

白昼红外星图星点提取方法*

杨 原¹ 勾万祥¹ 李崇辉¹
佟 帅¹ 张 超¹ 张俊章²

1(信息工程大学地理空间信息学院 郑州 450001)

2(32020 部队 武汉 430000)

摘 要 白昼红外星图具有高背景噪声、低信噪比、弱目标的特征,采用传统单帧提取方法很难准确提取星点。且由于星点为弱小目标,对噪声极为敏感,星点成像多为随机不规则图形,采用单帧提取星点质心鲁棒性较差。传统多帧叠加法虽能克服单帧提取星点质心鲁棒性较差的问题,但对于高背景噪声红外星图,叠加星图并不能明显提高信噪比,星点提取成功率依然较低。为此,提出利用背景预测方法确定疑似星点位置,并对边界进行膨胀,然后利用膨胀后的边界进行单帧星图能量提取,并将提取星图进行叠加形成高信噪比星图,最后进行星点质心提取。实验表明,该方法星点提取正确率为 99.5%,较自适应阈值分割法和多帧叠加法分别提升 84.2% 和 37.9%,较背景预测法正确率提升 14.5%。同时该方法较自适应阈值分割法和背景预测法、多帧叠加法精度分别提升 12.8%, 41.4%, 33.3%, 具有明显优势。

关键词 红外星图, 信噪比, 背景预测, 多帧叠加, 质心精度

中图分类号 V19

Method of Star Point Extraction for Daytime Infrared Star Image

YANG Yuan¹ GOU Wanxiang¹ LI Chonghui¹
TONG Shuai¹ ZHANG Chao¹ ZHANG Junzhang²

1(School of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001)

2(32020 Troops, Wuhan 430000)

Abstract The daytime infrared star image has the characteristics of high background noise, low signal-to-noise ratio and weak target, so it is difficult to accurately extract the star centroid by using the traditional single frame extraction method. Because the stars are weak and small targets, they are extremely sensitive to noise, and the star imaging is mostly random and irregular, so the robustness of extracting the star centroid by single frame is poor. Although the traditional multi-frame superposition method can overcome the problem of poor robustness of star centroid extraction in single frame, for in-

* 国家自然科学基金面上项目 (42374011) 和河南省优秀青年基金项目 (242300421150) 共同资助

2023-11-02 收到原稿, 2024-02-17 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

frared star images with high background noise, the superposition star image cannot significantly improve the signal-to-noise ratio, and the success rate of star extraction is still low. Therefore, this paper proposes a method that uses background prediction method to determine the position of suspected stars, expands the boundary, and then uses the expanded boundary to extract the energy of single frame star image, and superimposes the extracted energy star image to form a high signal-to-noise ratio star image, and finally extracts the star centroid. Experiments show that the accuracy of star extraction is 99.5%, which is 84.2% and 37.9% higher than that of adaptive threshold segmentation method and multi-frame superposition method, respectively, and 14.5% higher than that of background prediction method. At the same time, the accuracy of this method is improved by 12.8%, 41.4% and 33.3%, respectively, compared with the adaptive threshold segmentation method, background prediction method and multi-frame superposition method, which has obvious advantages over the traditional method.

Key words Infrared star image, Signal-to-noise ratio, Background prediction, Multi-frame stacking, Centroid accuracy

0 引言

天文导航作为重要的自主导航手段, 备受研究关注, 但受限于白昼大气层内星点探测识别困难, 一直影响其推广应用^[1,2]. 近些年, 随着铟镓砷 (InGaAs)、碲镉汞 (HgCdTe) 新型红外传感器的投入使用, 使得天文导航推广到大气层内全天时使用成为可能^[3]. 然而, 受红外传感器自身噪声影响和白昼复杂背景辐射干扰, 白昼红外星图往往呈现噪声强、信噪比低、星点目标小的突出特点^[4], 给白昼大气层内天文导航定位应用带来一定困难.

围绕白昼条件下准确探测红外星点目标, 各国学者分别开展基于单帧提升信噪比的方法, 如基于单帧的背景预测法^[5]、形态学法^[6]、局部对比度法^[7]、小波变换法^[8]; 基于多帧的关联校验法、一维处理法、帧间差分法^[9]; 基于神经网络和深度学习的智能算法^[10,11]等. 然而当前白昼条件下的红外星图工作, 大多围绕提升星图信噪比准确探测识别星点展开, 对于星点探测后提取精度的研究关注较少.

基于单帧星图的滤波处理、增强算法虽然能提升星图信噪比, 剔除伪星点, 但同时改变了星图能量分布, 使星点边界产生弱化、偏移现象^[12]; 加之弱小星点目标受随机噪声影响明显, 星点成像往往出现不规则现象^[13]. 这些问题将直接导致单帧星图信噪比增强的同时, 也降低了星点提取精度, 且鲁棒性较差. 传统多帧叠加虽然能消除部分随机误差, 解决单帧星点提取鲁棒性较差的问题, 但对于高背景噪声的红外星图而言, 多帧叠加提升信噪比效用极为有限^[3], 星点提取仍有

较大困难, 容易出现非随机噪声叠加产生的虚警现象.

针对单帧红外星图星点提取不准, 多帧星点提取困难的问题, 提出一种基于背景预测的多帧叠加法, 该方法继承背景预测法准确提取星点优势的同时, 通过扩展边界获得原始星图星点有效边界范围, 采用多帧叠加法提高星点提取精度和鲁棒性.

1 白昼红外星图特点

白昼条件下, 红外星图成像噪声主要包含传感器内部噪声和外部噪声. 传感器内部噪声包含热噪声、散粒噪声、暗电流噪声、复位噪声、固定图形噪声^[14]; 外部噪声包含背景灰度分布不均、云层、天际线或空中漂浮物^[15], 这些噪声导致星图能量分布不均, 构成极为复杂. 同时为降低白昼大气辐射影响, 传感器需使用红外滤光片, 在滤除大量背景光的同时, 也削弱了星点能量^[16], 导致白昼红外星图呈现高噪声、低信噪比, 传统星点提取方法提取较为困难的特点^[17,18]. 图 1 所示为某红外探测器白昼条件下拍摄的星图.

除此之外, 虽然绝大部分星点成像理论上应为圆形^[19], 但由于红外星点能量较低, 白昼随机噪声明显, 常导致各帧星图星点受随机噪声影响成像为不规则图形^[20], 造成单帧提取星点质心精度鲁棒性较差. 图 2 所示为某红外传感器连续帧星点成像形状.

2 传统红外星图星点提取方法

2.1 背景预测法提取星点

背景预测法作为单帧红外星点识别探测的典型

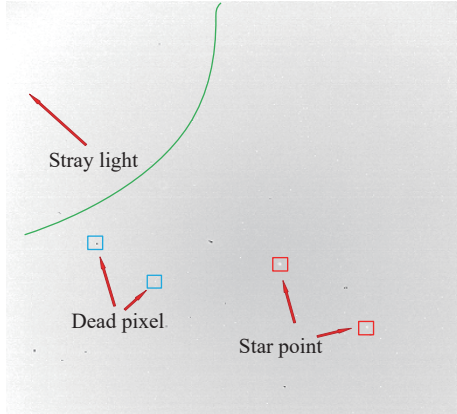


图 1 红外传感器拍摄白昼星图

Fig. 1 Daytime star image taken by an infrared sensor

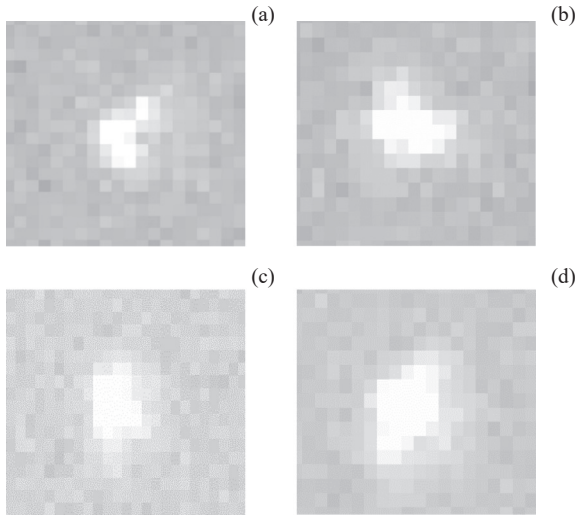


图 2 连续 4 帧红外星图星点成像形状

Fig. 2 Imaging shape of star points in infrared star images for four consecutive frames

方法, 应用较为广泛^[21]. 该方法基于星图背景中任意一点的灰度值与其周围像素点灰度值比较接近, 而星点与背景灰度值差异较大的原理, 利用其周围区域的灰度值预测该点灰度值. 由于背景点的实际灰度值与预测值近似, 两者相减得到的预测残差很小, 而目标点的实际灰度值与预测值相差较大, 则预测残差较大^[22]. 具体数学模型如下:

$$Y(m, n) = \sum_{l, k \in S_j} W_j(l, k) X(m-l, n-k). \quad (1)$$

其中, X 为尺寸 $m \times n$ 的输入图像, $Y(m, n)$ 为对应的像素预测值, $W_j(l, k)$ 为权重矩阵, s_j 对应局域背景选取点的范围集合.

预测图像与输入图像之间的残差图像为

$$E(m, n) = \begin{cases} X(m, n) - Y(m, n), & E(m, n) > 0; \\ 0, & E(m, n) \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中, $X(m, n)$ 为原始输入图像; $Y(m, n)$ 为预测图像.

典型的背景预测算法有固定权值滤波^[12]、二维最小均方滤波^[23]、形态学滤波^[7]和神经网络^[24]. 以上方法通过模板滤除背景, 增强目标信噪比探测目标, 取得了较好的效果. 然而这类滤波方法在探测星点的过程中, 也会影响星点能量分布, 导致通过增强算法提取的星点边界不准, 最终影响星点质心提取精度. 图 3 给出了采取不同方法, 对星图处理后的星点能量分布变化. 由图 3 可以看出, 不同处理方法, 导致星点能量比例发生改变, 最终导致阈值分割提取边界发生变化.

2.2 多帧叠加法提取星点

多帧叠加法一般先进行关联帧星图配准, 然后进行星图能量叠加. 多帧叠加法可以有效消除随机噪声, 并克服单帧星点成像随机带来的质心提取鲁棒性较差的问题.

通常红外星图由红外目标、真实红外背景和成像噪声组成, 可采用如下模型进行描述:

$$F(i, j) = T(i, j) + B(i, j) + N(i, j). \quad (3)$$

式中, $T(i, j)$ 表示真实红外目标; $B(i, j)$ 表示真实红外背景; $N(i, j)$ 为成像噪声, 包含探测器内部噪声和外部随机噪声^[2]. 设背景噪声为均值 μ 、标准差 δ 的高斯噪声, n 帧星图叠加归一化后, 成像噪声变为均值 μ 及标准差 $\delta/\sqrt{n}$ 的高斯噪声, 从而提升了星图信噪比.

然而, 对于白昼背景灰度值较高的红外星图, 背景噪声较为复杂, 随机噪声相对于非随机噪声占比较小, 单纯通过叠加星图来增强信噪比效果并不理想^[2], 甚至会将部分固定噪声增强为伪星点, 造成提取困难. 如图 4 所示, 将 10 帧静态星图经过叠加, 星图噪声分布情况较单帧改变并不明显, 背景均值只减少 0.13%, 标准差减少 9%. 可见对于高背景噪声的红外星图, 星图叠加信噪比增强作用极为有限.

3 基于背景预测的多帧叠加法星点提取

3.1 原理及流程

红外星图低信噪比、高噪声, 星点容易淹没在星

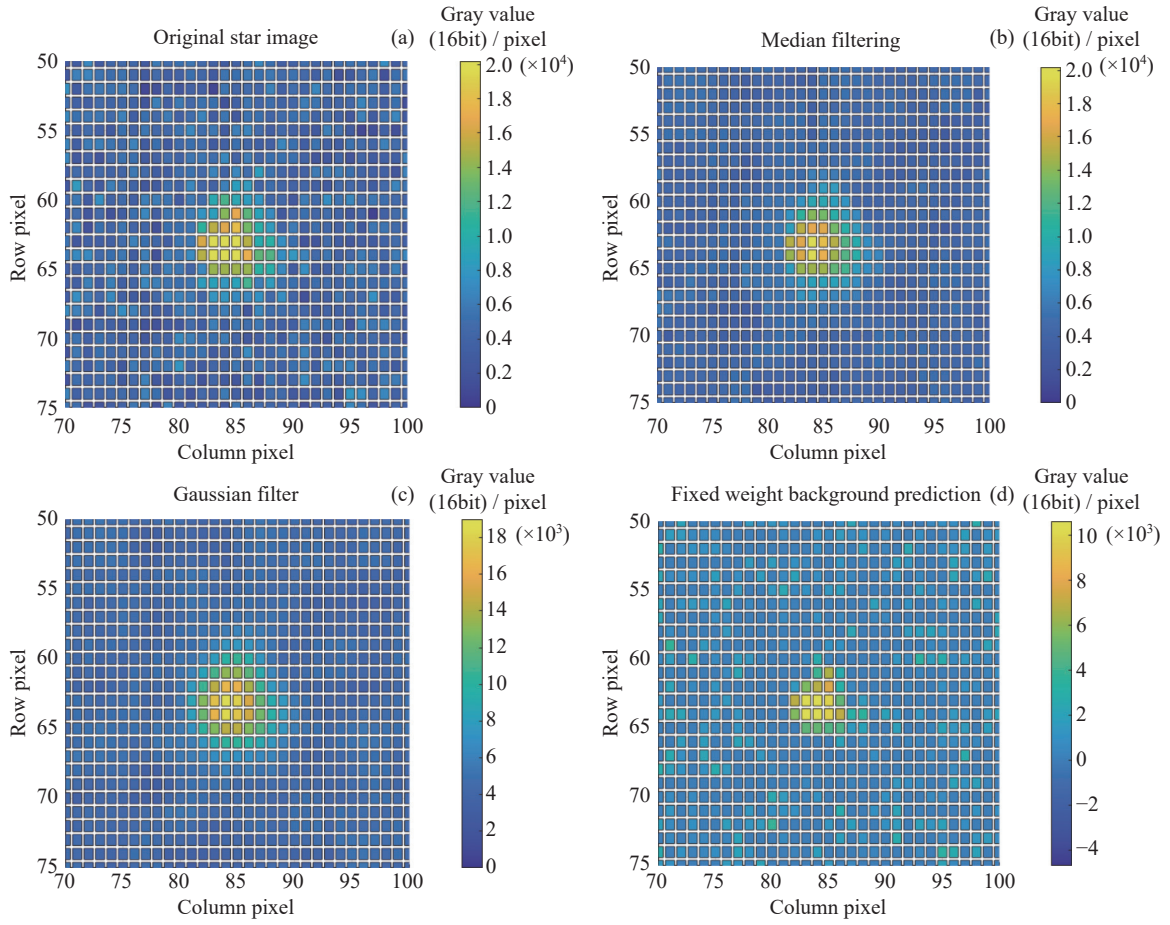


图 3 星图处理对星点能量分布影响

Fig. 3 Influence of star image processing on star point energy distribution

图背景中, 利用背景预测法能增强信噪比, 从而有效提出星点, 但星点边界却因星图增强发生改变, 甚至形变. 由于噪声影响, 星点大小和提取边界对星点质心提取精度具有重要影响^[25]. 为此提出通过对背景预测方法提取的疑似星点边界, 采用膨胀算子将疑似星点边界扩展, 使疑似星点提取半径扩大, 更全面地包含星点能量, 减少提取星点窗口过小造成误差影响.

为消除单帧星点成像不规则带来的星点质心提取鲁棒性较差问题, 采取多帧叠加方法, 利用提取出的疑似星点边界, 进行星点能量提取并多帧组合成新星图. 该方法可以克服单帧提取星点鲁棒性不强, 对各帧伪星点进行滤除, 同时由于使用疑似星点能量组合成星图, 具有高信噪比特点, 可以有效避免传统多帧叠加法信噪比不高弊端, 星点能量分布也将更加均匀可靠. 除此之外, 在每帧疑似星点提取过程中, 均进行阈值分割、连通域检查、滤除伪星点, 可大幅提升

星点探测准确率. 具体流程如图 5 所示.

3.2 具体步骤

步骤 1 背景预测方法中, 固定权值模板为典型的空域模板, 具有线性、计算效率高的特点^[9], 常用的固定权值模板有 h_1 , h_2 , h_3 . h_1 模板为平滑滤波器, 也是低通滤波器^[26], 计算量小但背景预测后星点增强效果不明显; h_2 和 h_3 模板以距离预测点距离为权重, 距离越大权重越大, 计算量稍大但兼容性较好, 适用于点目标和弱小目标^[27]. 由于需扩大星点提取范围, 且仿真星点范围为 $2 \times 2 \sim 5 \times 5$, 因此采用背景预测模板 h_3 对原星图进行背景预测后进行背景对消, 即

$$h_1 = \frac{1}{40} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$h_2 = \frac{1}{112} \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \end{bmatrix},$$

$$h_3 = \frac{1}{288} \begin{bmatrix} 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 9 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 9 \\ 9 & 4 & 1 & 1 & 1 & 4 & 9 \\ 9 & 4 & 1 & 0 & 1 & 4 & 9 \\ 9 & 4 & 1 & 1 & 1 & 4 & 9 \\ 9 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 9 \\ 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

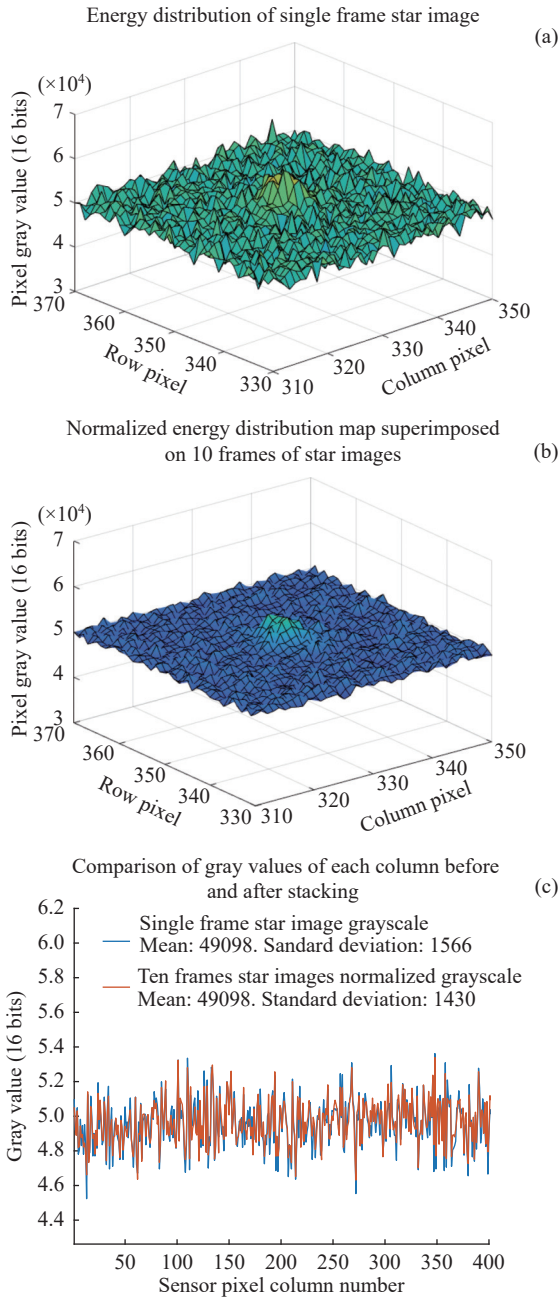


图4 多帧叠加信噪比效果

Fig. 4 Effect of multi-frame superimposed Signal-to-Noise Ratio (SNR)

步骤2 因背景对消后, 星图消除大量背景噪声, 星图整体能量区域平稳均衡. 因此只需采用自适应全局阈值分割法 $T = m + k\delta$, 其中 m 为图像均值, δ 为图像方差, k 为调节系数, 取值 3. 由于仿真星点半径对小于 4 个像素的八连通域视为噪声, 进行删除.

步骤3 对步骤2 处理所得疑似星点范围进行膨胀, 膨胀算子取半径为包含疑似星点连通域最小正方形边长一半的圆形, 扩展半径取联通域所在最小正方形一半作为疑似星点全能量范围, 如图6所示.

步骤4 根据疑似星点新边界, 在原星图上对疑似星点灰度值提取, 获取由疑似星点能量组成的新星图, 如图7所示.

步骤5 对各帧提取的新星图进行叠加, 融合成星图如图8(a)所示, 并对融合星图进行高斯滤波, 阈值分割, 提取星点质心如图8(b)所示.

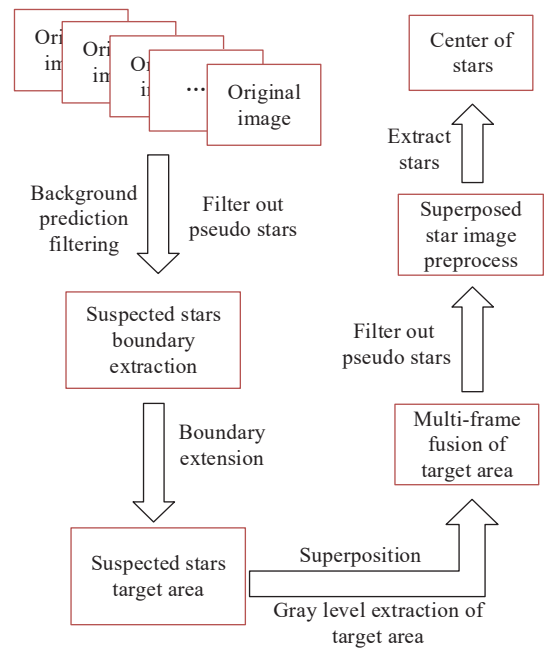


图5 基于背景预测的多帧叠加法流程

Fig. 5 Multi-frame stacking method based on background prediction

4 实验与分析

4.1 星图构建

由于实测星图中的星点坐标无法准确得知, 因此采用实测星图背景加仿真星点的半仿真实验方法, 用于验证所提算法的精度和鲁棒性. 取同一天拍摄的 600 张高背景噪声白昼红外星图, 在指定位置随机生成视星等 2.5~3.5, 高斯半径取 1~1.5. 星点生成为

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\delta_{\text{PSF}}^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\delta_{\text{PSF}}^2}\right] \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\delta_{\text{PSF}}^2}\right]. \quad (5)$$

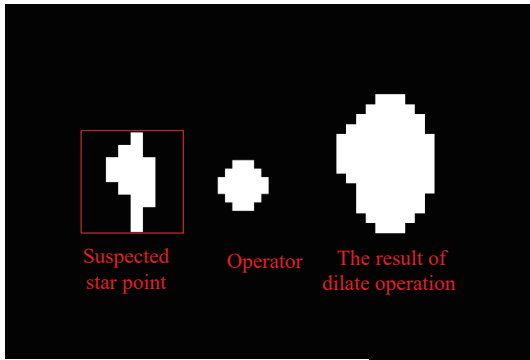


图 6 疑似星点边界膨胀范围

Fig. 6 Schematic diagram of suspected star boundary expansion

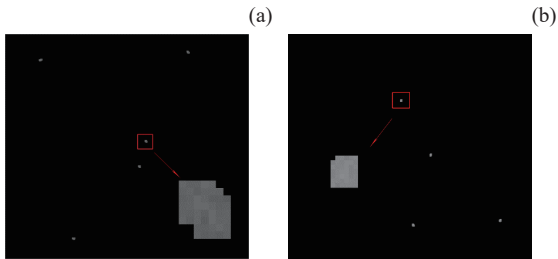


图 7 疑似星点边界膨胀后能量提取

Fig. 7 Energy extraction after expansion of suspected star boundary

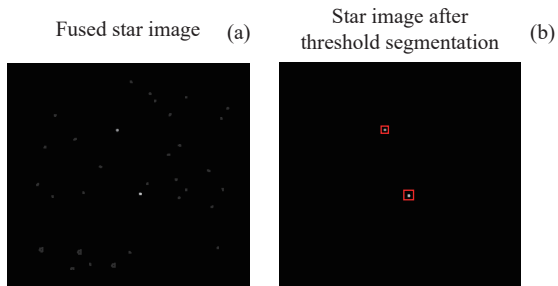


图 8 融合星图处理

Fig. 8 Fused star graph processing

其中, (x_0, y_0) 为真实星点中心位置, 取像素坐标 (330, 350); δ_{PSF} 为高斯半径, 表示点扩散函数的能量集中度. 具体仿真星图如图 9 所示.

4.2 白昼红外星图单帧提取星点

为验证高背景白昼红外星图星点探测提取复杂性, 对 600 张星图分别采用自适应阈值分割法和背景预测法进行星点提取. 自适应阈值分割法首先对星图进行高斯去噪, 然后进行全局自适应阈值分割, 最后利用带阈值质心法星点提取. 背景预测法首先进行背景预测, 确定星点边界, 利用提取星点边界对原星图进行带阈值质心法提取星点.

记录各方法每帧星图星点提取数目, 星点提取坐标, 其中提取星点不为 1 个星点, 或提取目标星点误差超 5 个像素, 计为提取失败. 图 10 中, 点位为各帧提取出的正确星点坐标统计, 包含提取失败帧所含正确目标星点数据.

表 1 和表 2 为两种方法提取质心具体数据, 其中提取 1 颗星均为提取成功帧; 坐标数据、几何距离误

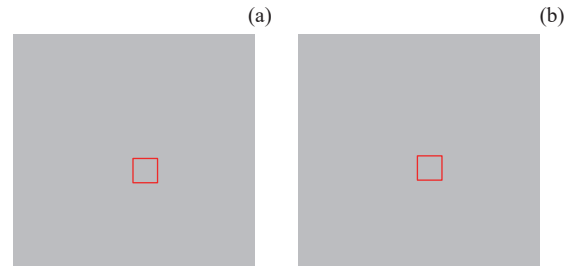


图 9 仿真星图

Fig. 9 Simulated star image

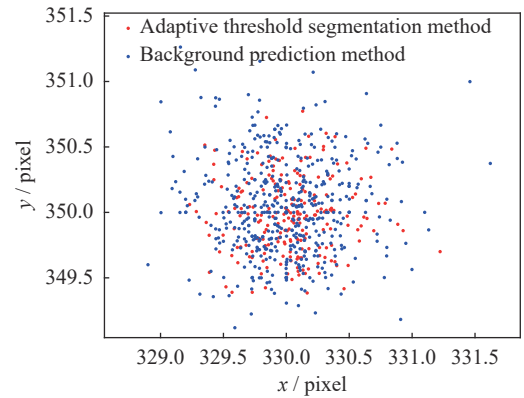


图 10 单帧提取目标星点位置散点

Fig. 10 Scatter plot of target star point position extracted in a single frame

表 1 单帧提取星点质心对比

Table 1 Comparison of star centroids extracted from single frame

单帧提取方法	x 坐标均值/pixel	y 坐标均值/pixel	距离误差均值/pixel	均方根误差/pixel	提取成功帧数	成功率/(%)
自适应阈值分割法	330.01	349.99	0.39	0.21	92	15.3
背景预测法	329.99	350.03	0.46	0.28	486	81.0

表 2 各帧提取星点统计

Table 2 Statistics of extracted star points for each frame

方法	自适应阈值分割法					背景预测法			
提取星点数	0	1	2~3	4~7	≥ 8	0	1	2	3
帧数	82	92	182	119	117	25	486	78	11

差数据为包含提取所有正确目标星点数据,即如果提取 3 颗星点,1 颗为目标星点,则将目标星点数据纳入计算。

由表 1 和表 2 可知,对于传统高背景噪声、低信噪比红外星图,自适应阈值法虽然质心提取精度较高,但提取成功率只有 15.3%,主要因为滤波处理容易将弱星点滤除,阈值分割容易将高噪声视为星点误提取,将弱星点视为噪声提不出。背景预测法虽能增强信噪比,大幅提升星点探测成功率,达到 81%,但由于信噪比增强改变星点能量分布,造成星点边界提取不准,导致质心提取精度下降。

4.3 白昼红外星图多帧叠加提取星点

为探求多帧叠加提取星点质心精度、鲁棒性,充分考虑星图叠加的复杂性、随机性,将 600 张星图每组 10 帧,随机分成 60 组,计为 1 次分组。共分 10 次,得到 600 组星图。

分别按照传统帧叠加法和本文所述方法提取星点,其中传统方法按照先进行星图叠加融合,再对融合星图进行高斯滤波,全局自适应阈值分割,采用带阈值质心法提取星点质心流程,并对星点信噪比进行计算,信噪比计算方法如下:

$$R = \frac{S_{\text{face}} - S_{\text{back}}}{\sqrt{S_{\text{back}}}}. \quad (6)$$

其中, S_{face} 为图上星点像元的平均灰度值, S_{back} 为背景像元的平均灰度值。

两种方法提取星点位置分布及具体数据见图 11 和表 3 和表 4,数据统计方法同 3.2 节。由图 11 结合表 3 和表 4 可知,因各帧星点能量随机分布,多帧叠

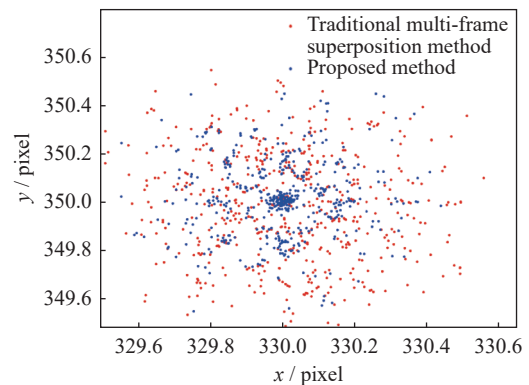


图 11 多帧提取目标星点位置散点

Fig. 11 Scatter plot of target star point position extracted from multiple frames

加很好地消除了星点成像的随机误差,传统叠加法叠加 10 帧精度较单帧提升 53.8%。但传统叠加法虽然有较高的精度,但叠加后星点信噪比增强不明显,导致星点提取依然很困难,星点提取正确率仅为 57.6%,较自适应阈值分割法 15.3% 虽然有明显提升,但依然较低。本文所提方法继承了传统多帧叠加法的精度优势,有效降低星点成像随机性误差,提取精度较自适应阈值分割法和背景预测法分别提升 69.2% 和 73.9%,较传统多帧叠加法提升 33.3%;同时该方法充分利用背景预测增强星图信噪比的优势,避免了多帧叠加后信噪比增强不明显问题,信噪比较传统多帧叠加法提升 77.4%,可有效滤除伪星点和随机噪声,星点提取正确率为 99.5%,较自适应阈值分割法和多帧叠加法分别提升 84.2% 和 37.9%,较背景预测法提取准确率提升也达到 14.5%,且未出现误检测帧组。

表 3 多帧叠加法提取星点质心对比

Table 3 Comparison of star centroids extracted by multi-frame superposition method

多帧叠加法提取法	x 坐标均值 /pixel	y 坐标均值 /pixel	信噪比均值	距离误差均值 /pixel	均方根误差 /pixel	提取成功帧数	成功率/(%)
传统多帧叠加法	330.01	350.01	0.6379	0.18	0.12	346	57.6
本文所提方法	330.00	350.01	1.1322	0.12	0.07	597	99.5

表 4 多帧叠加法提取质星点统计

Table 4 Statistics of multi-frame superposition extraction of mass star points

方法	传统单帧星点提取法						本文所提方法	
提取星点数	0	1	2	3	4~8	≥ 8	0	1
帧数	70	346	37	23	82	42	3	597

5 结论

针对高背景噪声、低信噪比、星点成像随机的白昼红外星图处理中, 单帧星图增强处理方法容易改变星图能量分布, 造成星点边界变化; 多帧叠加信噪比增强有限, 星点提取较为困难的突出特点, 提出了基于背景预测提取疑似星点大致边界, 再通过对边界膨胀获得疑似星点新边界, 然后基于新边界对原星图进行背景消除获得残差图, 最后叠加残差图并提取星点质心。

实验表明, 该方法提取正确率为 99.5%, 较自适应阈值分割法和多帧叠加法分别提升 84.2% 和 37.9%, 较背景预测法正确率提升 14.5%。同时该方法较阈值分割法和背景预测法精度分别提升 12.8% 和 41.4%。此外, 提出了一种星点质心提取的方法和思路, 实验虽使用背景预测方法进行星点探测增强, 实际作业中可根据星图特点灵活选择单帧星图信噪比增强方法。

参考文献

[1] HAN Jinhui, WEI Yantao, PENG Zhenming, *et al.* Infrared dim and small target detection: a review[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51**(4): 20210393 (韩金辉, 魏艳涛, 彭真明, 等. 红外弱小目标检测方法综述 [J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(4): 20210393)

[2] ZHANG Geng, ZHANG Chao, LI Chonghui, *et al.* Star point boundary extraction algorithm based on shortwave infrared star image[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2020, **37**(5): 447-453 (张耿, 张超, 李崇辉, 等. 短波红外星图的星点边界提取算法 [J]. *测绘科学技术学报*,

2020, **37**(5): 447-453)

[3] WU Zhoupeng. Star Image Signal-to-Noise Ratio Enhancement Technology and Star Centroid Estimation for Day-time Star Tracker[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018 (吴州平. 全天时星敏感器星图信噪比增强与星点提取研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2018)

[4] ZHENG X J, HUANG Y Q, MAO X N, *et al.* Research status and key technologies of all-day star sensor[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, **1510**(1): 012027

[5] XU Jun. Research on the Detection of Small and Dim targets in Infrared Images[D]. Xi'an: Xidian University, 2003 (徐军. 红外图像中弱小目标检测技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003)

[6] PILLAI A, RAJKUMAR S, MARIMUTHU K, *et al.* Adaptive new top-hat transform and multi-scale sequential toggle operator based infrared image enhancement [C]//Proceedings of 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies. Vellore: IEEE, 2017: 1-5

[7] CHEN C L P, LI H, WEI Y T, *et al.* A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, **52**(1): 574-581

[8] WANG H, XIN Y H. Wavelet-based contourlet transform and kurtosis map for infrared small target detection in complex background[J]. *Sensors*, 2020, **20**(3): 755

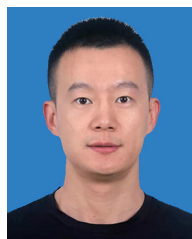
[9] ZHANG H, NIU Y X, LU J Z, *et al.* Accurate and autonomous star acquisition method for star sensor under complex conditions[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, **2017**: 1643967

[10] JIN Zhuzhang, FANG Xuyuan, HUANG Yanhui, *et al.* Satellite cloud image retrieval based on deep metric learning[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, **49**(4): 210307 (金柱璋, 方旭源, 黄彦慧, 等. 基于深度度量学习的卫星云图检索 [J]. *光电工程*, 2022, **49**(4): 210307)

[11] NIE Qingfeng, LIU Yingjie, LIANG Yun. Infrared dim tar-

- get detection based on neural network model with sparsity constraint[J]. *Electronics Optics & Control*, 2022, **29**(8): 40-44 (聂青凤, 刘应杰, 梁赟. 基于稀疏约束神经网络的红外弱小目标检测技术 [J]. 电光与控制, 2022, **29**(8): 40-44)
- [12] WAN Lili. Infrared Target Detection Based on Background Prediction[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015 (万丽丽. 基于背景预测的红外弱小目标检测 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015)
- [13] LIAN Da, MAO Xiaonan, ZHENG Xunjiang, *et al.* Iterative estimation algorithm of star tracker's star imaging model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(1): 0104002 (练达, 毛晓楠, 郑循江, 等. 星敏感器恒星成像模型迭代估计方法 [J]. 光子学报, 2019, **48**(1): 0104002)
- [14] ZHANG Hui, ZHONG Jianyong, YUAN Jiahui, *et al.* Circuit noise effects on star sensor position accuracy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 1052-1056 (张辉, 钟建勇, 袁家虎, 等. 电路噪声对星敏感器星点定位精度的影响 [J]. 光学精密工程, 2006, **14**(6): 1052-1056)
- [15] LIANG Min. Research on Detection and Tracking for Small Dim Targets in Infrared Images[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007 (梁敏. 红外弱小目标检测与跟踪技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007)
- [16] XU Qing, ZHAO Chunhui, BAI Shan, *et al.* Research status and key technologies of all-sky star sensor for astronomical/inertial integrated navigation[C]//Proceedings of the Symposium on Inertial Technology and Intelligent Navigation, 2019: 266-274 (徐卿, 赵春晖, 白山, 等. 面向天文/惯性组合导航的全天星敏感器研究现状及关键技术 [C]//惯性技术与智能导航学术研讨会论文集, 2019: 266-274)
- [17] LIU Shuai, WANG Duo, SUN Tengfei. Daytime infrared star target detection based on SUSAN operator[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(9): 571-574, 586 (刘帅, 王铎, 孙腾飞. 基于 SUSAN 算子的白天红外星目标检测 [J]. 红外技术, 2013, **35**(9): 571-574, 586)
- [18] MA Pengge, WEI Hongguang, SUN Junling, *et al.* A LOG filter based enhanced local contrast algorithm to detect infrared small targets[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, **44**(4): 1041-1049 (马鹏阁, 魏宏光, 孙俊灵, 等. 基于高斯-拉普拉斯滤波的增强局部对比度红外弱小目标检测算法 [J]. 兵工学报, 2023, **44**(4): 1041-1049)
- [19] YUAN Yulei. Research on Fish-Eye Camera Stellar Calibration Technology[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012 (原玉磊. 鱼眼相机恒星法检校技术研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012)
- [20] WU Zhouping, TAN Wenfeng, DAI Dongkai, *et al.* A method of star extraction for near-infrared star image-based on multi-filter[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2019, **17**(1): 25-30 (吴州平, 谭文锋, 戴东凯, 等. 一种基于多重滤波的近红外星图星点提取方法 [J]. 光学与光电技术, 2019, **17**(1): 25-30)
- [21] BAI X Z, ZHANG S, DU B B, *et al.* Survey on dim small target detection in clutter background: wavelet, inter-frame and filter based algorithms[J]. *Procedia Engineering*, 2011, **15**: 479-483
- [22] DONG W K, ZHANG J Q, YANG D D, *et al.* Homogeneous background prediction algorithm for detection of point target[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(2): 70-74
- [23] CAO Y, LIU R M, YANG J. Small target detection using two-dimensional least mean square (TDLMS) filter based on neighborhood analysis[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, **29**(2): 188-200
- [24] SHIRVAIKAR M V, TRIVEDI M M. A neural network filter to detect small targets in high clutter backgrounds[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1995, **6**(1): 252-257
- [25] HANCOCK B R, STIRBL R C, CUNNINGHAM T J, *et al.* CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/imager position accuracy[C]//Proceedings of SPIE 4284, Functional Integration of Opto-Electro-Mechanical Devices and Systems. San Jose, CA: SPIE, 2001: 43-53
- [26] YU Jinsong, WAN Jiuqing, GAO Xiulin. Research on dim point moving target detection in infrared image[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, **29**(12): 1518-1521 (于劲松, 万九卿, 高秀林. 红外图像弱小点目标检测技术研究 [J]. 兵工学报, 2008, **29**(12): 1518-1521)
- [27] YANG Liping, FENG Xiaoyi. Weak and small infrared targets detection based on background prediction[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(7): 404-408 (杨丽萍, 冯晓毅. 一种基于背景预测的红外弱小目标检测方法 [J]. 红外技术, 2007, **29**(7): 404-408)

作者简介



杨原 男, 1994年11月出生于河南省浉池县, 现为信息工程大学在读研究生, 主要研究方向为天文导航、空间目标检测等。

E-mail: yangyuan00001@163.com



李崇辉 (通信作者) 男, 1987年2月出生于四川省资阳市, 现为信息工程大学地理空间信息学院副教授, 主要研究方向为自主导航与组合导航、天文导航等。

E-mail: 13525504183@126.com