

引用格式: SONG Xuedong, MA Yingchao, ZHOU Qi, et al. Real-time Bad Pixel Detection and Compensation Method for Short-wave Infrared Camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(9):0910004

宋雪冬, 马英超, 周琦, 等. 短波红外相机实时坏像元检测与补偿方法[J]. 光子学报, 2022, 51(9):0910004

# 短波红外相机实时坏像元检测与补偿方法

宋雪冬<sup>1,2</sup>, 马英超<sup>1,2</sup>, 周琦<sup>1,2</sup>, 练达<sup>1,2</sup>, 余路伟<sup>1,2</sup>, 毛晓楠<sup>1,2</sup>

(1 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

(2 上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109)

**摘 要:** 太空辐照环境和高能粒子往往会导致红外相机在轨运行时出现新的坏像元, 严重影响相机提取的星点目标质心坐标的精度。针对该问题, 提出了一种基于灰度梯度和稀疏视野的实时坏像元检测与补偿方法。该方法采用  $5 \times 5$  大小的处理窗口以滑窗的形式基于灰度梯度值进行检测, 并采用稀疏视野有效避免了领域坏像元对检测与补偿结果的影响。实验证明, 红外图像中处于不同灰度值背景中的坏像元均能准确检测出并补偿, 显著提升了检测准确率。补偿后的星点目标质心坐标提取误差减小至 0.2% 以内。同时, 该方法对数据存储空间要求低, 数据处理过程计算量小, 适合随图像数据流处理, 具有较好的实时性。

**关键词:** 图像处理; 短波红外相机; 坏像元; 实时检测与补偿; 灰度梯度; 稀疏视野

**中图分类号:** TP391.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20225109.0910004

## 0 引言

天文导航技术广泛应用于卫星、深空探测器等导航系统<sup>[1]</sup>, 具有被动探测、自主工作、精度高等优点<sup>[2]</sup>。而点目标测量相机则是天文导航技术中的关键技术之一, 用于测量星点坐标, 辅助如星敏感器等天文导航器得到精确的位置、姿态等信息。采用短波红外 InGaAs 焦平面探测器的点目标测量相机具有小型化、低功耗、探测率高、均匀性好等优点<sup>[3, 4, 5]</sup>。

由于制造材料和生产工艺等因素, 短波红外焦平面往往会存在一些坏像元<sup>[6, 7]</sup>。这严重影响了红外相机的成像质量<sup>[8]</sup>, 从而影响相机输出的点目标质心坐标精度<sup>[9]</sup>。通常, 可利用测试设备对焦平面探测器坏像元进行检测<sup>[10, 11]</sup>, 当相机工作时再根据已有的检测结果对坏像元进行补偿。然而, 由于红外相机长期在轨工作, 不可避免地受到太空辐照环境或高能粒子影响, 会出现新的坏像元。红外相机在轨运行时需要对坏像元进行实时的检测与补偿, 而坏像元的漏检和误检都会影响成像质量, 造成图像信息的丢失, 最终影响点目标质心的提取精度。因此, 对于在轨运行的红外相机, 准确、可靠的实时坏像元检测与补偿算法是非常重要的图像预处理技术之一。

2006 年, 文献[12]提出了一种基于场景的坏像元检测方法, 该方法对随机出现的坏像元有较好的检测效果, 但是容易将小目标误判为坏像元, 并且不利于硬件实现。2008 年, 一种基于噪声等效温差和灰度最小方差的红外焦平面阵列无效像元检测方法被提出<sup>[13]</sup>, 但是该方法需要缓存多帧图像数据, 对存储空间要求高、计算量大, 不适用于红外相机在轨运行实时检测与补偿。2014 年, 文献[14]针对光斑探测相机提出了一种基于灰度阈值的实时坏像元检测与补偿方法, 无需缓存整帧图像数据, 计算量小、实时性好。但由于采用灰度阈值作为坏像元检测条件, 无法直接反映出坏像元与邻域像元在灰度值变化趋势上的特性, 容易出现漏检和误检, 并且检测和补偿结果均会受相邻坏点影响。2017 年, 文献[15]提出了基于邻域均方差和隶属

基金项目: 国家重点研发计划(Nos.2019YFA0706002, 2019YFA0706003), 国家自然科学基金(No.62005158)

第一作者: 宋雪冬(1996-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为空间光电探测。Email: owensong96@163.com

通讯作者: 毛晓楠(1981-), 男, 研究员, 硕士, 主要研究方向为空间光电探测。Email: meureka@126.com.

收稿日期: 2021-12-24; 录用日期: 2022-04-21

<http://www.photon.ac.cn>

度的滑窗检测方法。同年,文献[16]提出了基于 $3\sigma$ 原则的 $5 \times 5$ 窗口盲元检测与补偿方法。2019年,文献[17]提出了基于邻域均值、中值和一级梯度的坏像元滑窗检测算法。虽然这些法有效提升了特征可分性,提升了检测准确率,但是坏像元判断依据的计算量较大,算法实时性较差。

本文针对短波红外相机提出了一种基于灰度梯度和稀疏视野的实时坏像元检测与补偿方法。该方法不仅采用了灰度梯度直接反映坏像元与邻域像元的灰度值变化趋势,并且利用稀疏视野有效地避免了相邻坏像元对检测与补偿结果的影响,具有较好的鲁棒性。同时,采用 $5 \times 5$ 窗口滑动检测的形式,计算量小,适用于红外相机在轨运行时实时的检测坏像元并补偿。此外,通过实验验证,灰度梯度和稀疏视野有效地改善了坏像元检测的成功率与补偿效果,并显著提升了红外相机提取点目标质心坐标的精度。

## 1 坏像元的特性与影响

### 1.1 坏像元特性

短波红外焦平面探测器是一种通过探测器芯片上的感光像元进行光电转换,电信号处理并成像的集成电路芯片,可探测目标的短波红外辐射。在其工作过程中,感光像元会由于环境、温度变化等各种原因受到损坏而导致无法正常工作。此时,该感光像元变为坏点。短波红外焦平面探测器坏点通常分为三种类型:亮点、暗点和色点<sup>[14]</sup>。亮点和暗点表示该感光像元无法感光,只能输出恒定值。恒定输出值接近饱和的坏像元为亮点,接近0或远低于背景灰度值的坏像元为暗点。色点则表示该感光像元可以感光,但是输入值和输出值的响应关系与正常像元区别较大,可分为亮点型色点和暗点型色点,与亮点或暗点具有相同的表现形式。图1为 $32 \times 32$ 背景图像中分别存在亮点和暗点的三维示意图,纵坐标 $g$ 为8比特量化的灰度值。图像背景灰度值在30附近,而亮点灰度值为255、暗点灰度值为0。

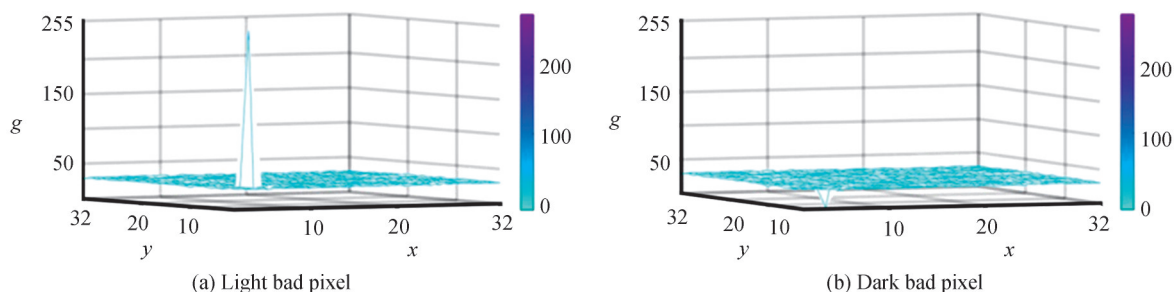


图1 坏像元三维图像  
Fig.1 Bad pixel 3D image

坏像元的表现形式主要是在灰度值与周围邻域像素有较大区别,图2和图3为坏像元与邻域像元沿同一方向的灰度值变化曲线和灰度梯度值变化曲线。灰度梯度值能够直接反映出坏点灰度与周围邻域像元灰度的突变程度。

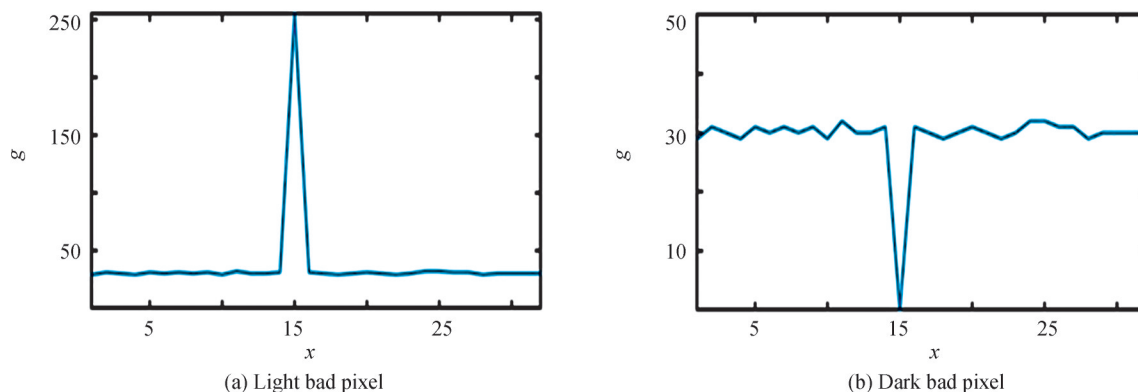


图2 坏像元与邻域正常像元灰度值曲线  
Fig.2 Gray value curves of bad pixel and neighboring normal pixels

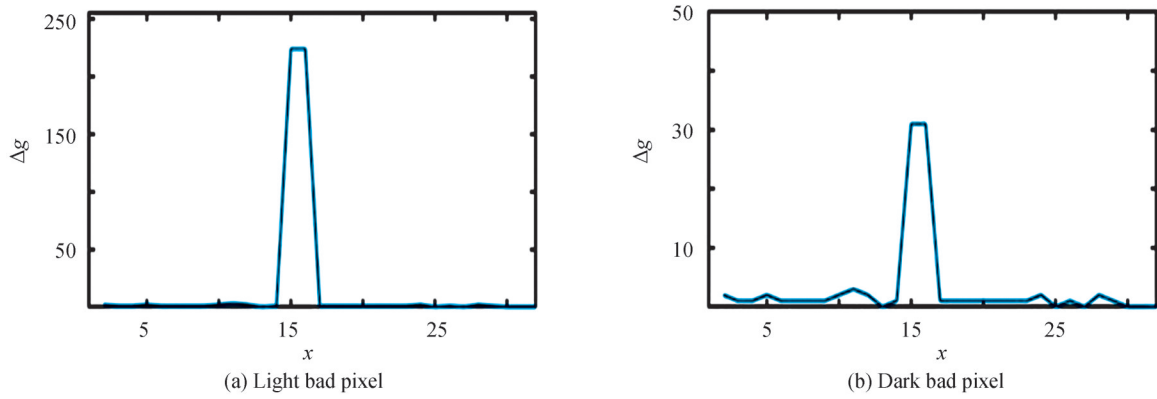


图3 坏像元与邻域正常像元灰度梯度值曲线  
Fig.3 Gray gradient value curves of bad pixel and neighboring normal pixels

### 1.2 坏像元对目标质心提取的影响

短波红外相机采用式(1)~(3)所示的质心公式<sup>[18]</sup>提取点目标的质心坐标,具有高精度、高稳定性、可随图像数据流实时处理的优点。

$$c_x = \frac{\sum_{(x,y \in S)} x \cdot (G(x,y) - T_g)}{\sum_{(x,y \in S)} (G(x,y) - T_g)} \quad (1)$$

$$c_y = \frac{\sum_{(x,y \in S)} y \cdot (G(x,y) - T_g)}{\sum_{(x,y \in S)} (G(x,y) - T_g)} \quad (2)$$

$$T_g = G_{aver} + T_{ofst} \quad (3)$$

式中, $x,y$ 为像元的坐标, $G(x,y)$ 为该像元的输出灰度值, $G_{aver}$ 为图像像素灰度平均值, $T_{ofst}$ 为阈值偏移量, $T_g$ 为判断像素是否属于光斑的阈值, $S$ 为属于点目标的像素集合,集合内像元灰度值 $G(x,y) > T_g$ 且每个像元互为四连通域。若该集合中存在坏像元,则会影响到图像灰度均值计算和质心坐标提取的精度。

图4为红外相机探测到的星点图像和其三维示意图。当背景或星点目标中出现坏像元时,星点目标的质心坐标提取将受到影响,如图5。表1列出了星点目标质心坐标的提取结果。可以看出,坏像元对质心提取的结果产生显著影响,尤其是在光斑中的坏像元, $x,y$ 坐标提取误差达到了1.5%。因此,对红外相机实时坏像元检测与补偿方法的研究是至关重要的。

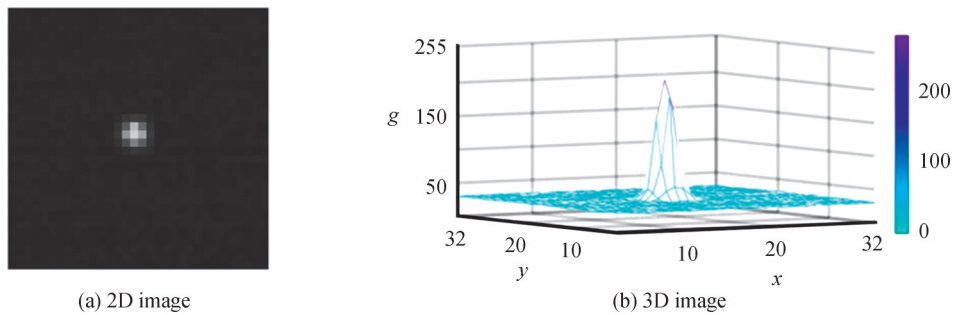


图4 星点目标图像  
Fig.4 The infrared image of star target

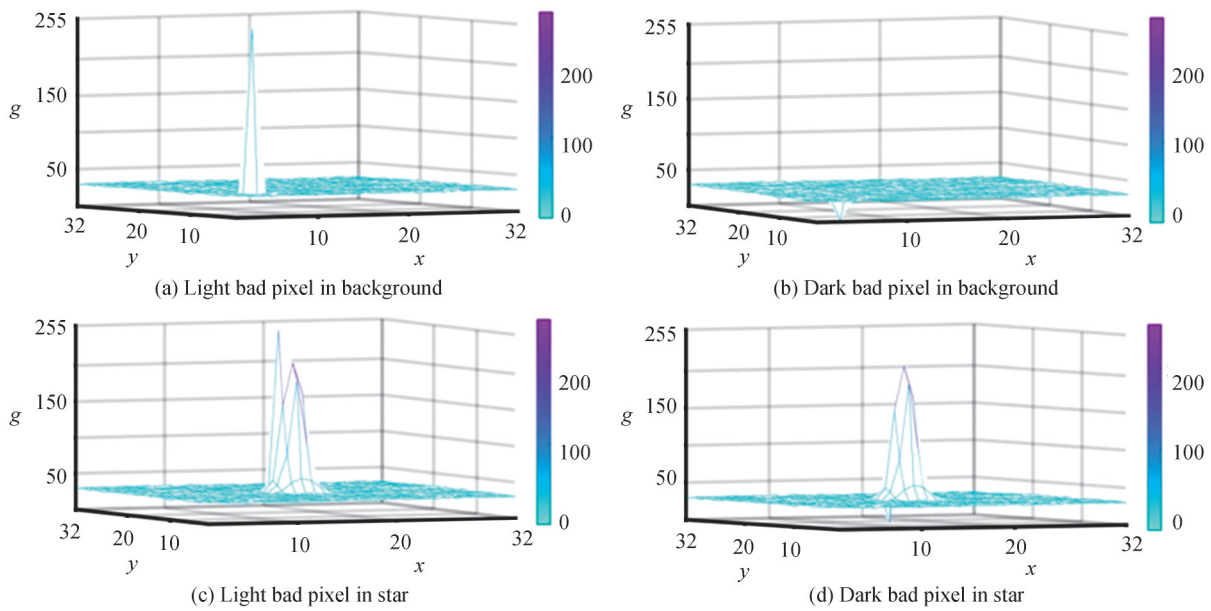


图5 星图中存在坏像元三维图  
Fig.5 3D image of bad pixel in infrared image

表1 坏像元对星点目标质心坐标提取的影响

Table 1 The influence of bad pixels on centroid coordinate extraction of star target

Type of bad pixel	Centroid coordinates	X coordinate error	Y coordinate error
None	(15.065 6, 14.878 6)	/	/
Light bad pixel in background	(15.065 7, 14.878 3)	0.001%	0.002%
Dark bad pixel in background	(15.065 5, 14.878 7)	0.001%	0.001%
Light bad pixel in star	(14.845 8, 15.109 8)	1.459%	1.554%
Dark bad pixel in star	(15.092 5, 14.850 4)	0.179%	0.190%

## 2 坏像元检测与补偿方法

本文基于灰度梯度和稀疏视野提出了一种适用于红外相机在轨运行时的实时坏像元检测与补偿算法。灰度梯度能够直接反映出坏点与邻域正常像元灰度值的突变程度,而稀疏视野能够避免邻域内坏点对灰度梯度的影响。

### 2.1 坏像元检测方法

如图6,坏像元检测过程分为亮点检测和暗点检测。同时不符合亮点特性和暗点特性的像元判断为正常像元。

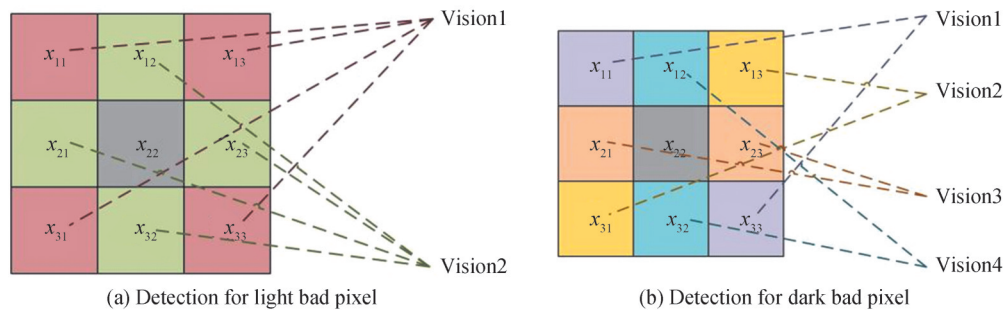


图6 坏像元检测窗口  
Fig.6 The detection window of bad pixels

检测亮点时,本方法采用 $3 \times 3$ 的检测窗口,将待检测像元邻域的八个像素均分为两个部分 $x_{11}, x_{13}, x_{31}, x_{33}$ 和 $x_{12}, x_{21}, x_{23}, x_{32}$ ,每个部分包含4个领域像元,对应的像元灰度值分别为 $g_{11}, g_{13}, g_{31}, g_{33}$ 和 $g_{12}, g_{21}, g_{23}, g_{32}$ 。对两个部分分别进行亮点检测,使得检测窗口的视野具有稀疏性,避免邻域内的坏像元影响检测结果。具体的亮点检测步骤如下:

首先,根据4个邻域像元判断待检测像元所处的位置,并选择相应的亮点检测判断阈值 $T_{\text{lit}}$ ,可表示为

$$T_{\text{lit}} = f_1(g_1, g_2, g_3, g_4) = \begin{cases} T_{\text{high}} & \text{average}[g_1, g_2, g_3, g_4] > T_g \\ T_{\text{low}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $g_1, g_2, g_3, g_4$ 为四个领域像元灰度值,即 $g_{11}, g_{13}, g_{31}, g_{33}$ 或 $g_{12}, g_{21}, g_{23}, g_{32}$ , $T_{\text{lit}}$ 为判断亮点时的阈值参数,当待检测像元处于光斑中时取 $T_{\text{high}}$ ,处于背景中时则取 $T_{\text{low}}$ 。 $G_{\text{aver}}$ 为全局灰度均值,通常取前一帧的灰度均值; $T_{\text{ofst}}$ 为偏移量阈值。若邻域像元的均值大于全局均值与偏移量阈值的和,则认为待检测像元处于光斑中,否则认为处于背景中。

然后,按式(5)判断是否符合亮点特性,若待检测像元与判断阈值 $T_{\text{lit}}$ 的差大于4个邻域像元的灰度值中的最大值,则为亮点型坏点。

$$r_{\text{lit}} = f_2(g_1, g_2, g_3, g_4) = \begin{cases} 1 & g_{22} - T_{\text{lit}} > \max[g_1, g_2, g_3, g_4] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

只有当待检测像元灰度值 $g_{22}$ 与两部分邻域像元 $g_{11}, g_{13}, g_{31}, g_{33}$ 和 $g_{12}, g_{21}, g_{23}, g_{32}$ 的检测结果均不符合亮点特性,则为正常像元。

检测暗点时,将待检测像元邻域的八个像素均分为四个部分 $x_{11}, x_{33}, x_{12}, x_{32}, x_{13}, x_{31}$ 和 $x_{21}, x_{23}$ ,对应像元的灰度值分别为 $g_{11}$ 与 $g_{33}, g_{12}$ 与 $g_{32}, g_{13}$ 与 $g_{31}$ 和 $g_{21}$ 与 $g_{23}$ ,分别按式(6)进行判断,避免邻域内存在暗点影响检测结果。

$$r_{\text{drk}} = f_3(g_1, g_2) = \begin{cases} 1 & g_{22} + T_{\text{drk}} < \min[g_1, g_2] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $g_1, g_2$ 为两个邻域像元灰度值, $T_{\text{drk}}$ 为判断暗点时的阈值参数。若待检测像元与判断阈值 $T_{\text{drk}}$ 的和小于2个邻域像元的灰度值中的最小值,则为暗点型坏点。

最后,只有当待检测像元灰度值 $g_{22}$ 与四部分邻域像元 $g_{11}$ 与 $g_{33}, g_{12}$ 与 $g_{32}, g_{13}$ 与 $g_{31}$ 和 $g_{21}$ 与 $g_{23}$ 的检测结果均不符合暗点特性,则为正常像元。

根据式(7)可得最终的检测结果。若待检测像元在亮点检测和暗点检测中的结果均为正常像元,则判断为正常像元。

$$f_{\text{det}}(x, y) = \begin{cases} 0 & r_{\text{lit}} = r_{\text{drk}} = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

## 2.2 坏像元补偿方法

如图7所示,采用 $5 \times 5$ 窗口,以滑窗的方式进行坏像元补偿。计算邻域像元的灰度均值作为待补偿像

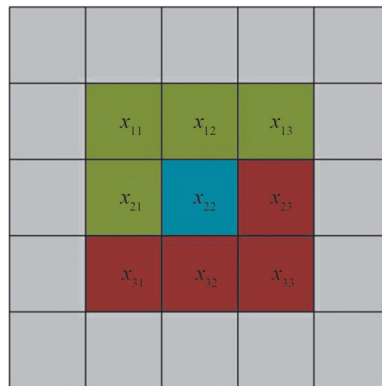


图7 坏像元补偿窗口

Fig.7 The compensation window of bad pixels

元的灰度值。具体分为两步：

第一步,由于采用滑窗的方式,当检测与补偿 $x_{22}$ 像元时, $x_{11}$ 、 $x_{12}$ 、 $x_{13}$ 、 $x_{21}$ 均已完成检测与补偿。再对 $x_{23}$ 、 $x_{31}$ 、 $x_{32}$ 、 $x_{33}$ 进行检测。

第二步,若 $x_{22}$ 为坏像元,则根据 $x_{23}$ 、 $x_{31}$ 、 $x_{32}$ 、 $x_{33}$ 的检测结果,按式(8)选择相应的邻域像元计算灰度均值,得到 $x_{22}$ 的补偿值。 $f_{\text{det}}(\cdot)$ 表示待补偿像元的邻域像元的检测结果。

$$g_{22} = \begin{cases} \frac{g_{11} + g_{12} + g_{13} + g_{21} + g_{23} + g_{31} + g_{32} + g_{33}}{8} & f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 0 \\ \frac{g_{11} + g_{13} + g_{31} + g_{33}}{4} & \begin{cases} f_{\text{det}}(x_{23}) = 1, f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 0 \\ f_{\text{det}}(x_{32}) = 1, f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 0 \\ f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = 1, f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 0 \end{cases} \\ \frac{g_{12} + g_{21} + g_{23} + g_{32}}{4} & \begin{cases} f_{\text{det}}(x_{31}) = 1, f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 0 \\ f_{\text{det}}(x_{33}) = 1, f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = 0 \\ f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 1, f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = 0 \end{cases} \\ \frac{g_{11} + g_{12} + g_{32} + g_{33}}{4} & f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{31}) = 1, f_{\text{det}}(x_{32}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 0 \\ \frac{g_{11} + g_{21} + g_{23} + g_{33}}{4} & f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = 1, f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 0 \\ \frac{g_{13} + g_{21} + g_{23} + g_{31}}{4} & f_{\text{det}}(x_{32}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 1, f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{31}) = 0 \\ \frac{g_{12} + g_{13} + g_{31} + g_{32}}{4} & f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 1, f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = 0 \\ \frac{g_{11} + g_{33}}{2} & f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = 1, f_{\text{det}}(x_{33}) = 0 \\ \frac{g_{12} + g_{32}}{2} & f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 1, f_{\text{det}}(x_{32}) = 0 \\ \frac{g_{13} + g_{31}}{2} & f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 1, f_{\text{det}}(x_{31}) = 0 \\ \frac{g_{21} + g_{23}}{2} & f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 1, f_{\text{det}}(x_{23}) = 0 \\ g_{12} + g_{21} - g_{11} & f_{\text{det}}(x_{23}) = f_{\text{det}}(x_{31}) = f_{\text{det}}(x_{32}) = f_{\text{det}}(x_{33}) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

### 3 实验结果

本文所提出的短波红外相机实时坏像元检测与补偿方法采用灰度梯度和稀疏视野,不受背景灰度值变化和邻域坏像元的影响,具有较好的鲁棒性。通过实验,分别验证灰度梯度和稀疏视野的有效性,同时验证本方法的性能。

#### 3.1 灰度梯度的有效性

本方法基于像元的灰度梯度进行检测。通过与直接采用灰度检测的方法对比,以证明灰度梯度的有效性。图8和图9所示不同背景下存在亮点,背景2的灰度值高于背景1。采用灰度检测方法,将灰度检测阈值设为50,检测结果如图10,图中红色标记表示检测成功。而采用灰度梯度检测方法,亮点检测阈值 $T_{\text{th}}$ 设为20,图11为检测结果。

图10为直接将待检测像元的灰度值与阈值进行判断的检测结果。若判断阈值设为50,则背景2中的亮点未被检出。由于灰度阈值无法直接反应坏像元灰度值得突变程度,所以当坏像元所处的背景发生变化时,检测结果受到影响。而本方法的判断结果仅与待检测像元灰度值的突变程度有关,与灰度值无关。如图11所示,不同背景下的亮点均能被检测。当红外相机在轨运行时,背景灰度值可能会发生变化。本方法可以有效避免背景变化对检测结果的影响。

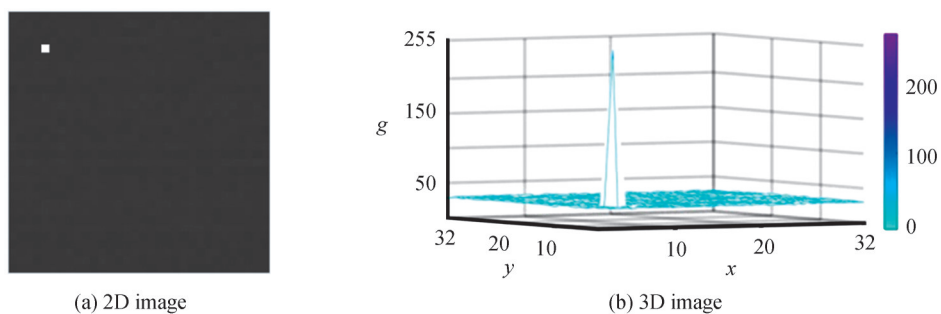


图8 背景1  
Fig.8 Background 1

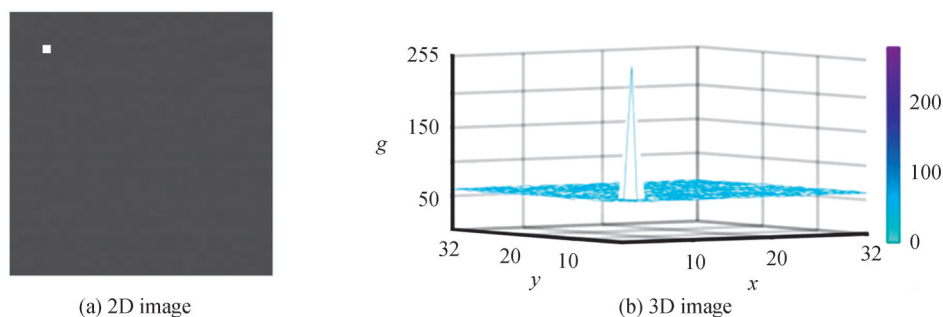


图9 背景2  
Fig.9 Background 2

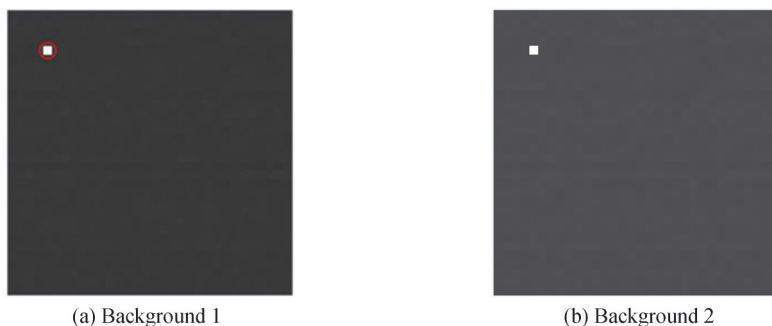


图10 不同背景下基于灰度的检测结果  
Fig.10 The detection results based on gray value of different background

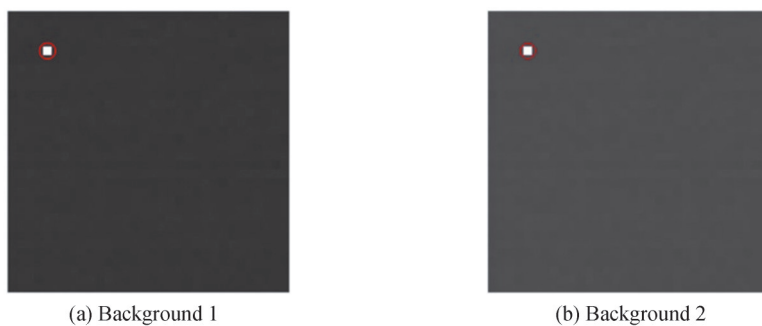


图11 不同背景下基于灰度梯度的检测结果  
Fig.11 The detection results based on gray gradient value of different background

当红外相机视场中出现星点目标时,该目标区域内的灰度值与背景灰度值差异较大。本方法可同时检测出处于背景和星点目标中的坏像元。图12中背景和星点目标中均存在亮点,背景中亮点灰度值为150,星

点目标中亮点灰度值为 255。此时,由于背景中的亮点灰度值低于星点目标区域灰度值,则不存在一个灰度阈值可同时满足大于两个亮点领域像元的灰度值又小于亮点的灰度值。因此,采用灰度的检测方法无法同时检测出处于不同背景下的亮点,检测结果如图 13(a)和(b)。而本方法的检测结果如图 13(c),背景和星点目标区域中的亮点均被检测出。

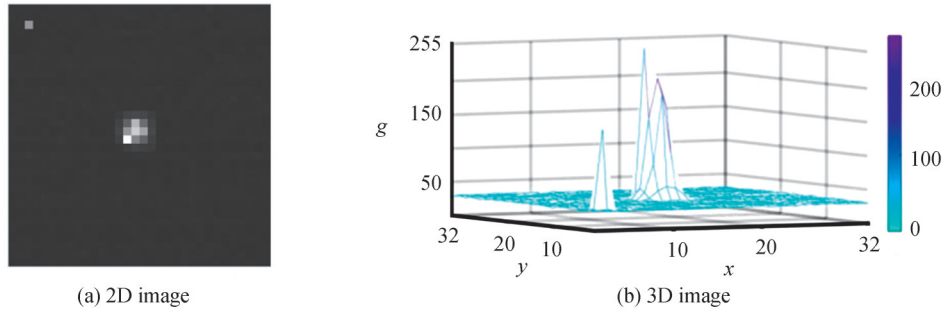


图 12 背景和星点中同时存在亮点

Fig.12 The light bad pixels in both background and star target

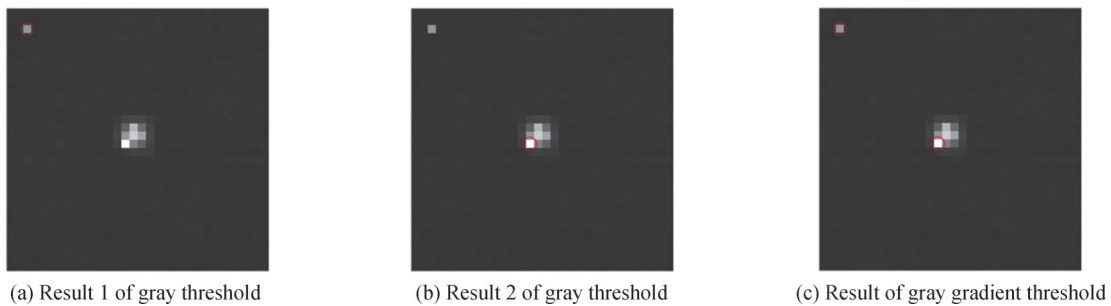


图 13 坏像元检测结果

Fig.13 The detection results of bad pixels

### 3.2 稀疏视野的有效性

当焦平面探测器出现相邻坏像元时,两个相邻的坏像元会相互影响各自的检测与补偿结果。因此,本方法在检测与补偿过程中均采用了稀疏视野。通过实验证明,稀疏视野能够有效避免相邻坏像元的相互影响,提升坏点补偿值的精度。

在检测阶段,本方法分别在亮点检测时将邻域分为两部分,在暗点检测时将邻域分为四部分,使检测的视野具有稀疏性。如图 14 所示,背景中存在相邻两个亮点。图 15 为采用未稀疏视野和采用稀疏视野的检测结果。未采用稀疏视野时,由于相邻亮点均处于对方的邻域内,则无法满足待检测像元与八个邻域像元间的灰度梯度均大于检测阈值,导致漏检。而采用了稀疏视野后,能够有效改善邻域坏像元对检测结果的影响,避免漏检。

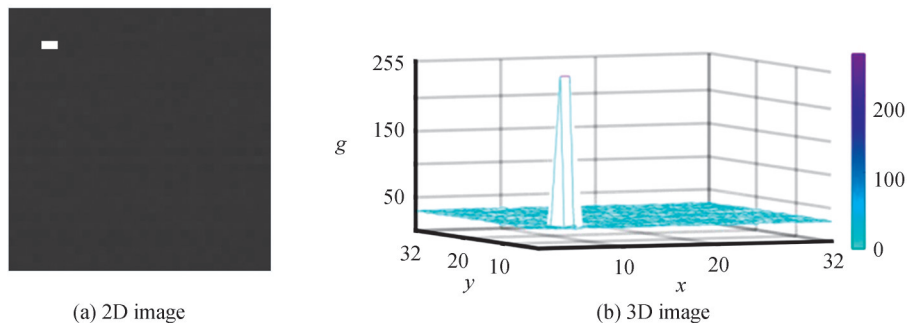


图 14 相邻坏像元

Fig.14 The neighboring bad pixels





图15 坏像元检测结果

Fig.15 The detection results of bad pixels

在补偿阶段,本方法采用 $5 \times 5$ 的补偿窗口,同样采用稀疏视野的方式,根据待补偿像元邻域像元的检测结果,选择合适的邻域正常像元计算均值作为补偿值。图16为对图14采用邻域8个像元的均值作为补偿值和采用的 $5 \times 5$ 窗口基于稀疏视野的补偿结果。未采用稀疏视野时,邻域亮点对补偿值造成了影响,该像元补偿后依旧与正常像元之间存在明显的突变。而采用稀疏视野显著改善了补偿效果,有效地避免了相邻坏点的相互影响。

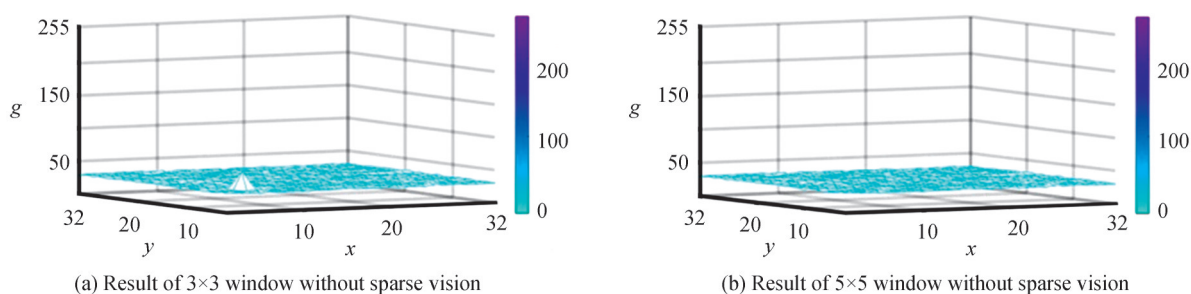


图16 坏像元补偿结果

Fig.16 The compensation results of bad pixels

### 3.3 本方法的检测与补偿性能

本方法采用灰度梯度和稀疏视野对坏像元进行实时检测与补偿。通过与基于 $3 \times 3$ 窗口和灰度阈值的检测与补偿方法对比,证明本方法具有较好的鲁棒性。如图17所示,图像中存在多个坏点。由于采用灰度阈值无法同时检测出处于不同灰度背景中的坏像元,考虑到光斑中坏点对质心坐标提取的影响较大。因此,灰度阈值参数设为优先检测光斑中坏像元。

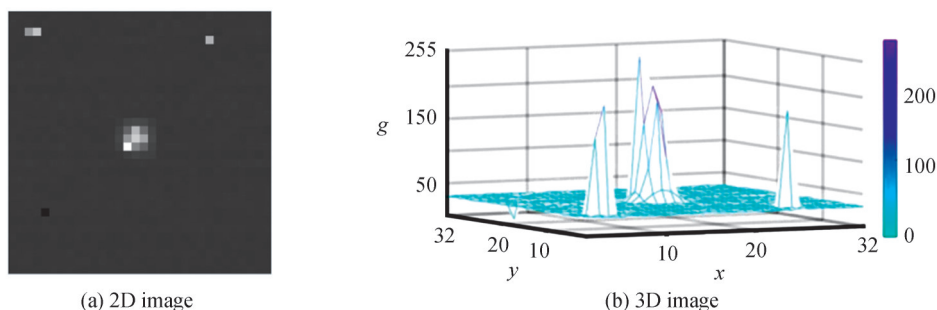


图17 存在多种坏像元的星图

Fig.17 The multiple bad pixels in star image

图18、图19为检测与补偿结果,表2为坏像元检测成功率,表3为补偿后对星点目标质心坐标的提取结果。可以看出,对比方法和本文方法均有效改善了质心提取结果的准确性。而采用 $3 \times 3$ 窗口的灰度阈值方法由于灰度检测受背景灰度值变化影响的局限性从而存在漏检情况。并且检测和补偿过程会受领域坏

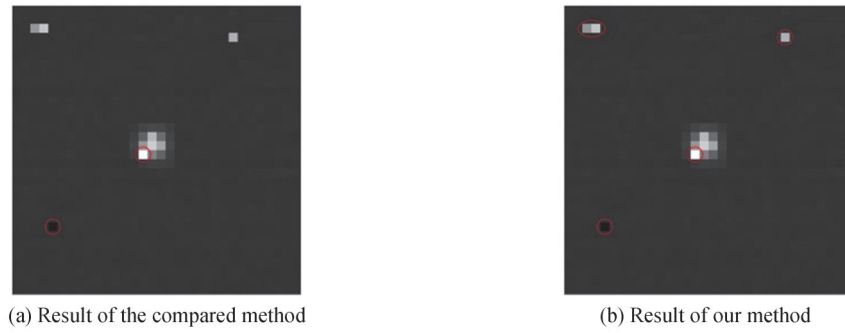


图 18 坏像元检测结果  
Fig.18 The detection results of bad pixels

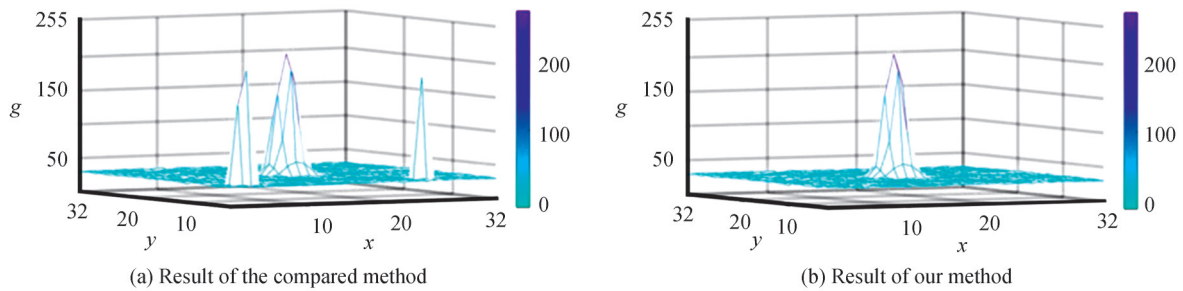


图 19 坏像元补偿结果  
Fig.19 The compensation results of bad pixels

表 2 坏像元检测成功率

Table 2 The detection accuracy of bad pixels

Method	Number of bad pixels	Number of detected bad pixels	Accuracy
The compared method	5	2	40%
Our method	5	5	100%

表 3 星点目标质心坐标提取结果

Table 3 The result of extracting star's centroid coordinates

Method	Centroid coordinates	X coordinate error	Y coordinate error
None bad pixel	(15.0656, 14.8786)	/	/
Baseline	(14.8451, 15.1103)	1.464%	1.557%
The compared method	(15.0013, 14.9460)	0.427%	0.453%
Our method	(15.0409, 14.9046)	0.164%	0.175%

像元的影响,因此补偿后图像提取出的星点坐标仍存在较大误差。本方法则将图中坏点全部成功检测出来,检测成功率达到100%,并且具有更好的补偿效果,X轴与Y轴误差降低88.8%,减小至0.2%以内。

## 4 结论

本文通过对坏像元灰度值变化特性进行分析,提出基于灰度梯度和稀疏视野的坏像元检测与补偿方法。采用窗口大小为 $5 \times 5$ 的滑窗处理方式,对图像数据存储空间要求小,数据处理过程计算量小,适用于短波红外相机在轨运行时对坏像元进行实时的检测与补偿。实验证明,灰度梯度和稀疏视野能够有效提升算法的鲁棒性,避免背景灰度值变化以及领域坏像元对检测与补偿结果的影响。同时,经验证本方法能够同时检测出处于背景和星点目标区域中的坏像元,检出率达到了100%,并且显著降低了短波红外相机焦平面探测器上坏像元对星点目标质心坐标提取的影响,误差降低至0.2%以内。

## 参考文献

- [1] FANG Jiancheng, NING Xiaolin, MA Xin, et al. A survey of autonomous astronomical navigation technology for deep space detectors[J]. Flight Control & Detection, 2018, 1(1): 1-15.  
房建成, 宁晓琳, 马辛, 等. 深空探测器自主天文导航技术综述[J]. 飞控与探测, 2018, 1(1): 1-15.
- [2] NIU Lei. Research and application of astronomical detection system based on shortwave infrared[J]. Modern Navigation, 2019, 10(6): 427-431.  
牛雷. 基于短波红外的天文检测系统研究与应用[J]. 现代导航, 2019, 10(6): 427-431.
- [3] WEI Yang, WANG Xuquan, HUANG Zhangcheng, et al. Digital output for short-wave infrared InGaAs linear FPA[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(3): 257-260, 268.  
魏杨, 王绪泉, 黄张成, 等. 短波红外 InGaAs 线性焦平面数字化输出研究[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 38(3): 257-260, 268.
- [4] YU Chunlei, LI Xue, SHAO Xiumei, et al. Noise characteristics of short wave infrared InGaAs focal plane arrays[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(4): 528-534.  
于春蕾, 李雪, 邵秀梅, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面噪声特性[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(4): 528-534.
- [5] LI Xue, SHAO Xiumei, TANG Hengjing, et al. Inoperable pixels of  $256 \times 1$  element linear InGaAs near-infrared focal plane arrays[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(5): 409-411, 438.  
李雪, 邵秀梅, 唐恒敬, 等. 近红外  $256 \times 1$  元 InGaAs 焦平面探测器无效像元研究[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(5): 409-411, 438.
- [6] LI Xue, SHAO Xiumei, LI Tao, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(1): 64-71.  
李雪, 邵秀梅, 李涛, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(1): 64-71.
- [7] WANG Wei, FANYangyu, SI Junjie, et al. Analysis on formation of bad pixel cluster in IRFPA[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2857-2860.  
王巍, 樊养余, 司俊杰, 等. 红外焦平面阵列盲元簇成因分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2857-2860.
- [8] ZHENG Yangguang, LIU Chanlao, CHEN Dachuan. Research of IRFAP bad pixel correction technology by using DSP image processing system[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2008, 21(6): 112-113, 116.  
郑阳光, 刘缠牢, 陈大川. 基于 DSP 的红外焦平面阵列坏像元补偿技术的研究[J]. 机电产品开发与创新, 2008, 21(6): 112-113, 116.
- [9] HE Yiyang, WANG Hongli, FENG Lei, et al. High-precision star centroid extraction method on star image of star sensor[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(4): 99-106.  
何贻洋, 王宏力, 冯磊, 等. 星敏感器星图的高精度星点提取方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(4): 99-106.
- [10] LI Chengliang, LIN Chao, ZHENG Yuquan. Detective method of invalid pixels of near-infrared focal plane arrays of CO<sub>2</sub> detector[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2016, 39(6): 1-4.  
李诚良, 蔺超, 郑玉权. CO<sub>2</sub> 探测仪近红外焦平面无效像元检测方法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(6): 1-4.
- [11] BAI Junqi, JIANG Yiliang, ZHAO Chunguang, et al. Blind-pixel detection algorithm for infrared focal plane array detector[J]. Infrared Technology, 2011, 33(4): 233-235, 240.  
白俊奇, 蒋怡亮, 赵春光, 等. 红外焦平面阵列探测器盲元检测算法研究[J]. 红外技术, 2011, 33(4): 233-235, 240.
- [12] DUDAS J, JUNG C, WU L, et al. On-line mapping of in-field defects in image sensor arrays[C]. IEEE International Symposium on Defect & Fault Tolerance in Vlsi Systems, 2006.
- [13] HU Mingpeng, MA Dongmei, LIU Zhixiang, et al. Study of IRFPA non-effective pixel discrimination [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29(2): 184-187.  
胡明鹏, 马冬梅, 刘志祥, 等. 红外焦平面阵列无效像元检测技术研究[J]. 半导体光电, 2008, 29(2): 184-187.
- [14] QIAN Feng, JIA Jianjun, ZHANG Liang, et al. Defective pixel correction of spot-detecting camera in satellite-to-ground laser communication ATP system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 139-145.  
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 星地激光通信 ATP 系统探测相机的坏点校正[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 139-145.
- [15] YANG Ping, ZHANG Hui. A practical focal plane bad pixels detection method of infrared thermal imager[J]. Electro-optic Technology Application, 2017, 32(6): 81-84.  
阳平, 张辉. 红外热像仪焦平面坏元实用检测方法[J]. 光电技术应用, 2017, 32(6): 81-84.
- [16] HU Pengbo, ZHAN Dongjun, CHEN Huawang. A method of bad pixel detection and compensation for IRFPA[J]. Optic & Optoelectronics Technology, 2017, 15(3): 69-73.  
胡鹏博, 詹东军, 陈华旺. 一种红外焦平面阵列盲元检测与补偿方法[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(3): 69-73.
- [17] ZHENG Xiao, GE Zhixiong, LAI Yongan. Algorithm for blind-pixel detection of IRFPA based on sliding window[J]. Infrared Technology, 2019, 41(8): 735-741.  
郑晓, 葛志雄, 赖永安. 基于滑动窗口的红外焦平面阵列盲元检测算法研究[J]. 红外技术, 2019, 41(8): 735-741.
- [18] QIAN Feng, JIA Jianjun, ZHANG Liang, et al. The research on positioning accuracy of spot-detecting camera in ATP system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 0205007.  
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205007.

## Real-time Bad Pixel Detection and Compensation Method for Short-wave Infrared Camera

SONG Xuedong<sup>1,2</sup>, MA Yingchao<sup>1,2</sup>, ZHOU Qi<sup>1,2</sup>, LIAN Da<sup>1,2</sup>, YU Luwei<sup>1,2</sup>, MAO Xiaonan<sup>1,2</sup>

(1 Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

(2 Shanghai Key Laboratory of Space Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Point target measurement camera is one of the key parts in celestial navigation technology, which is used to measure star's centroid coordinate to assist celestial navigators such as star trackers to obtain precise positions and attitude information. Point target measurement cameras using short-wave infrared focal plane detectors have the advantages of low power consumption and high detection rate. Due to factors such as manufacturing materials and production processes, infrared focal plane has bad pixels. The on-orbit infrared camera usually compensates for the bad pixels measured by ground-based test equipment. However, because the infrared camera is inevitably affected by the space irradiation environment and high-energy particles when the infrared camera is on-orbit, new bad pixels will appear, which seriously affects the camera's imaging quality and the accuracy of extraction result of star's centroid coordinate. Therefore, it is meaningful and important to study an accurate and reliable bad pixel detection and compensation algorithm for the on-orbit infrared camera. Nowadays, there are many researches on the detection and compensation of bad pixels. But these methods have some shortcomings. Some methods have a large amount of calculation in the detection process, which lead to the bad real-time performance of the on-orbit infrared camera detecting and compensating bad pixels. Other methods have low detection accuracy, because the detection and compensation results are affected by neighboring bad pixels and different background. This paper analyzes the characteristics of the gray value of bad pixels and proposes a real-time bad pixel detection and compensation method based on gray gradient and sparse vision. The method uses a  $5 \times 5$  processing window and sparse vision to determine whether the gray gradient of the pixel to be processed conforms to the characteristics of the bad pixel and calculates the compensated gray value. The gray gradient can directly reflect the difference of the gray value between the bad pixel and the normal pixel in neighborhood, so that the detection result can not be affected by the change of the background gray value. In addition, when bad pixel appears in the neighborhood of the pixel to be processed, the gray gradient of the pixel to be processed is affected. Sparse vision can effectively avoid the mutual influence of neighboring bad pixels on the detection and compensation results. Experiments proved that the gray gradient and sparse vision used in our method has significant effectiveness and our method has great performance of detecting and compensating bad pixels. First of all, the bad pixels in the background and star target area in the infrared image can be accurately detected and compensated, which verifies that the detection based on the gray gradient of the pixel to be processed can not be affected by the change of the background gray value. The robustness of detection and compensation of bad pixels is improved when the shortwave infrared camera is on-orbit. Secondly, adjacent bad pixels both can be detected and compensated, which verifies that sparse vision can effectively solve the problem of the mutual influence of neighboring bad pixels. Finally, the experiment results show that the detection accuracy of our method is 100% and the error of the extracted centroid coordinate is reduced by 88.8% to within 0.2% after compensation. In conclusion, our method adopts gray gradient and sparse vision to detect and compensate bad pixels and has great detection success rate and compensation performance, which significantly improves the accuracy of star's centroid coordinates extraction of the on-orbit short-wave infrared camera. Moreover,  $5 \times 5$  processing window has low requirements for data storage space and small calculations in the detection and compensation process, which means that the on-orbit short-wave infrared camera can have good real-time performance.

**Key words:** Image processing; Short-wave infrared camera; Bad pixel; Real-time detection and compensation; Gray gradient; Sparse vision

**OCIS Codes:** 100.2000; 250.0040; 040.3060