DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201804171

星敏感器星图的高精度星点提取方法

何贻洋,王宏力,冯 磊,由四海,许 强

(火箭军工程大学 导弹工程学院,西安 710025)

摘 要: 星敏感器硬件电路产生的噪声以及在航天器上应用所面临的复杂恶劣的工作环境,都对星图质量造成严重影响,进而降低星点提取精度.针对上述问题,提出了一种精度高且抗干扰性能好的星点提取方法.首先,采用多窗口抽样自适应阈值分割方法对星图去噪,为后续的星点提取奠定基础;然后,基于改进的灰度交叉投影法进行星点粗提取;最后,利用局部区域生长+高斯曲面拟合法进行星点精提取.改进的灰度交叉投影法能够克服星点范围重叠带来的问题,从而快速准确找到星点的粗略区域,而且可以为局部区域生长提供可靠的"种子"点;局部区域生长法可以保证星点区域的边缘细节能够得到充分保留,这对提高星提取的精度大有益处.仿真实验表明,在噪声标准差为2的仿真条件下,该方法的星点提取精度达到了0.075 5 pixel,相比于扫描法等传统方法,该方法的星点提取精度有大幅提高,而且还具有良好的抗干扰性能,因而对于在强噪声干扰条件下提高星敏感器测量精度具有重要参考价值.

关键词: 星点提取;改进灰度交叉投影法;局部区域生长;星图去噪;星敏感器

中图分类号: TP391.4;V448.22^{+}4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)04-0099-08

High-precision star centroid extraction method on star image of star sensor

HE Yiyang, WANG Hongli, FENG Lei, YOU Sihai, XU Qiang

(College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: The noises caused by star sensor electric circuit and the complex working environment faced by the star sensor when being applied in spacecraft both have serious impact on the quality of the star image, leading to the decrease of the star centroid extraction precision. Regarding the issues above, a star centroid extraction method, which has high precision and good anti-noise performance, is presented. Firstly, a multi-window sampling adaptive threshold segmentation method was used to reduce the noise of star image. Secondly, an improved gray cross projection method was proposed for star point coarse extraction. Finally, the local region growing method and the Gaussian surface fitting were used for star centroid fine extraction. The improved gray cross projection method can solve the problems caused by star point overlap so as to quickly and accurately find the rough area of star point and provide reliable "seed" points for the local region growing method. The local region growing method can fully reserve the edge of star point, which is beneficial to improve the star centroid extraction precision. Simulation results show that the star centroid extraction accuracy of the proposed method reached 0.075 5 pixel under the simulation condition with a noise standard deviation of 2. Compared with the traditional methods such as the scanning method, the star centroid extraction accuracy of the proposed method is greatly improved with good anti-interference performance, which has significant reference value for improving the accuracy of star sensor measurement under strong noise interference conditions.

Keywords: star centroid extraction; improved gray cross projection method; local region growing algorithm; star image de-noising; star sensor

星敏感器以恒星作为测量基准,可以提供角秒级甚至更高精度的姿态信息,是目前公认的精度最高的姿态敏感器之一.在航空航天领域,无论是近地卫星或者深空探测,还是弹道导弹或者小卫星上,星敏感器都得到了广泛的应用.星点提取是星敏感器工作过程非常重要的一环,若星点提取精度过低,星图误识别概率将大大增加,从而影响星敏感器的正常工作.星敏感器所处的星空背景环境(如太阳光、月光和地气光等杂散光)比较复杂,且星敏感器本身硬件电路方面也不可避免的存在噪声,因而在星敏感器拍摄的实际星图中,往往包含有复杂的噪声成分,这给星点提取带来了很大的困难.如何在复杂噪声环境下进行高精度的星点提取,这是值得研究的问题.

星点提取研究首先最关注的是如何提高星点提

收稿日期: 2018-04-23
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61503391)
作者简介: 何贻洋(1991—),男,博士研究生;
王宏力(1965—),男,教授,博士生导师
通信作者: 冯 磊,hyyzj9193@163.com

取精度. 其次,若能在保证高精度的前提下,提高抗干扰性能,这对工程应用亦具有重大意义. 基于此,学者们提出了许多星点提取的方法和策略. 传统的星点提取方法有扫描法[1]和矢量法[2]扫描法首先进行阈值分割,再通过连通域分析获得星点区域,这种方法的优点是能够获得星点的细节,缺点是受噪声干扰影响大;矢量法是对扫描法的改进,经过一次行列的扫描得到候选的特征像素点,再利用模板分析获得星点区域,该方法的缺点是对噪声很敏感,提取的星数可能迅速达到上限. 文献[3]提出的块扫描法通过对星敏感器成像平面进行分块,找出各分块中灰度值最大的像元,并以这些像元为中心,利用模板分析获得星点区域. 该方法的抗干扰性能相比传统方法有了显著提高,但是星点提取精度还有待提高. 文献[4]提出了一种灰度交叉投影法,该方法相比传统的扫描法和矢量法大幅减少了计算量,但若星点存在重叠(纵向或横向坐标存在重叠),星点提取精度将严重下降,且该方法难以准确获取星点边缘. 文献[5]针对强干扰条件提出了边缘检测 + 星体像素筛选的星点提取方法,由于是采用扫描方式逐个对像素判断标记,因而比较耗时;文献[6]提出了一种分块峰值点局部区域生长的星提取方法,具有较好的星点提取精度以及抗干扰能力.

综上所述,目前在已发表的文献中提出的星点提取方法的星点提取精度以及抗干扰性能上仍有进一步提升的空间,基于此,本文提出了一种适用于噪声环境下的精度高且抗干扰性能好的星点提取方法. 首先对星图进行去噪,然后采用改进的灰度交叉投影法进行星点粗提取,在此基础上,利用局部区域生长法 + 高斯曲面拟合法进行星点精提取,获得高精度的星点质心坐标.

1 星图去噪

星敏感器应用的重要领域之一是航空、航天领域,由于航空、航天的环境较为复杂,给星敏感器拍摄星图带来了极大的噪声干扰,同时星敏感器自身硬件设备也不可避免的存在噪声. 因此为了提高星点提取的精度,有必要先对星图去噪.

1.1 星图噪声分析

星图噪声按其来源可以分为:星空背景噪声和硬件设备带来的噪声.

1.1.1 星空背景噪声

宇宙星空环境中广泛存在的杂散光(如太阳光、月光和地气光等)是星空背景噪声的主要来源,杂散光会直接影响恒星在星图上形成的光斑大小以及星点能量分布. 杂散光经过宇宙中的太空垃圾以及航天器表面的反射作用,有些杂散光进入星敏感器中,在星图上形成光斑,即伪星;且航天器及太空垃圾可能会遮挡一些本该出现在视场中的恒星,上述情况均会使视场内的恒星几何位置结构发生变化,影响星识别,甚至可能导致星识别失败.

1.1.2 硬件设备带来的噪声

硬件设备带来的噪声主要是指星敏感器成像器件的噪声,包括光子散粒噪声、暗电流噪声、光学镜头畸变引起的噪声等. 光子散粒噪声是由于单位时间注入光敏区的光子数发生波动产生的;暗电流噪声是由热效应产生的电流引起的噪声;畸变是光学镜头无法避免的缺陷,会导致恒星光斑产生变形,影响星点像素的能量分布[7].

综上所述,星空背景噪声使星图背景的均匀性受到影响;硬件设备带来的噪声对星点位置及灰度有较大影响.

1.2 星图去噪方法

星图去噪常用的方法有:中值滤波、高斯滤波等. 而常用的中值滤波和高斯低通滤波方法会将星图中灰度值较低的星点当做噪声点滤除,将增大星点提取误差,不利于后续的星点提取[8].

星图噪声的灰度干扰通常远低于星图中恒星光斑的灰度级别,且一般来说通过遮光罩等措施能够保证星图背景的不均匀性不至于太大,因而阈值分割方法就能区分恒星光斑与星图噪声,达到星图去噪目的. 基于此,文献[7]中提出了一种改进的多窗口抽样自适应阈值选取方法,既能满足星图去噪要求,也不会占用太多的计算资源,取得了较好的效果. 本文将采用这一方法来进行星图去噪.

选取大小合适的抽样窗口,在星图上随机确定抽样窗口的位置,计算窗口内星图灰度的均值 μ_i 和标准差 σ_i,综合所有窗口内的结果,得到星图的分割阈值,当星图像素点的灰度值大于分割阈值时,则将该像素划分为星点像素,否则为星图噪声像素. 计算公式为

$$T_s = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\mu_i + \alpha \times \sigma_i).$$

式中:μ_i、σ_i 分别为第 i 个窗口内的灰度均值和标准差;N 为窗口个数;α 为常数,一般取值为 3 ~ 5.

2 星点高精度提取方法

星图经过去噪之后,星图噪声绝大部分已被滤除,除了可能是恒星光斑以及孤立噪点外,星图其余像素点的灰度值为零. 在此条件下,本文提出一种高精度的星点提取方法:首先利用改进的灰度交叉投影法来进行星点的粗提取,从而快速获取星点的粗

略范围，并为局部区域生长法提供可靠的“种子”点；利用局部区域生长法 + 高斯曲面拟合获得高精度的星点质心坐标，区域生长法可准确的星点范围以及其边缘细节，星点区域的信息越丰富越准确，显然更有益于提高星点提取精度. 本文方法的具体流程图如图 1 所示.

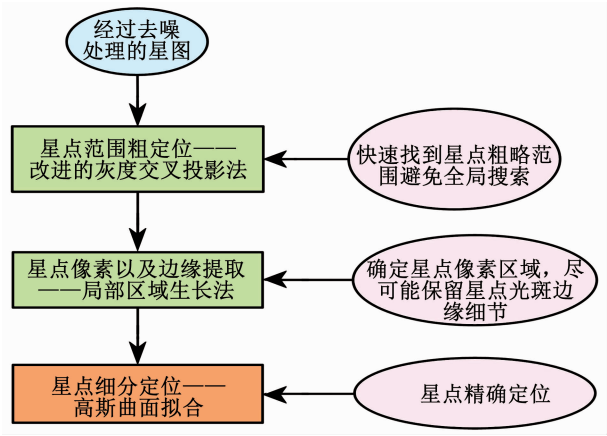

图 1　高精度星点提取过程示意图

Fig. 1　High-precision star centroid extraction diagram

2.1　星点粗提取策略

对于一幅大小为 $R \times L$ 的星图，竖直投影函数定义如下

$$P(x) = \sum_{y=1}^{R} p(x,y),$$

水平投影函数为

$$P(y) = \sum_{x=1}^{L} p(x,y).$$

式中 $p(x,y)$ 为星图中像素点坐标 (x,y) 处的灰度值.

灰度交叉投影法[4]的基本原理如下：首先对去噪星图进行竖直投影运算，并找出竖直投影灰度值大于 0 的横坐标区间，在这些区间上必然存在星点；在每个区间上，对星图进行水平投影计算，从而确定星点的纵坐标区间，由上述两步的投影计算就可以确定星点的坐标范围. 值得注意的是：在水平投影计算时，检测对象是由竖直投影得到的条状图像；上述两步的顺序可以调换，不影响最终结果. 灰度交叉投影法的详细操作过程结合图 2 来进行详细说明.

1）首先进行竖直投影，检测到存在星点的水平 x 坐标范围（$[x_1,x_2]$、$[x_3,x_4]$、$[x_5,x_6]$、$[x_7,x_8]$）.

2）分别在图 2 中水平 x 坐标范围上取出的去噪星图图像上，进行水平投影计算，得到星点对应的纵坐标范围（$[y_1,y_2]$、$[y_3,y_4]$、$[y_5,y_6]$、$[y_7,y_8]$、$[y_9,y_{10}]$）. 到此可以得到图 2 中的星点范围依次为星点 1（$[x_1,x_2]$、$[y_1,y_2]$）、星点 2（$[x_3,x_4]$、$[y_3,y_4]$）、星点 3（$[x_3,x_4]$、$[y_5,y_6]$）、星点 4（$[x_5,x_6]$、$[y_7,y_8]$）、星点 5（$[x_7,x_8]$、$[y_9,y_{10}]$）.

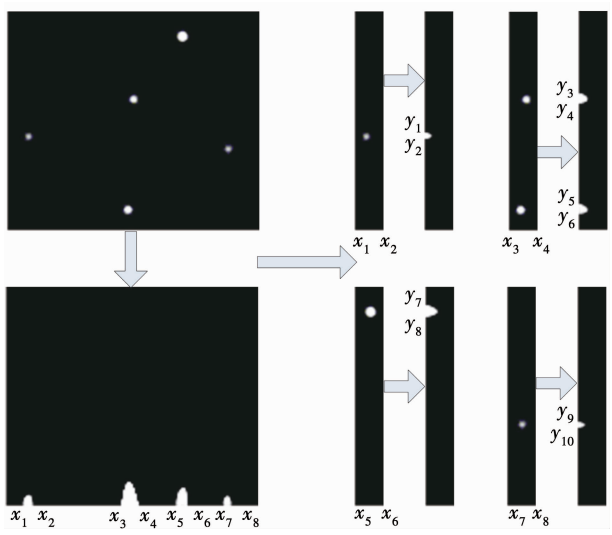

图 2　灰交叉投影法示意图

Fig. 2　Gray cross projection method

由灰度交叉投影法原理可知，利用灰度交叉投影法得到的恒星在星敏感器感光器件上形成的光斑始终为矩形形状，而实际上恒星光斑的形状并不规则，并非总是矩形. 对于星点范围存在重叠的情况，灰度交叉投影法无法对其星点范围进行区分，若直接利用灰度交叉投影法得到的星点粗提取结果进行下一步的星点精提取，那么提取精度将大打折扣. 由于该缺点，灰度交叉投影法并未得到广泛应用. 基于此，本文针对上述方法存在的不足，对灰度交叉投影法进行了改进，并基于改进的灰度交叉投影法的结果，为局部区域生长法获取星点分布范围提供可靠“种子”点的星点粗提取策略. 由于局部区域生长法是从“种子”点开始生长，因此，必须确保“种子”点位于星点内部，后续的局部区域生长法才能正确的获取得到星点的分布范围.

1）当星点没有重叠（若星点纵横坐标均有重叠，则无法区分，仍视为一个星点）时，“种子”点的坐标分别取由灰度交叉投影法得到的星点纵横坐标范围的中点. 显然，在这种条件下，得到的种子点必位于星点的内部.

2）当星点的纵坐标（或横坐标）存在重叠时，本文按以下思路给出“种子”点：以星点在横坐标方向有重叠的情况为例，重叠星点的数目 n 可由该重叠区间水平投影的个数确定，将重叠星点的范围等分为 n 个小区间 $[x'_{i-1},x'_i]$，$i=1,\cdots,n$，如图 3 所示.

当重叠的星点大小接近时，可以取每个小区间的中点作为第 i 个星点的横坐标 x 方向的“种子”点坐标，这样给出“种子”点的依据如下：对于有 n 个星点重叠时，只需要分析清楚两个星点之间的重叠情况，那么 n 个星点之间的重叠情况也就清楚了. 因此不失一般性，取其中的第 i 个和第 $i+1$ 个星点来

进行分析,假设每个星点横坐标范围相等均为 a,第 i 个和第 $i+1$ 个星点重叠的部分为 $b(0\leqslant b\leqslant a)$,由灰度交叉投影法得到的这两个星点横坐标坐标范围为$[x'_{i-1},x'_{i+1}]$,中点为 x'_i,如图 4 所示. 可知:

$$x'_{i+1}-x'_{i-1}=2a-b, \tag{1}$$

$$x'_i=\frac{x'_{i-1}+x'_{i+1}}{2}=x'_{i-1}+\frac{2a-b}{2}. \tag{2}$$

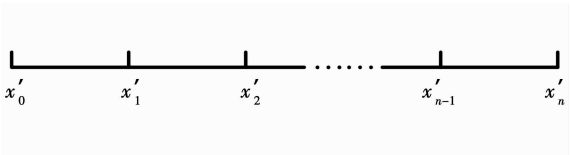

图 3 重叠星点范围等分示意图

Fig. 3 Evenly divided overlapping star points scales

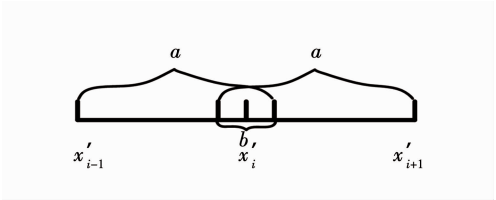

图 4 两个星点重叠分析示意图

Fig. 4 Analysis of two overlapping star points

再分别取区间$[x'_{i-1},x'_i]$、$[x'_i,x'_{i+1}]$的中点 x_i,x_{i+1}作为第 i 个和第 $i+1$ 个星点的“种子”点,如下式所示:

$$x_i=\frac{x'_{i-1}+x'_i}{2},$$

$$x_{i+1}=\frac{x'_i+x'_{i+1}}{2},$$

结合式(1)、(2),得到:

$$x_i=x'_{i-1}+\frac{2a-b}{4}, \tag{3}$$

$$x_{i+1}=x'_{i-1}+\frac{3(2a-b)}{4}. \tag{4}$$

对于式(3)、(4),当 $b=0$ 时,x_i,x_{i+1}分别取其最大值 $x_{i-\max}=x'_{i-1}+\frac{a}{2}$,$x_{i+1-\max}=x'_{i-1}+\frac{3a}{2}$;当$b=a$ 时,x_i,x_{i+1} 分别取其最小值 $x_{i-\min}=x'_{i-1}+\frac{a}{4}$,$x_{i+1-\min}=x'_{i-1}+\frac{3a}{4}$. 可以发现,即使当 x_i,x_{i+1}均取其最大值时,x_i,x_{i+1}仍然在第 i 个和第 $i+1$ 个星点的实际坐标范围内,因此可以将 x_i,x_{i+1}作为“种子”点.

值得注意的是,虽然一般情况下星图上拍摄的星点大小基本接近,符合上述选取“种子”点的条件,但也不能排除两个星点大小相差较大的情况. 当出现这种情况时,可采取以下策略:首先利用上述方法得到“种子”点,然后对“种子”点是否在星点内部进行判断,星图经过去噪后,星图背景的灰度值为零,星点内部像素点灰度值大于零,那么可以基于此判断“种子”点是否在星点内部. 若利用上述方法得到的“种子”点不在星点内部,那么在该“种子”点左、右(上、下)进行搜索和判断,直至找到属于星点内部的像素点,将此像素点作为符合条件的“种子”点.

2.2 星点的精提取

传统的星点提取方法在界定星点分布范围时,通常的策略是基于模板(模板大小一般为 3×3 或者 5×5),这种策略的不足之处在于,各颗恒星在星敏感器像平面上的星点大小往往并不相同,而且与离焦成像技术的参数设置也有关,有些星点会大于模板尺寸,有些星点也可能小于模板尺寸. 所以采用模板来界定星点范围时,一部分原属于星点内部的像素点可能被舍弃,或者给星点增加了无效的像素点. 而局部区域生长法能够精确的获取每个星点的范围,摆脱了模板的限制,能够完整的保留星点内部所有的像素点. 文献[3]中证明了高斯曲面拟合的精度高于质心法,且根据文献[9]中阐述的高斯曲面拟合方法的原理,如果参与高斯曲面拟合的有效像素点越多,得到的星点质心坐标估计精度越高. 因此本文将这两种方法结合起来进行星点的精提取,以获得高精度的星点质心坐标.

区域生长(region growing)是一种根据事先定义的准则将像素或者子区域合并成更大区域的过程. 即从图像中某个像素点出发,按照一定的准则,逐步检测邻近像素或者区域,当满足一定条件时,区域终止生长,最后得到满足条件的区域,进而实现星点提取. 区域生长法的精度取决于:“种子”点的选取、生长准则和终止条件.

初始“种子”点通过上述改进的灰度交叉投影法已经获得,星图图像经过去噪处理之后,背景像素的灰度值为 0,基于星图的这一特征,考虑将灰度相关的值作为区域生长准则,也就是以“种子”点为起始点,检查与其相邻的像素点,如果其灰度值大于 0,则加入区域中. 具体操作步骤如下.

Step1 以灰度交叉投影法得到的“种子”点为起始点.

Step2 将这个像素点同其周围的像素点进行比较,若满足生长准则,则将它们合并为同一个星点区域,并对合并的像素做标记.

Step3 从新合并的像素点开始,反复进行 Step2 的操作,直至达到局部区域生长终止的条件,则认为获得一个星点.

Step4 返回步骤 Step1,以新的“种子”点为起始点重复上述步骤.

高斯曲面拟合法在此不再赘述，可参考文献[9－11].

3　实验及分析

3.1　仿真条件设置

在本文中，采用国际天文协会 IAU(international astronomical union)公布的标准星表 SKYMAP2000 Version 4 Master Catalog，也就是第 4 版的 SKY2000 主星表作为基本星表. 该星表包含 310 482 颗亮星，位置精度达到了 0.001 角秒，星等精度达到了 0.1 星等. 星敏感器的存储量有限，难以将基本星表中的所有恒星信息进行存储，因此有必要对恒星进行筛选，得到符合导航要求，同时存储量较小的导航星表. 常见的星敏感器对恒星的探测门限一般为 6.0[12]，本文选取基本星表中星等小于 6.0 的恒星作为候选导航星，剔除掉其中的双星和变星，共得到 4 908 颗恒星. 星敏感器的参数设置见表 1.

表 1　星敏感器参数设置

Tab. 1　Parameter setting of star sensor

视场/(°)	焦距/mm	面阵大小/pixel	像素大小/mm	曝光时间/s
12×12	65.76	512×512	0.027	0.08

仿真实验中所使用的计算机配置为 3.5 GHz Core(TM)i3，4.00 GB RAM. 使用 MATLAB2012b 进行仿真实验.

3.2　模拟星图仿真实验结果

模拟星敏感器光轴指向的赤经、赤纬分别为(40°，43°)，模拟星图的灰度级为 0～255，根据文献[6，13－15]的研究，星图噪声的均值抬高了星图中所有像素点的灰度值，这就意味着星图背景以及星点的灰度值同时增大了，这对星点提取影响不大，因为星点和星图背景仍然能被有效区分；而且星图预处理时，阈值分割方法基本能消除噪声均值的影响，所以噪声的均值对星点质心提取精度几乎没有影响. 噪声标准差反映的是噪声波动的大小，随着标准差增大，可能导致一些暗弱星点的提取误差增大甚至无法提取. 所以说噪声影响星点提取主要指的是噪声标准差带来的影响. 因此在本仿真实验中高斯白噪声均值设置为 0，标准差设置为 8，得到相应的模拟星图.

在仿真实验中，将本文的星点提取方法与扫描法＋带阈值质心法(简记为 mehtod-1)、矢量法＋带阈值质心法(简记为 method-2)以及块扫描法＋高斯曲面拟合(简记为 method-3)的星点提取结果进行对比，method-1、method-2 以及 method-3 在剔除由于孤立噪声等因素引起的伪星时，设置星点的大小为 3×3 进行星点的筛选，得到星点提取结果见表 2.

表 2　星点提取仿真实验结果

Tab. 2　Results of star extraction simulation　　pixel

序号	星点坐标准确值		本文方法星点提取结果		method-1 星点提取结果		method-2 星点提取结果		method-3 星点提取结果	
	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标	行坐标	列坐标
1	22.315 8	493.989 1	22.202 1	493.988 2	22.582 7	494.371 3	22.083 0	493.753 8	22.578 8	493.898 5
2	64.450 7	106.348 4	64.344 8	106.286 2	65.541 1	107.378 7	64.374 0	106.480 3	64.645 5	106.278 0
3	71.620 7	399.555 1	71.547 1	399.674 1	72.043 3	399.995 4	71.811 7	399.509 2	71.458 6	399.270 7
4	90.834 8	341.262 0	90.997 9	341.125 9	—	—	90.613 0	341.090 9	90.624 5	341.184 9
5	166.828 6	478.704 0	166.919 1	478.646 9	167.475 0	479.147 0	—	—	166.893 8	478.969 4
6	195.258 7	51.853 2	195.415 0	51.759 5	195.987 8	52.170 2	195.358 6	51.678 0	195.333 7	51.947 7
7	200.660 2	287.110 7	200.696 7	287.015 4	200.929 3	287.514 1	200.714 8	287.035 0	200.471 6	287.350 2
8	320.817 9	118.988 6	320.948 5	119.101 2	321.397 0	119.241 3	320.508 7	118.642 1	320.697 9	118.992 8
9	333.830 6	482.585 7	333.611 4	482.447 5	334.312 4	483.067 2	—	—	333.000 6	482.815 0
10	335.218 9	413.872 0	335.343 2	413.573 1	—	—	334.235 5	413.546 0	335.284 6	414.113 7
11	375.282 7	274.213 2	375.344 9	274.279 7	375.924 1	274.925 0	375.344 9	274.857 5	375.409 5	274.101 9
12	394.000 4	409.921 8	393.944 9	409.976 7	394.537 9	410.291 8	394.127 4	409.691 0	394.119 5	409.802 7
13	425.869 0	465.277 6	425.857 2	465.383 6	426.345 2	465.764 7	425.590 0	464.775 7	425.771 9	465.029 8
14	437.619 8	230.617 5	437.695 0	230.535 3	438.100 1	231.053 8	—	—	438.041 9	230.824 8
15	452.526 4	370.624 8	452.665 5	370.684 1	452.999 0	371.173 4	452.499 0	370.673 4	452.557 4	370.743 6
16	454.154 6	344.548 1	454.110 0	344.605 9	454.691 9	345.066 7	454.910 6	344.551 7	454.004 9	344.720 7
17	498.395 5	219.010 0	498.194 5	219.256 1	498.829 5	219.500 1	498.500 5	219.397 7	498.071 9	219.649 3

在表 2 中，可以知道利用 method-1 与 method-2 不能将星点全部提取出来，在上述仿真条件下，method-1 方法提取得到 15 颗星点，在行坐标方向存在重叠的第 9、10 个星点和第 15、16 个星点均被成

功的提取,可见本文方法成功解决了灰度交叉投影法不能应用于星点重叠情形的问题;method-2 提取得到 14 颗星点;本文方法和 method-3 仍能将星点全部提取出来. 将表 2 中本文方法以及 method-3 方法得到的星点提取结果与星点标准值做差,得到每个星点在行坐标与列坐标方向上的星点坐标误差,如图 5 所示.

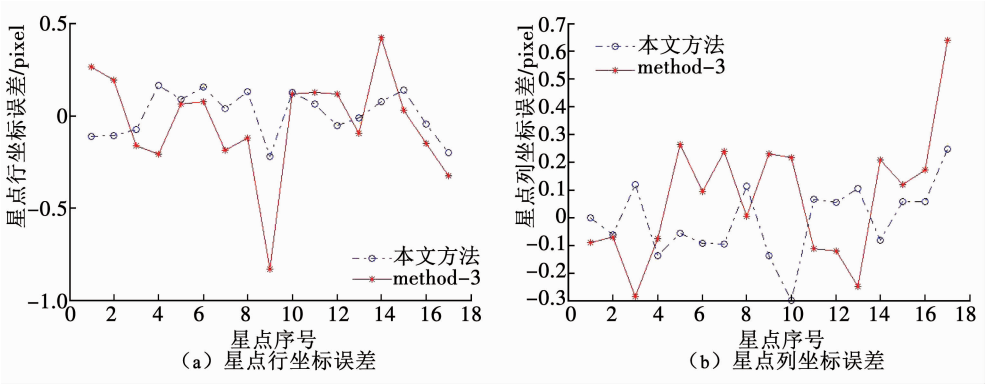

图 5 星点提取坐标误差仿真结果

Fig. 5 Simulation results of star centroid extraction error

本文方法首先利用多窗口抽样自适应阈值方法对星图进行了去噪处理,消除了大部分噪声的影响,然后提出了星点粗提取 + 精提取的策略,能有效避免孤立噪声点等干扰,且能够很好对星点范围较小的弱星进行提取. 传统方法(如 method-1 以及 method-2)最初并没有对星图噪声进行预处理,后续的改进算法中采用了一些方法进行去噪,提高了传统星点提取方法的抗干扰性能. 考虑到星敏感器上的计算资源比较宝贵,星图去噪方法不宜采用特别复杂的算法,因而常用的是全局阈值分割等方法,但去噪效果不如本文采用的多窗口自适应阈值方法,传统星点提取方法仍会受到残留噪声的干扰,特别是矢量法,受噪声干扰后,提取的星数可能会迅速达到上限,使得星点无法正确提取. method-3 是对 method-1 的改进且由于首先对星图进行了分块,并对每个区块分别进行阈值分割计算,这样的星图预处理方法也能较为显著地提高 method-3 的抗干扰性能,但对孤立噪声点仍比较敏感. 因此,本文方法的抗干扰性能应优于其他 3 种星点提取方法.

为了进一步考察本文方法的抗干扰性能并对上述分析进行验证,首先模拟得到 100 幅不同光轴指向的星图,每幅星图分别加入灰度噪声的均值为 0、标准差为 2、4、6、8、10、12 的高斯白噪声(星图灰度范围为 0 ~ 255),从而得到上述 4 种星点提取方法在不同星图与不同噪声水平的条件下的星点提取情况. 为了有效便捷的描述星点提取误差,本文采用如下公式来计算[7]:

$$\mathrm{Err} = \frac{1}{N_{\mathrm{map}}}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{map}}}\left[\frac{1}{N_i}\sum_{j=1}^{N_i}\sqrt{(x_j - x_{rj})^2 + (y_j - y_{rj})^2}\right].$$

式中:Err 为星点提取误差;N_{map}为星图的幅数;N_i 为星图中提取得到的星点个数;(x_{rj}, y_{rj})为第 j 个星点的标准质心坐标;(x_j, y_j)为通过星点提取方法得到的星点坐标. 从而得到星点提取结果见表 3.

表 3 不同噪声水平下星点提取结果

Tab. 3 Result of star point extraction in different noise levels

星图噪声	本文方法		method-1		method-2		mehtod-3	
	星点提取成功率/%	星点提取误差/pixel	星点提取成功率/%	星点提取误差/pixel	星点提取成功率/%	星点提取误差/pixel	星点提取成功率/%	星点提取误差/pixel
标准差 = 2	100.00	0.075 5	100.00	0.721 5	98.25	0.626 7	100.00	0.146 8
标准差 = 4	100.00	0.103 5	100.00	0.741 4	91.44	0.776 4	100.00	0.189 5
标准差 = 6	100.00	0.128 7	96.21	0.809 8	87.13	0.835 9	100.00	0.229 6
标准差 = 8	100.00	0.156 7	86.23	0.959 7	72.86	1.193 5	96.74	0.300 3
标准差 = 10	94.11	0.228 4	81.56	1.114 4	63.89	1.234 9	93.02	0.345 0
标准差 = 12	88.24	0.272 1	76.47	2.518 7	52.94	2.689 4	79.39	0.382 0

根据上述仿真实验结果，可以看出相比于 method-1，本文方法的星点提取精度平均提高 7.2 倍；相比于 method-2，本文方法的星点提取精度平均提高 7.5 倍；相比于 method-3，本文方法的星点提取精度平均提高 1.7 倍. 仿真结果与模拟星图仿真实验结果中的分析结论也相一致，可见本文方法的星点提取精度的确相比传统提取方法有较大提高.

从表 3 中可以得知，随着噪声标准差的逐渐增大，进行仿真的 4 种方法的星点提取成功率均有不同程度的下降. 当噪声标准差 >8 时，本文方法的星点提取成功率开始下降且下降幅度最小；当噪声标准差 <6 时，method-3 的提取成功率开始下降，下降幅度比本文星点提取方法大；当噪声标准差 >4 时，method-1 的提取成功率开始下降，下降幅度比 method-3 大，method-2 下降最为严重；当噪声标准差为 12 时，提取成功率仅为 52.94%，可见本文提出的星点提取方法的抗干扰性能明显优于其他 3 种星点提取方法.

简要分析本文方法与 method-1 ~ method-3 的算法复杂度. method-1 和 method-2 均要对星图进行反复的全图扫描操作，因而比较耗时；method-3 避免了全图扫描，所以其实时性大大提高；本文方法同样不需要进行全图扫描，所以实时性应大大优于 method-1 和 method-2，但相比于 method-3，多了区域生长法的计算量，所以实时性应略逊于 method-3.

为比较和验证本文方法与传统星点提取方法的实时性能优劣，进行了仿真对比实验. 对加入均值为 0、标准差为 8 的高斯白噪声的 100 幅星图利用上述星点提取方法进行星点提取，统计这 4 种方法的星点提取时间并取其平均值，得到结果见表 4.

表 4　星点提取时间比较

Tab. 4　Comparsion of star point extraction time

星点提取方法	本文方法	method-1	method-2	mehtod-3
算法耗时/s	0.095 10	0.209 50	0.132 40	0.062 56

由表 4 中的仿真结果可知，按照星点提取时间长短进行排序：method-3 < 本文方法 < method-2 < method-1. 本文方法时间与 method-3 的星点提取时间较短且相差较小，而 method-1 和 method-2 的星点提取时间较长，可见仿真结果与理论分析结果也是一致的.

3.3　实测星图实验

图 6 为一幅大气层内夜空实拍的星图，图 7 为利用本文方法得到的星点提取结果，对比图 6、7，可见本文方法对于实测星图的星点提取成功率仍然较高.

图 6　原始实测星图

Fig. 6　Originally measured star image

图 7　提取出的星点图像

Fig. 7　Extracted star points image

模拟星图仿真实验结果的仿真实验分别从星点提取的精度、抗干扰性能以及实时性 3 个方面对本文提出的星点提取方法与其他 3 种常用星点提取方法进行了仿真实验对比. 仿真结果表明，相比于其他 3 种星点提取方法，本文方法的星点提取精度有明显提高且抗干扰性能明显优于其他 3 种星点提取方法，本文方法的星点提取时间略高于 method-3 且相差很小，但远低于 method-1 和 method-2 的星点提取时间. 因此综合来看，本文方法在星点提取精度以及抗干扰性能方面有明显的改进提高，但在实时性方面表现较为一般. 在保证星点提取精度以及抗干扰性能的前提下，如何尽量缩短星点提取时间以提高方法的实时性，今后可做更深入的研究. 实测星图实验利用本文方法对实测星图进行了星点提取实验，也验证了本文方法具备弱星探测提取能力，具有一定的工程应用价值.

4　结　论

1）提出了改进的灰度交叉投影法对经过去噪处理的星图进行星点粗提取，克服了灰度交叉投影法难以应用于星点重叠情况的不足，并消除了孤立

噪声点等干扰因素的影响,为局部区域生长法提供可靠的“种子”点.

2)采用局部区域生长法 + 高斯曲面拟合进行星点的精提取,局部区域生长法可充分保留星点边缘细节,有利于提高星点提取精度. 结合高斯曲面拟合法进行星点细分定位计算,得到星点质心坐标.

3)仿真实验结果表明,在噪声标准差为 2 的仿真条件下,本文方法的提取精度达到了 0.075 5 pixel,相比于传统的星提取方法,本文方法的星提取精度有大幅提高;并以较小的星点提取时间为代价,获得了较好的抗干扰性能. 实测星图实验也表明本文方法仍能适用实际拍摄星图的星点提取,可见本文方法具有一定工程实用价值.

参考文献

[1] KIM H. Novel methods for spacecraft attitude estimation [D]. Texas: Texas A&M University, 2002

[2] MORTARI D, ROMOLI A. StarNav III: a three fields of view star tracker[C]//Proceedings of the IEEE on Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2002: 47. DOI: 10. 1109/AERO. 2002. 1036827

[3] 崔祥祥. 基于大视场星敏感器的星图识别方法研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2010: 30
CUI Xiangxiang. Research on techniques of star pattern recognition for wide field-of-view star tracker[D]. Xi'an: The Second Artillery Engineering College, 2010: 30

[4] 王兆魁, 张育林. 一种 CCD 星图星点快速定位算法[J]. 空间科学学报, 2006, 26(3): 209
WANG Zhaokui, ZHANG Yulin. Algorithm for CCD star image rapid locating[J]. Chinese Journal of Space Science, 2006, 26(3): 209. DOI:10.3969/j. issn. 0254 - 6124. 2006. 03. 010

[5] 踪华, 高晓颖, 汪渤, 等. 强干扰条件下的星体提取方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(8): 113
ZONG Hua, GAO Xiaoying, WANG Bo, et al. Method of star extraction on strong interference[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(8): 113. DOI:10. 11918/j. issn. 0367 - 6234. 2014. 08. 019

[6] 王海涌, 武文卿, 薛晓峰, 等. 分块峰值点局部区域生长的星像提取[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2507
WANG Haiyong, WU Wenqing, XUE Xiaofeng, et al. Star image extracting based on local region growing around peaks in blocks[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2507. DOI:10. 3788/OPE. 20122011. 2507

[7] 罗丽燕. 基于星敏感器的星点提取与星图识别方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 31
LUO Liyan. Study on star centroid extraction and star identification method based on star sensor[D]. Xi'an: Xidian University, 2015: 31

[8] 许威. 星点快速提取与高精度定位技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 16
XU Wei. Star fast extraction and high accuracy centroid estimation of star camera[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 16

[9] KATAKE A B. Modeling, image processing and attitude estimation of high speed star sensor[D]. Texas: Texas A&M University, 2006

[10] 魏新国, 张广军, 江洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 812
WEI Xinguo, ZHANG Guangjun, JIANG Jie. Subdivided location method of star image for star sensor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 812. DOI:10. 13700/j. bh. 1001 - 5965. 2003. 09. 014

[11] 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
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

[12] 张涛, 郑建华, 高东. 一种利用磁强计和星敏感器的自主导航方法[J]. 宇航学报, 2017, 38(2): 152
ZHANG Tao, ZHENG Jianhua, GAO Dong. A method of autonomous navigation using the magnetometer and star sensor[J]. Journal of Astronautics, 2017, 38(2): 152. DOI: 10. 3873/j. issn. 1000 - 1328. 2017. 02. 006

[13] 潘波, 杨根庆, 刘勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1787
PAN Bo, YANG Genqing, LIU Yong. Study on optimization threshold of centroid algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1787. DOI:10. 3321/j. issn:1004 - 924X. 2008. 09. 037

[14] 李葆华, 王常虹, 张迎春. 适用于星敏感器的局部星像提取方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1427
LI Baohua, WANG Changhong, ZHANG Yingchun. Obtaining method for star locations in local region of star image for star sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2007,15(9): 1427. DOI: 10. 3321/j. issn:1004 - 924x. 2007. 09. 020

[15] 余路伟, 毛晓楠, 周琦, 等. 采用最大背景估计的星敏感器图像处理方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 889
YU Luwei, MAO Xiaonan, ZHOU Qi, et al. Image processing of star sensor based on maximum background estimation[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7): 889. DOI:10. 3969/j. issn. 1001 - 5078. 2017. 07. 020

(编辑 张 红)