

末敏弹线阵红外图像的 Harris 角点检测优化算法

朱晓婷¹, 刘雁翔², 郭锐¹, 刘荣忠¹, 武军安¹

(1. 南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094;

2. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 064000)

摘要: 针对 Harris 角点检测算法对于弹载线阵列红外图像检测角点数量过少及精度较低等问题, 提出一种改进算法。首先利用 Canny 算子检测目标边缘以确定目标区域, 再采用三阶 B 样条梯度算子对目标区域滤波获得 M 矩阵, 然后使用三阶 B 样条函数与高斯窗口函数的卷积代替原高斯窗口函数对 M 矩阵进行平滑滤波, 进行角点提取, 最后在非极大值抑制时采用自适应阈值, 以去除伪角点。实验结果表明, 文中算法与 Harris 算法相比, 不仅增加了角点的提取数量, 在算法的总运行时间上缩减了 3/4。

关键词: Harris 角点检测; B 样条函数; 弹载; 红外图像

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S226004

Optimization of Harris corner detection algorithm for line array infrared image of terminal sensitive projectile

Zhu Xiaoting¹, Liu Yanxiang², Guo Rui¹, Liu Rongzhong¹, Wu Jun'an¹

(1. ZNDY Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. CRRC TANGSHAN CO., LTD., Tangshan 064000, China)

Abstract: An improved Harris corner detection algorithm was proposed to solve the problem that the number of detection corners was too few and the accuracy was low when detecting infrared images. Firstly, the Canny operator was used to detect the target edge to determine the target region, and then the cubic B-spline gradient operator was used to filter the target area to obtain the M matrix. Then the convolution of the cubic B-spline function and the Gaussian window function was used to replace the original Gaussian window function for data filtering, and extract the corner points of the target area. Finally, the adaptive threshold was used for non-maximum suppression to remove false corners. The experimental results show that compared with the Harris algorithm, the proposed algorithm not only increases the number of corners points extracted, but also reduces the running time of the algorithm by 3/4.

Key words: Harris corner detection; B-spline function; missile-borne; infrared image

收稿日期: 2019-04-01; 修订日期: 2019-05-14

基金项目: 装备重点预研(301070201)

作者简介: 朱晓婷(1995-), 女, 硕士生, 主要从事末敏弹的红外图像处理和目标识别方面的研究。Email: zxt_416@163.com

导师简介: 刘荣忠(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事末敏弹总体技术方面的研究。Email: Liueongz116@163.com

0 引言

末敏弹作为智能弹药的典型代表之一,是一种将复合探测系统与爆炸成形弹丸技术应用于子母弹的新型弹种^[1],具有打击精度高、效费比高等优点,并且在集群目标的毁伤方面效果尤为显著。探测系统是末敏弹在复杂环境中能够准确探测识别装甲目标,并对其实施精确打击的重要前提,其中红外探测技术因其隐蔽性好,环境适应性强,能够在夜间和恶劣天气下工作,不易被干扰等优点成了末敏弹上必不可少的探测手段。如今随着战场环境的复杂化,干扰技术的发展及末敏弹毁伤能力的需求等多方面原因,红外点源探测技术因其探测概率偏低,虚警率偏高等缺点,已不能满足系统需求,而多元红外探测器则通过红外成像来辨别装甲目标,具有提高分辨率,增大视场等优点。

由于末敏子弹空间的限制,末敏探测系统的运行特性及实时性的需求,线阵列红外探测器因其成本较低,工业简单而被广泛采用。线阵列红外探测器利用末敏弹体的自旋进行并行扫描来检测目标,并根据检测目标的辐射特性来识别目标^[2]。

当末敏子弹在旋转伞的作用下,离地面约 150 m 的高度时进入稳态扫描阶段。对于有伞末敏弹而言,此时的转速为 4 r/s,落速为 10 m/s,弹体和探测器同轴并与铅垂线成 30° (扫描角 β),其转速和落速基本保持不变。线阵列红外探测器的主要参数如下:工作波段与地面目标的红外辐射特性有关,为 8~12 μm ;阵列数决定辨别物体的等级(探测、分类、识别)和图像尺寸,为 16 元线阵列;视场角 γ 为 6° ,探测高度为 15~120 m,这两者决定了扫描半径,确保探测器能获取整个目标区域。

目前,基于末敏弹线阵列红外图像的目标提取研究较少,参考文献[3]利用坦克模型和坦克温度场数据对目标进行仿真,并选择几何特征和不变矩特征作为特征向量进行分类识别。参考文献[4]通过仿真实验法建立红外图像数据集,提取目标边界、周长、面积和最小外接矩来实现目标识别。考虑末敏子弹探测系统的自身特性及实时性,矩特征作为一种整体性质,若目标一部分被遮挡,则无法计算不变矩,因此需要一种能描述目标局部性质的特征提取方法。

角点作为图像的重要局部特征,既保留了图像中的特征信息,同时又有效地减少了信息数据量。角点检测在图像匹配、运动估计、形状分析、目标识别与跟踪等方面都有重要的应用^[5]。

目前,角点检测技术可归纳为 3 类:基于灰度图像的角点检测、基于二值图像的角点检测、基于轮廓曲线的角点检测。其中,基于图像灰度的检测算法是目前使用最为广泛的角点检测算法,因为该算法通过计算图像中像素点的曲率和梯度检测角点,不仅可以有效地避免基于图像边界算法存在的缺陷,其处理方法也可以应用在基于二值图像的角点检测上。最具代表性的有 Moravec、Harris、SUSAN 等算法,而 Harris 角点算法因为具有计算相对简单、易于实现和鲁棒性好等特点,在实际中得到广泛应用。

然而,末敏弹红外探测系统在百米高空扫描得到的红外图像分辨率较低,目标区域较小,反映物体表面的纹理细节信息较差,边缘较为模糊,使用经典 Harris 算法对红外图像进行角点提取,效果不是十分理想。针对经典 Harris 算法对于低分辨率图像提取角点数量较少和精度较低的缺点,文中提出一种改进算法,首先对原始红外图像进行图像去噪及增强处理,再对经过预处理的图像进行 Canny 检测,以确定目标区域,然后将 B 样条函数和高斯窗口函数的卷积作为新的窗口函数,替代原高斯函数,提高角点定位精度,再对目标区域进行角点检测,最后经过自适应阈值去除部分伪角点后,进行八邻域内的非极大值抑制。

1 图像预处理

在图像处理过程中,图像质量的好坏会直接影响算法效果的精度,因此在图像分析前,需进行预处理。图像预处理的主要目的是消除图像中无关的信息,增强有关信息的可检测性、最大限度地简化数据,从而增加特征提取和识别的可靠性。

文中采用 16 元红外探测器,原始图像目标区域过小,不利于图像特征的提取,通过双线性差值算法将原始图像扩展为 32×32 及 64×64 大小,从而扩大目标区域,以利于图像的角点提取。

1.1 图像去噪

受探测器物理特性的限制以及周围环境的影

响,在红外图像采集和传输过程中,会受到各种噪声的干扰,影响图像的质量,造成图像模糊不清晰,不利于后期处理分析,因此需要对图像进行降噪处理。图像的去噪算法常用的有均值滤波、中值滤波、高斯滤波等。

为描述图像去噪效果,引入峰值信噪比(PSNR)作为判断依据,其数值常为 30~40 dB,愈高表示图像质量愈好。

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (1)$$

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right) \quad (2)$$

式中:MAX_I表示图像点颜色的最大数值,若每个采样点用 8 位表示,那么 MAX_I 为 255。

以 Intel(R) Core(TM) i5-7500CPU@3.40 GHz、4.00 GB 内存,Windows10 操作系统下的 Matlab2014b 为平台,将各类滤波算法分别对 32×32 大小的图像进行去噪处理,如表 1 所示,记录其峰值信噪比及算法用时。由上表可知,维纳滤波和小波去噪的 PSNR 较高,达到 30 dB,考虑算法实时性的需求,维纳滤波仅用时 0.004 s,比小波去噪快 5 倍,故文中采用维纳滤波作为图像去噪的方法。

表 1 去噪算法对比分析

Tab.1 Contrast analysis of denoising algorithms

| Filter | PSNR/dB | Time/s |
|-------------------|----------|--------|
| Average filter | 2.675 0 | 0.009 |
| Median filter | 26.019 6 | 0.009 |
| Wiener filter | 30.705 4 | 0.004 |
| Wavelet denoising | 31.665 6 | 0.019 |
| Gauss filter | 19.997 2 | 0.006 |
| Morphology filter | 29.719 6 | 0.010 |

1.2 图像增强

图像增强是指对图像的某些特征,如边缘、轮廓、对比度等进行强调或突显,扩大图像中不同物体特征之间的差别,以便于进一步的分析与处理。常用的图像增强方法为直方图均衡化。而参考文献[6]提出的多尺度细节增强算法的核心思想类似于 Retinex,使用三个尺度的高斯模糊,并和原图做减法,获得不同程度的细节信息,然后通过一定的组合方式把这些细节信息融合到原图中,从而得到加强

原图信息的能力。

在原图进行双线性插值扩展过程中,图像细节区域被模糊化,因此需通过图像增强算法凸显目标区域。如表 2 所示,与直方图均衡化相比,多尺度细节提升算法的 PSNR 为 33.376 2 dB,图像质量较好,但是运行时间较慢。

表 2 图像增强算法对比分析

Tab.2 Comparative analysis of image enhancement algorithms

| Algorithms | PSNR/dB | Time/s |
|------------------------|----------|--------|
| Histogram equalization | 24.910 9 | 0.008 |
| Reference [6] | 33.376 2 | 0.012 |

综合比较,文中选取维纳滤波和参考文献[6]的多尺度细节增强算法进行图像预处理。

2 Harris 角点检测原理

1988 年 Chris Harris 和 Mike Stephens 对 Moravec 算法进行改进,提出 Harris 角点检测算法。在参考文献[7]中,作者提出几点 Moravec 算子的缺陷并且给出改良方法:

(1) 将 Moravec 算子采用的方形窗口改为高斯函数:

$$w(u,v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

(2) 为减少 Harris 算子对方向的依赖性,考虑各个现象的移动变化情况,作者采用微分的思想,将灰度变化量 E 中平移后的图像灰度进行泰勒展开并简化得公式(4):

$$E(u,v) = \sum_{x,y} w(u,v) [I(x+u,y+v) - I(x,y)]^2 = \sum_{x,y} w(u,v) [I_x u + I_y v]^2 \cong [u,v] M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:E 为像素点灰度的变化值;I(x,y)为图像灰度值;w 为窗口函数;I_x、I_y 为 x、y 方向的梯度;M 的表达式如下:

$$M = \sum_{x,y} w(u,v) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

将 M 对角化后得矩阵的特征值 α 和 β,代入公式(4)化简可得:

$$E(u, v) = Au^2 + 2Cuv + Bv^2 = \alpha u_p^2 + \beta v_p^2 \quad (5)$$

式中: u_p 和 v_p 为标准化后的新坐标。

在计算机识别中为进一步确定检测到的是否为角点, 定义角点响应函数 R 为:

$$R = \alpha\beta - k(\alpha + \beta)^2 = \text{Det}(M) - k \times \text{Trace}^2(M) \quad (6)$$

式中: k 为经验常数, 取值范围为 $(0.04, 0.06)$; $\text{Trace}(M) = \alpha + \beta = A + B$; $\text{Det}(M) = \alpha\beta = AB - C^2$ 。

若 $R > 0$, 则检测到的是角点; 若 $R < 0$, 检测到的是边缘; 若 R 的值很小, 则为平坦区域。

在判断角点时, 对角点响应函数 R 进行阈值处理, 当 R 大于设定阈值时, 则为角点。最后通过非极大值抑制去除伪角点。

3 Harris 角点检测算法改进

3.1 B 样条函数

Harris 算法具有旋转、平移不变性, 较好的鲁棒性和抗干扰能力, 但是算法运行时间较长, 并且由于采用高斯滤波, 在非极大值抑制时可能出现角点位置偏移和丢失现象。根据中心极限定理可知, n 阶中心 B 样条函数具有平滑滤波功能, 同时当 n 趋于正无穷大时, B 样条函数及其导数分别收敛于高斯函数及其导数^[8], 所以利用 B 样条函数可以实现快速卷积, 降低算法的复杂度。因此, 引入 B 样条函数, 将其与高斯窗口函数的卷积作为滤波器。

一类分段(片)光滑、并且在各段交接处也有一定光滑性的函数, 简称样条^[9]。通俗地讲, 样条函数就是满足一定的连续条件的分段函数。 n 次 B 样条函数定义为:

$$B_n(x) = \sum_{j=0}^{n+1} \frac{(-1)^j}{n!} C_{n+1}^j \left(x + \frac{n+1}{2} - j \right)^n u \left(x + \frac{n+1}{2} - j \right), \quad x \in R \quad (7)$$

式中: $u(x)$ 为阶跃函数; n 为 B 样条函数的阶数。

随着 B 样条函数 n 的增加, 滤波器平滑效果更好, 且过滤效果更强, 但易失去边界信息且处理时间过长; 当 n 减少时, 图像细节保存完好, 但去噪能力降低。

定义离散数字图像滤波公式为:

$$g(x, y) = \sum_{i=x-\frac{k-1}{2}}^{x+\frac{k+1}{2}} \sum_{j=y-\frac{l-1}{2}}^{y+\frac{l+1}{2}} f(i, j) B_{k \times l}(x-i, y-j) \quad (8)$$

式中: $f(i, j)$ 为像素 (i, j) 处图像灰度值; $B_{k \times l}(x-i, y-j)$ 为 B 样条滤波算子。根据 B 样条函数具有的可分离性, $B_{k \times l}(x-i, y-j) = B_k(x-i) B_l(y-j)$ 。

滤波模板通常是一个 $(2m+1)$ 阶的方阵, 其中 $m = 1, 2, \dots, n$ 。三次 B 样条函数做卷积核是实现平滑与逼近的最佳组合, 参考文献[10]证明其抑制噪音效果最佳, 故采用 3 阶 B 样条函数, 取 $k=l=n=3$, 可得 B 样条函数的 3×3 滤波模板, 可表示为:

$$B_{3 \times 3} = \frac{1}{36} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由 B 样条函数局部性质, n 次样条函数空间的二维结构为:

$$g^n(x, y) = \sum_{k,l \in Z} C(k, l) B^n(x-k, y-l) \quad (10)$$

其中, $B^n(x)$ 可以表示为:

$$B^n(x) = \frac{\left(\frac{n+1}{2} + x\right) B^{n+1}\left(x + \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{n+1}{2} - x\right) B^{n+1}\left(x - \frac{1}{2}\right)}{n} \quad (11)$$

分别对公式(10)求偏导数及对公式(11)求导, 再经计算, 得到三阶 B 样条函数在 x 和 y 方向上的微分模板为:

$$h_x = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -4 & -1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$h_y = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 4 & 0 & -4 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

参考文献[11]分析比较不同阶次的 B 样条函数与高斯函数, 发现三阶 B 样条函数抑制噪音效果最佳且优于高斯函数。如图 1 所示为高斯函数、三阶 B

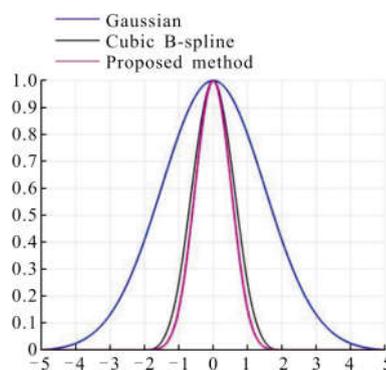


图 1 三种函数对比图

Fig.1 Contrast diagrams of three functions

样条函数及两者卷积在归一化后的对比。在高频部位,三次 B 样条函数以及文中函数比高斯函数更快收敛到 0,且文中函数较其他两者紧支性更好。因此,采用三阶 B 样条函数与高斯函数的卷积作为 Harris 角点检测中的窗口函数,可以兼顾图像的噪声抑制及逼近性,突显角点,为后续步骤做准备。

3.2 角点响应函数 R

在传统 Harris 角点检测算法中,角点响应函数 R 的参数 k 是凭经验值决定的,而不同图像对于 k 值的要求不同,故文中采用如下角点响应函数公式(14)来避免 k 值的选取。

$$R = \frac{\text{Det}(M)}{\text{Trace}(M) + \delta} \quad (14)$$

式中:δ 为一个任意小的正数,文中取 δ=0.000 01。

3.3 自适应阈值

经典 Harris 角点检测在去除伪角点时,需人为设定一个阈值,而设定阈值过大则检测到的角点过少,阈值过小则提取角点过多,并且该阈值不具有普遍性,不同图像之间所需阈值不同,考虑算法通用性,文中将阈值设定为角点响应函数最大值的 p 倍,即

$$t = p \times R_{\max} \quad (15)$$

文中选取一系列图像进行实验,不断调整设定的 p 值,分析比较发现 p 的取值范围为(0.005, 0.015)时,去除伪角点的效果较好,故文中取 p=0.01。

4 实验结果及分析

为验证文中算法的有效性,将文中算法与 Harris 算法、参考文献[12-14]中改进的算法和未经预处理的文中算法进行对比。其中参考文献[12]只改变了梯度算子,将(-1, 0, 1)改成(-2, -1, 0, 1, 2),参考文献 [13] 提出了一种基于灰度差分与模板的 Harris 角点检测算法,参考文献[14]则采用 B 样条函数作为窗口函数。

以 Intel(R) Core(TM) i5-7500CPU@3.40 GHz、4.00 GB 内存,Windows10 操作系统下的 Matlab2014b 为平台,使用 Seek Compact Pro 红外摄像头拍摄的坦克模型图像,通过双线性插值算法将红外图像放大,并将其进行维纳滤波和多尺度细节的图像增强处理,从而进行文中算法的验证。为进一步比较算法性能,统计算法提取的角点个数、算法总运行时间和核心算法运行时间。

在提取的角点数量上,由图 2 及表 3 可以看出,参考文献[13-14]及文中算法较原 Harris 算法有所增加,但由于图像尺寸较小,增幅较小。其中图 2(e)为未经预处理的文中算法,虽提取的角点数量较多,但对比图 2 中角点位置,由于图像噪声等影响,存在较多伪角点。

在算法用时上,从表 3 看出,经改进的角点检测方法均有所降低,其中参考文献[13]总用时降为原算法的 1/2,但是由于采用 susan 算法筛选角点,因此 Harris 算法自用时较长。文中算法先通过 Canny 算子提取目标区域,同时也去除部分伪角点,从而减少 Harris 算法自

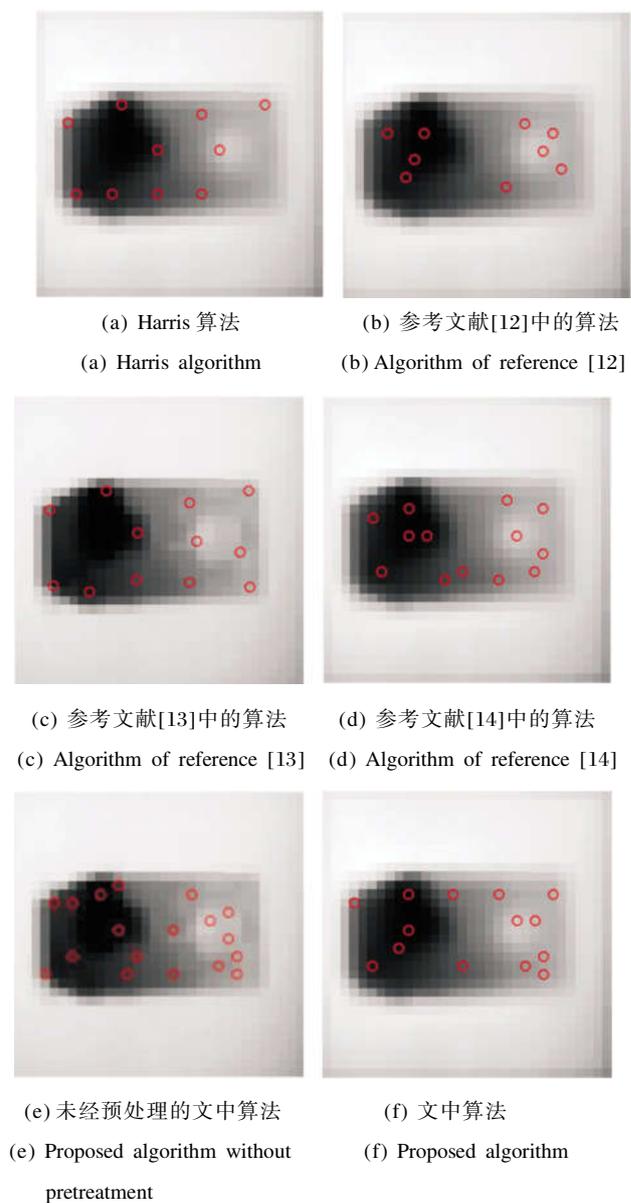


图 2 32×32 像素图片实验结果

Fig.2 Experimental results of 32×32 pixel images

运行时间,主程序运行时长仅为参考文献[14]的 1/2。文中算法总用时降为经典 Harris 算法的 25%。

表 3 32×32 像素图片角点检测结果对比

Tab.3 Comparison of corner detection results of 32×32 pixel pictures

| Algorithm | Corner points | Total time/s | Main | |
|---|---------------|--------------|--------------|---------------|
| | | | Canny time/s | Harris time/s |
| Harris algorithm | 10 | 0.482 | - | 0.227 |
| Reference [12] | 9 | 0.431 | - | 0.201 |
| Reference [13] | 12 | 0.209 | - | 0.169 |
| Reference [14] | 13 | 0.214 | - | 0.153 |
| Proposed algorithm without pretreatment | 18 | 0.106 | 0.028 | 0.060 |
| Proposed algorithm | 14 | 0.121 | 0.032 | 0.057 |

图像大小为 32×32 时,改进算法角点数量无明显变化,故将图像放大至 64×64 大小,对比算法有效性。

由图 3 和表 4 可以看出,在角点数量上,所有改

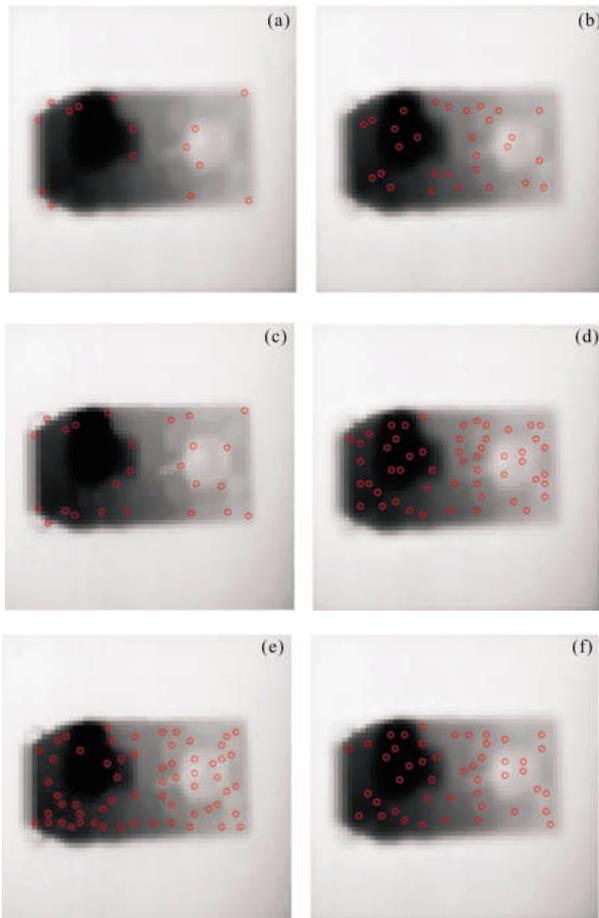


图 3 64×64 像素图像实验结果

Fig.3 Experimental results of 64×64 pixel images

进方法提取的角点数较原始算法均有增加,尤其是参考文献[14]和文中算法在检测数量上增长了 3 倍,并且通过对比图 3(e)中角点位置,经过预处理的算法均去除了部分伪角点,提高算法定位精度。

表 4 64×64 像素图片角点检测结果对比

Tab.4 Comparison of corner detection results of 64×64 pixel pictures

| Algorithm | Corner points | Total time/s | Main | |
|---|---------------|--------------|--------------|---------------|
| | | | Canny time/s | Harris time/s |
| Harris algorithm | 15 | 0.488 | - | 0.243 |
| Reference [12] | 29 | 0.453 | - | 0.221 |
| Reference [13] | 25 | 0.225 | - | 0.187 |
| Reference [14] | 53 | 0.231 | - | 0.171 |
| Proposed algorithm without pretreatment | 61 | 0.113 | 0.036 | 0.068 |
| Proposed algorithm | 46 | 0.133 | 0.039 | 0.064 |

文中算法在角点数上虽少于参考文献 [14],但是由于缩小了检测区域,在总检测时间上提升了近 50%,主程序用时也减少了 2/5。相较于经典 Harris 算法,文中算法在检测角点数上增加 3 倍,算法总运行时间减少了近 75%,主程序运行时长降了 50%,保证了算法实时性。

5 结论

为解决 Harris 角点检测算法对于弹载线阵列红外探测器所扫描得到的红外图像检测角点数量较少和精度较低等问题,提出一种改进的 Harris 角点检测方法。原始红外图像经过图像预处理后,首先利用 Canny 边缘检测确定目标区域,再采用高斯窗口函数与 B 样条函数卷积形成的窗口函数代替原高斯窗口函数,提高角点定位精度,然后对目标区域进行角点检测,提高算法实时性,最后在非极大值抑制时采用自适应阈值,提高算法自适应性。实验表明,文中算法不仅增加了检测到的角点数量,还将算法总用时降为 Harris 算法的 1/4,保证算法的实时性,为后续与 SIFT 算法结合进行图像配准及分类识别做前期准备。

参考文献:

[1] Zhang Jun, Liu Rongzhong, Guo Rui, et al. Experimental study on infrared characteristics of terminal-sensitive projectile at steady-state scanning stage [J]. *Infrared and*

- Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2876–2881. (in Chinese)
- [2] Li Yi. Research on infrared target search based on intelligent munition [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018. (in Chinese)
- [3] Lu Dingbin. Research on infrared detection technology of typical ground targets [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] Fan Bin, Wang Yong, Wu Weidong, et al. Research on the key techniques for infrared image automatic target recognition [J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, 32 (3): 175–179. (in Chinese)
- [5] Chen Hong, Li Jinqiang. An improved self-adapting corner feature extraction method [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(12): 118–121, 126. (in Chinese)
- [6] Kim Y, Koh Y J, Lee C, et al. Dark image enhancement based on pairwise target contrast and multi-scale detail boosting [C]//IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2015: 1404–1408.
- [7] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C]//Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference, Manchester, 1988: 147–151.
- [8] Yang Hui, Yang Huicheng, Wang Xiaoweiqian. Parts shape recognition based on improved harris corner detection algorithm[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2013, 27(12): 64–67. (in Chinese)
- [9] Zhang Jing. Research on the image mosaic algorithms based on corner detection [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [10] Liu Shuguang, Liu Mingyuan, He Yue. On B-spline wavelet edge detection based on canny criteria[J]. *Signal Processing*, 2001, 17(5): 418–423. (in Chinese)
- [11] Zhou He, Huang Shan, Sheng Xian. Image edge detection based on B-spline wavelet [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(11): 214–217. (in Chinese)
- [12] Huo Dongxu, Zhu Meng, Ren Hong'e. Automatic seamless image stitching based on improved harris algorithm [J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2018, 35(2): 212–217. (in Chinese)
- [13] Zhang Liting, Huang Xiaolang, Lu Linlin, et al. Fast harris corner detection based on gray difference and template [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39 (2): 218–224. (in Chinese)
- [14] Zhang Jing, Li Yulong, Wang Yangping. An improved harris corner detection algorithm based on B spline function [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2013, 32(6): 32–35. (in Chinese)