵然随机噪声误差达到 30 pixel,本文算法依然能够取得 0.05 pixel 的计算精度,并具备较好的抗干扰性,因而能够解决过曝光情况下星点的聚心问题,具有一定的意义和应用价值。但是算法运行中依然存在计算区域范围的确定问题,即对不同大小的星象区域需要选取最优的计算范围。文中第一次试验选取与区域中心相邻的 5 行(列)数据参与计算,第二次实验选取 7 行(列)。具体选取与试验中对星点峰值的设定及相应过曝光区域大小有关,应用中可根据实际情况设计相应选取方式,以取得更优的计算效果。

[3] 王广君, 房建成. 一种星图识别的星体图像高精度内插算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(5): 566-569.

WANG G J, FANG J C. High precision interpolation algorithm for star pattern [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(5): 566-569. (in Chinese)

[4] 田金文, 郑胜, 田玉龙, 等. 基于小面模型的星图中星获取算法研究[J]. *宇航学报*, 2007, 26: 83-86.

TIAN J W, ZHENG S, TIAN Y L, et al.. Research of facet-based star acquisition method [J].

Journal of Astronautics, 2007, 26:83-86. (in Chinese)

- [5] 王海涌, 崢红, 王新龙. 基于高斯分布的星象点精确模拟及质心计算[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7): 1672-1677.

WANG H Y, FEI Z H, WANG X L. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7):1672-1677. (in Chinese)

- [6] MORTARI D, ROMOLI A. StarNavIII: a three fields of view star tracker[J]. *IEEE on Aerospace Conference Proceeding*, 2002(1):47-57.

- [7] 田金文, 欧阳桦, 郑胜, 等. 一种星图中星的提取方法[J]. *华中科技大学学报*, 2005, 33(4):38-40.

TIAN J W, OUYANG H, ZHENG S, et al.. Method of star acquisition from star image [J]. *Journal of Huazhong University of Science and*

Technology, 2005, 33(4):38-40. (in Chinese)

- [8] RUFINO G, ACCARDO D. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 53(3): 135-147.

- [9] 李季, 唐建博. 天文导航中星体高精度细分定位方法研究[J]. *光学与光电技术*, 2007, 5(2):75-77.

LI J, TANG J B. High precision subdivided locating method of star image [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(2): 75-77. (in Chinese)

- [10] 李杰. APS 星敏感器关键技术的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005.

LI J. *Study on the key technology of APS star tracker* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

作者简介:



刘太阳(1984—), 男, 安徽太和人, 博士研究生, 2004 年、2007 年于第二炮兵工程学院分别获得学士、硕士学位, 主要从事导航、制导与控制方面的研究。E-mail: pingfeng_liu@163.com



王仕成(1962—), 男, 山东单县人, 教授, 博士生导师, 1998 年于第二炮兵工程学院获得博士学位, 现为第二炮兵工程学院科研部部长, 主要从事导弹控制、仿真与决策方面的研究。E-mail: wsc@vip.163.com



刘志国(1979—), 男, 湖南益阳人, 博士, 工程师, 2003 年、2007 年于第二炮兵工程学院分别获得硕士、博士学位, 主要从事精确制导与控制、组合导航方面的研究。E-mail: lx840208@163.com