

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.04.004

太赫兹成像三维块匹配自适应Canny边缘检测算法

於康杰¹, 方波^{1,3*}, 李剑敏², 王震³, 蔡晋辉¹,
邬佳璐¹, 何正龙¹

(1 中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 330018;

2 北方光电集团有限公司, 陕西 西安 710000;

3 杭州大华仪器制造有限公司, 浙江 杭州 311400)

摘要: 针对传统Canny算子在滤波时会模糊边缘且需要人工设置高低阈值的缺点, 提出了一种基于三维块匹配的改进自适应阈值Canny边缘检测算法, 并用于太赫兹三维层析成像。该算法一方面对滤波方法进行了改进, 用三维块匹配(BM3D)滤波算法结合引导滤波算法代替高斯滤波算法以减少图像边缘信息的丢失; 另一方面, 针对传统人工设定阈值的不确定性, 将梯度图进行块匹配后对三维图像块组使用最大类间方差法(OTSU)以自适应确定高低阈值。最后利用该算法对含有噪声的图像进行边缘检测处理, 发现在高斯噪声方差为20时滤波后的峰值信噪比(PSNR)从22.202提升至27.151, 验证了该算法去除噪声的有效性。三维块匹配改进自适应阈值Canny边缘检测算法(BM-OTSU-Canny)减少了错误边缘的数量, 同时保留了连接性较好的边缘点, 改善了边缘细节信息的提取效果。

关键词: 图像处理; 太赫兹成像; 三维块匹配; Canny算法; 边缘检测

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)04-00458-11

3D block matching adaptive Canny edge detection algorithm for terahertz imaging

YU Kangjie¹, FANG Bo^{1,3*}, LI Jianmin², WANG Zhen³, CAI Jinhui¹,
WU Jialu¹, HE Zhenglong¹

(1 College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 330018, China;

2 North Electro-Optics Group Co. Ltd, Xi'an 710000, China;

3 Hangzhou Dahua Instrument Manufacturing Co. Ltd, Hangzhou 311400, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of traditional Canny operator in filtering, which can blur the edge and need to set high and low thresholds manually, an improved adaptive threshold Canny edge detection algorithm based on 3D block matching is proposed for terahertz 3D tomography. On one hand, the algorithm improves the filtering method by replacing the Gaussian filtering algorithm with the 3D block matching (BM3D) filtering algorithm and the guided filtering algorithm to reduce the loss of image edge

基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项课题(2018YFF01013005)

作者简介: 於康杰(1997-), 浙江杭州人, 研究生, 主要从事精密测量技术方面的研究。E-mail: s1902080450@cjl.u.edu.cn

导师简介: 方波(1981-), 浙江杭州人, 博士, 高级实验师, 硕士生导师, 主要从事太赫兹计量技术、精密测量技术方面的研究。

E-mail: Fangbo@cjl.u.edu.cn

收稿日期: 2021-05-14; 修改日期: 2021-07-23

*通信作者。

information. On the other hand, in view of the uncertainty of the traditional manual threshold, the maximum inter-class variance method (OTSU) is used to adaptively determine the high and low thresholds of 3D image blocks after block matching of gradient images. Finally, the edge detection of images containing noise is carried out using the algorithm. It is found that when the Gaussian noise variance is 20, the filtered peak signal-to-signal ratio (PSNR) increases from 22.202 to 27.151, which verifies the effectiveness of the algorithm in removing noise. By using BM-OTSU-Canny algorithm, the number of false edges is reduced, and at the same time, the edge points with better connectivity can be retained, and the extraction effect of edge details is improved.

Key words: image processing; terahertz imaging; 3D block matching; Canny algorithm; edge detection

0 引言

太赫兹成像技术是一种无损、非电离的成像技术,具有穿透性、安全性等优良特性,在医学影像、安全检查、环境监测等方面具有广泛应用前景^[1]。由于现阶段太赫兹成像系统性能的限制以及环境的噪声影响,太赫兹波成像质量较低^[2],很难从中获得连续且封闭的边缘,影响后续处理。图像的边缘特征是图像核心特征之一,数字图像处理技术是一种用于改善太赫兹成像质量的重要途径,目前传统数字图像处理方法已经广泛应用于特殊图像中^[3]。

传统边缘检测的算子有很多种,如 Sobel、Robert、Laplacian、LOG、Canny 等^[4],其中 Canny 算子提出了边缘优化准则,提高了检测精度,得到了广泛的应用^[5]。但传统 Canny 算法在检测成像质量较低、边缘界限不够分明的太赫兹图像时无法确保检测效果,具有一定的制约性。传统 Canny 使用高斯滤波对图像进行平滑时,容易同时滤掉有用的弱边缘信息从而丢失大量边缘信息。并且传统 Canny 算子的高低阈值需要人为预先设定。该方法的不确定性会导致检测准确度降低。为此,诸多学者提出了许多改进 Canny 边缘检测算法。在滤波步骤上,研究人员通过中值滤波、引导滤波、非均值滤波、双边滤波、形态学滤波、混合滤波、DCT 系数线性收缩等方法代替高斯滤波来进行优化,从而减少图像边缘信息的丢失^[6-11]。在阈值设定上,Wang 等^[4]利用不同图像的灰度值迭代得出最优高阈值和低阈值,Li 等^[5]采用梯度强度信息计算法实现阈值自适应。Li 等^[12]使用最大类间方差法 (OTSU) 对图像的高低阈值进行确定。Li 等^[13]对幅度梯度直方图进行微分运算得到自适应阈值。Gong 等^[14]利用自适应二维 Otsu 算法和 Newton 迭代法自适应地选择最优高低阈值。

目前的一些改进 Canny 算法仍然在保留边缘去除噪声的方法上有优化可能,在阈值处理过程中,大部分算法没有考虑图像的局部梯度分布特征,而是采用了梯度的整体分布情况,无法针对局部分布特性进行对应的参数修改进而自适应地优化检测,非常容易丢失有价值的边缘信息。针对以上问题本文在基于传统 Canny 算法的基础上,提出采用三维块匹配滤波代替传统高斯滤波,并结合引导滤波以增强图像边缘,最后使用块匹配与最大类间方差计算局部最佳阈值的新方法来提取轮廓信息,保留真实弱边缘并且减少假边缘的产生。

1 基于三维块匹配改进自适应阈值 Canny 算法

1.1 BM3D 滤波结合引导滤波

BM3D 算法是目前性能最好的一种去噪方式,其作用于变换域进行阈值去噪,并且针对图像的结构冗余特性进行非局部整合^[15,16]。改进算法采用 BM3D 替代高斯滤波取得更好的去噪效果。BM3D 去噪算法的具体步骤分为基础估计和最终估计两部分。基础估计首先根据步长遍历原始图像中的所有大小为 $L \times L$ 的图像块 B_{xp} 作为图像的参考图像块 (L 表示预先设定的块的尺寸)。将此参考图像块在以它为中心的搜索范围内逐步长进行滑动得到在图像上位于另一块区域的图像块 B_{xi} , 通过 B_{xp} 与 B_{xi} 两者之间的相似程度来决定这两个图像块是否应当被分成一类并存放至同一组别,如图 1 所示为图像块匹配示意图。

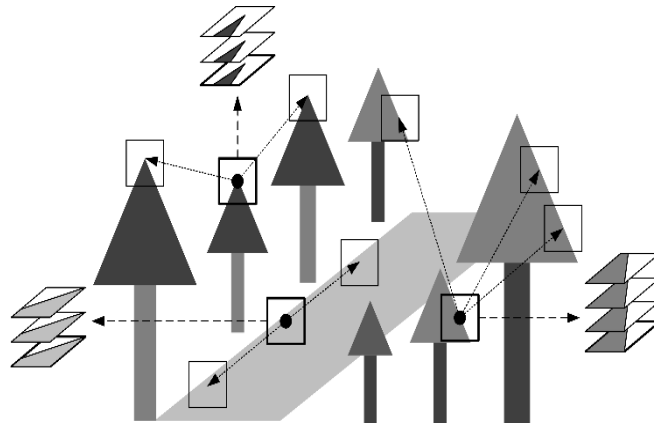


图 1 图像块匹配示意图

Fig. 1 Schematic diagram of image block matching

通过计算图像块之间的加权欧式距离来判断图像块之间的相似程度,当其小于某个距离阈值时就确定当前位置的图像块与参考图像块相似,并将其分为一类,存放至同一组别。最后参考块以及所有与参考块确认相似的图像块都存放至一起形成一组三维矩阵块。欧式距离计算公式可表示为

$$d(B_{xp}, B_{xi}) = \frac{\|B_{xp} - B_{xi}\|_2^2}{L * L}, \quad (1)$$

式中: $d(B_{xp}, B_{xi})$ 表示参考块 B_{xp} 与参考块滑动后位于图像新位置的图像块 B_{xi} 之间的欧式距离, $\|\cdot\|_2^2$ 表示图像块 B_{xp} 与 B_{xi} 每个相同位置像素点强度的平方差, $L \times L$ 表示归一化因子。

对同组图像块进行基于多点型估计算法的三维协同硬阈值滤波,该方法可以在变换域进行阈值收缩后给出组中每个图像块的独立估计值。阈值收缩处理能大幅度降低噪声,对滤波后的系数进行反变换即可得到三维矩阵块中所有图像块的估计结果。硬阈值滤波函数定义为

$$\hat{\gamma}_h^\theta = \begin{cases} \gamma_h^{\theta+\eta}, & |\gamma_h^{\theta+\eta}| > \tau^{\theta+\eta} \\ 0, & |\gamma_h^{\theta+\eta}| \leq \tau^{\theta+\eta} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\hat{\gamma}_h^\theta$ 表示滤波后的系数, $\gamma_h^{\theta+\eta}$ 表示三维矩阵块小波变换系数, $\tau^{\theta+\eta}$ 是预先设定的阈值。

最后在处理完所有图像块后,由于以 B_{xa} 作为参考块的三维图像块组中含有图像块 B_{xa} , 同时 B_{xa} 可能被其他参考块在滑动搜索时搜索到,那么该三维图像块组中也会含有图像块 B_{xa} , 导致 B_{xa} 会有多个估计值在经

过协同滤波后产生。另外,在按照步长对二维数据图像进行分块的过程中,当步长小于图像块边长时就会出现不同图像块包含重叠部分的情况,这样重叠部分的像素点也会产生很多的估计结果。因此需要对这些估计值进行加权平均重组,得到基础估计图像。计算重叠像素点多个估计值加权平均值作为这些像素点的最终估计值,其表达式为

$$\hat{I}(x) = \frac{\sum_n \omega_n B_n(x)}{\sum_n \omega_n}, x \in I, \quad (3)$$

式中: $\hat{I}(x)$ 表示图像上某个像素点的估计值, $B_n(x)$ 表示包含该像素点的图像块中该像素点位置的估计值, ω_n 表示每个块对应的权重。

最终估计与基础估计的步骤相似,不同的是它遍历的是基础估计图像中所有图像块作为参考块进行图像块相似度匹配,得到每个参考图像块的图像块组。在匹配完成后进行三维协同经验维纳滤波,经验维纳滤波器被设计为^[17]

$$H_\omega = \frac{\theta^2}{\theta^2 + \sigma^2}, \quad (4)$$

式中: 噪声的标准差为 σ , 其小波系数为 θ 。

由于在实际信号中噪声标准差和纯净信号均是不明确变量,所以小波系数 θ 也是不明确的。因此将含噪信号 z 经过 T_1 小波变换以及硬阈值滤波 γ^h 后的反变换基础估计图像 \hat{y}_1 作为真值,将其经过 T_2 小波变换后的系数 $\hat{\theta}_{12}$ 近似代替真实系数 θ 。最后使用维纳滤波器 \hat{H}_ω 求得估计系数 $\hat{\theta}_2$ 反变换得到最终结果,鉴于前者小波作用域得到的 \hat{y}_1 可能与无噪模型不匹配,因此选择在另外的小波域中进行,其处理过程如图 2 所示。处理完所有图像块后按照相同方法根据重叠次数对图像块进行加权重组就得到了最终估计图像。

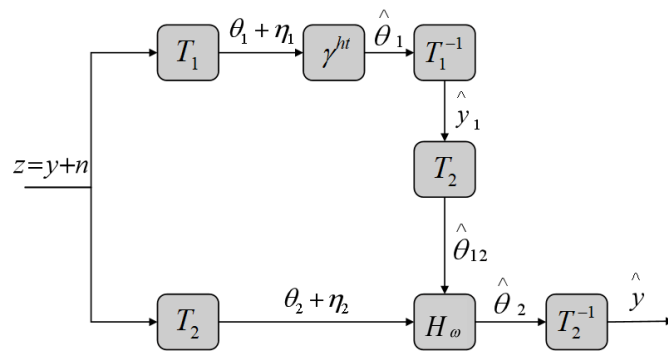


图 2 小波域经验维纳滤波示意图

Fig. 2 Schematic diagram of empirical Wiener filter in wavelet domain

由于在 BM3D 算法中进行了二维变换,会产生一些假信号^[18],所以将基础估计作为参考图像对最终估计进行引导滤波来避免受到假信号的干扰。Li 等^[19]提出的引导滤波 (GF) 是一种通过使用参考图像的特征信息来保留待处理图像特征的滤波方法,同时 GF 也是一种各向异性的滤波方法,在磨平噪声的同时保存图像重要的边缘、纹理和细节信息。

GF 使用局部线性模型建立引导图像 I 与待处理图像 P 之间的关系,保证两者的梯度大小和倍数关系都

不会被扭曲,可以简单定义为

$$q_i = \sum_j \omega_{ij}(I)p_j, \quad (5)$$

式中: q 是输出图像, p 是输入的待滤波图像, I 是引导图像, ω_{ij} 是根据引导图 I 确定的权重值。 q 的像素 i 与所有覆盖 i 的重叠窗口 ω_k 相关, 最终叠加时需要取均值, 因此权重值 ω_{ij} 可以表示为

$$\omega_{ij}(I) = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k:(i,j) \in \omega_k} \left(I + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \right), \quad (6)$$

式中: ω_k 是以像素 k 为中心的窗口, μ_k 是窗口内像素点的均值, $|\omega|$ 是窗口中像素点的个数, I_i 和 I_j 指相邻两个像素点的值, σ_k 代表窗口内像素点的方差, ε 是一个惩罚值。BM3D 结合引导滤波后使得去噪后的图像有良好的去噪保边效果。

1.2 梯度计算

在图像的梯度计算中传统 Canny 算子只是采用了 x 、 y 两个方向的 Sobel 梯度算子求平均, 仅分析了 0° 和 90° 方向的相邻像素的强度变化情况, 没有考虑其他方向的像素强度变化情况, 不能反映真实的变化趋势, 边缘强度变化信息容易被遗漏^[20]。为了消除这一缺陷, 本研究额外增加了两个斜对角方向的模板, 并将所有方向计算得到的梯度信息进行加权合成, 更加准确地计算图像梯度结果, 用四个边缘检测模板计算 Lena 图像的梯度图像如图 3 所示。



图 3 滤波图像四个方向梯度图像。(a) 0° 方向梯度; (b) 90° 方向梯度; (c) 45° 方向梯度; (d) 135° 方向梯度; (e) 加权求和开方梯度

Fig. 3 Four direction gradient of filtered image. (a) 0° direction gradient; (b) 90° direction gradient; (c) 45° direction gradient; (d) 135° direction gradient; (e) Weighted summation of the gradient

1.3 基于块匹配最大类间方差双阈值计算

为了自适应计算双阈值处理过程中的高低阈值, 结合最大类间方差与三维块匹配的思想, 提出了块匹配组内最大类间方差法 (BM-OTSU) 来计算确定最佳双阈值。

块匹配最大类间方差算法的流程如下:

- 1) 根据之前计算的图像块匹配分组情况, 寻找梯度图像中各组的各个图像块相同位置的图像块;
- 2) 将找到的梯度图像中的图像块堆叠为一组三维图像块组;
- 3) 随机初始化一个阈值 T , 将图像块组所有像素点 $f(x_i, y_i)$ 分割为前景 A 和背景 B ;
- 4) 分别计算 A 、 B 区域所占像素点的个数以及比例;
- 5) 分别计算 A 、 B 区域像素值均值;
- 6) 计算类间方差;

将阈值 T 从 $0 \sim 255$ 进行遍历, 找出使得类间方差最大的阈值。

首先将四方向 Sobel 算子计算最终估计图得到的梯度图像, 依据原先三维块匹配中的图像块分组情况进

行分组。如三维块匹配过程中的某一图像块组中包含了 $B_{xR}, B_{x1}, B_{x2}, \dots, B_{xi}$ 图像块, 在梯度图像中找到与之对应的图像块 $G_{xR}, G_{x1}, G_{x2}, \dots, G_{xi}$, 如图 4 所示为梯度图像块分组示意图, 以图 1 的分组结果为基准在梯度图像中找到相同位置的图像块。

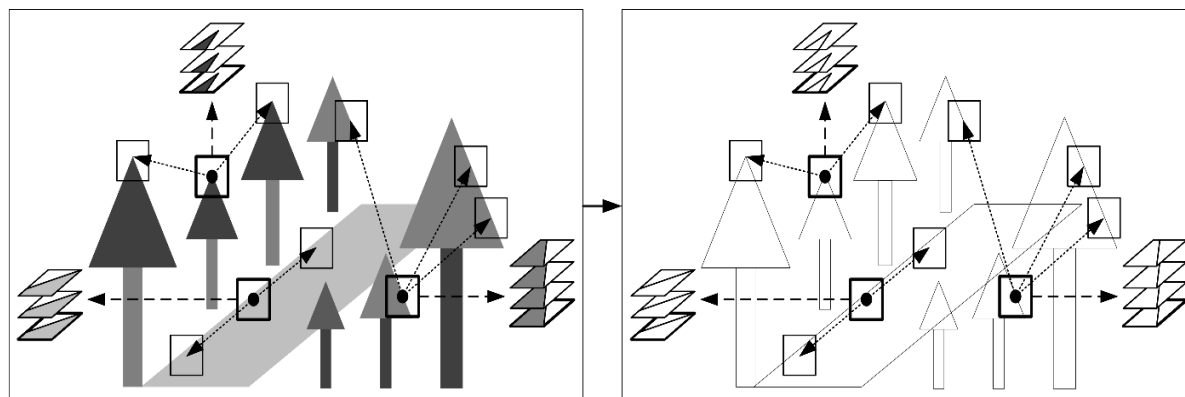


图 4 梯度图像块分组示意图

Fig. 4 Schematic diagram of gradient image block matching

计算图像块组内各个图像块 $G_{xR}, G_{x1}, G_{x2}, \dots, G_{xi}$ 中的所有像素之间的最大类间方差作为最佳阈值, 并储存在阈值分布图上, 存储位置与该图像块组的左上角位置相同, Lena 图像的块匹配组内最大类间方差阈值分布图归一化后如图 5 所示。



图 5 图像非极大值抑制阈值分布图

Fig. 5 Image non maximum suppression threshold distribution

为了保留更多有效边缘进行双阈值处理, 遍历非极大值抑制图像块按照阈值分布图进行高低阈值设置, 高阈值设置与最大类间方差阈值相等, 低阈值取最大类间方差阈值的二分之一。为了避免将噪声也视为边缘, 当最大类间方差阈值小于 50 时, 在高低阈值跟随最大类间方差阈值变化的基础上均增加 20。

本研究提出的一种太赫兹成像三维块匹配改进自适应阈值 Canny 边缘检测算法 (BM-OTSU-Canny) 的整体流程如图 6 所示, 其中 P 代表含噪图像中的参考图像块及其图像块组, R 代表基础估计图像中的参考图像块及其图像块组, G 代表在梯度图像中与基础估计图像块组位置相同的图像块组。

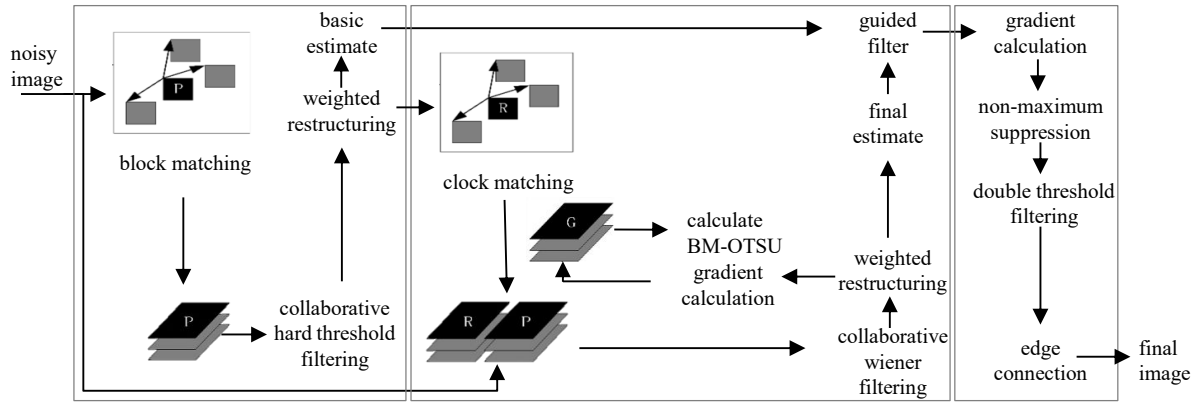


图6 基于三维块匹配的改进自适应阈值Canny算法流程图

Fig. 6 Flow chart of improved adaptive threshold Canny algorithm based on 3D block matching

2 实验结果与分析

同时采用了传统Canny算子、BM-OTSU-Canny以及混合滤波最大类间方差算法(MF-OTSU)对大量图像进行边缘检测实验,通过比较实验结果对算法效果进行评估论证。MF-OTSU算法是使用几何均值滤波结合中值滤波的混合滤波器进行滤波,并且使用改进最大类间方差法计算高低阈值^[21]。

图7是采用三种方法进行边缘检测的结果对比图, BM-OTSU-Canny算法与其余两种算法相比较具明显优势。图7第(1)行显示传统算法,由于阈值人为设定,容易阈值设置过高造成边缘漏检,图像右侧双边沿使用传统Canny算法只能检测出一条边沿。MF-OTSU算法的检测结果优于传统算法,但是未检测出图像中位于右侧的斜向下边框,而BM-OTSU-Canny算法提取出了该边缘,检测结果更加完整。图7第(2)和(3)行增加噪声后的图像检测结果发现,传统Canny算法的过度平滑丢失了边缘细节,并且无法完全去除噪声,检测出了一些伪边缘, MF-OTSU算法去噪效果不佳,而所提出的算法能够有效去除噪声并检测出较多的有效边缘,优于传统算法。

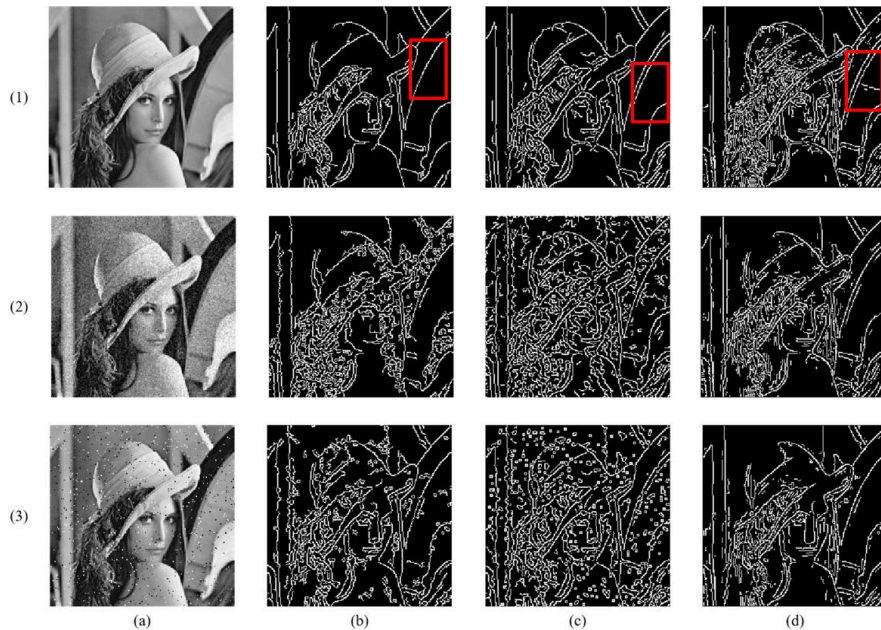


图7 Lena图像边缘检测。(a) 原图; (b) 传统Canny; (c) MF-OTSU; (d) BM-OTSU-Canny

Fig. 7 Lena image edge detection. (a) Original image; (b) Traditional canny; (c) MF-OTSU; (d) BM-OTSU-Canny

图8是通过太赫兹单点探测器扫描得到的不同物体图像经过不同算法处理的边缘检测结果。从四幅图的不同算法结果对比中可以看出,传统Canny算法以及MF-OTSU算法在检测时将很多噪声信号也视为边缘,而BM-OTSU-Canny算法去除了大部分噪声,检测结果也比较完整,物体的大致轮廓更加清晰。如图8,第(1)行图像在物体轮廓外圈有比较严重的噪声干扰,传统算法和MF-OTSU均无法去除右侧错误轮廓, BM-OTSU-Canny在检测中过滤了该错误轮廓,获得清楚简明的物体边缘。图8第(2)和(3)行显示传统算法和MF-OTSU不仅无法去除圆内噪声,并且在外圆凸起处的边缘检测结果不连续, BM-OTSU-Canny的检测结果中过滤了噪声边缘且凸起边缘连续,相对顺滑。图8第(4)行可以看出BM-OTSU-Canny的检测效果也优于其余算法,能够获得更清晰的检测结果图像。

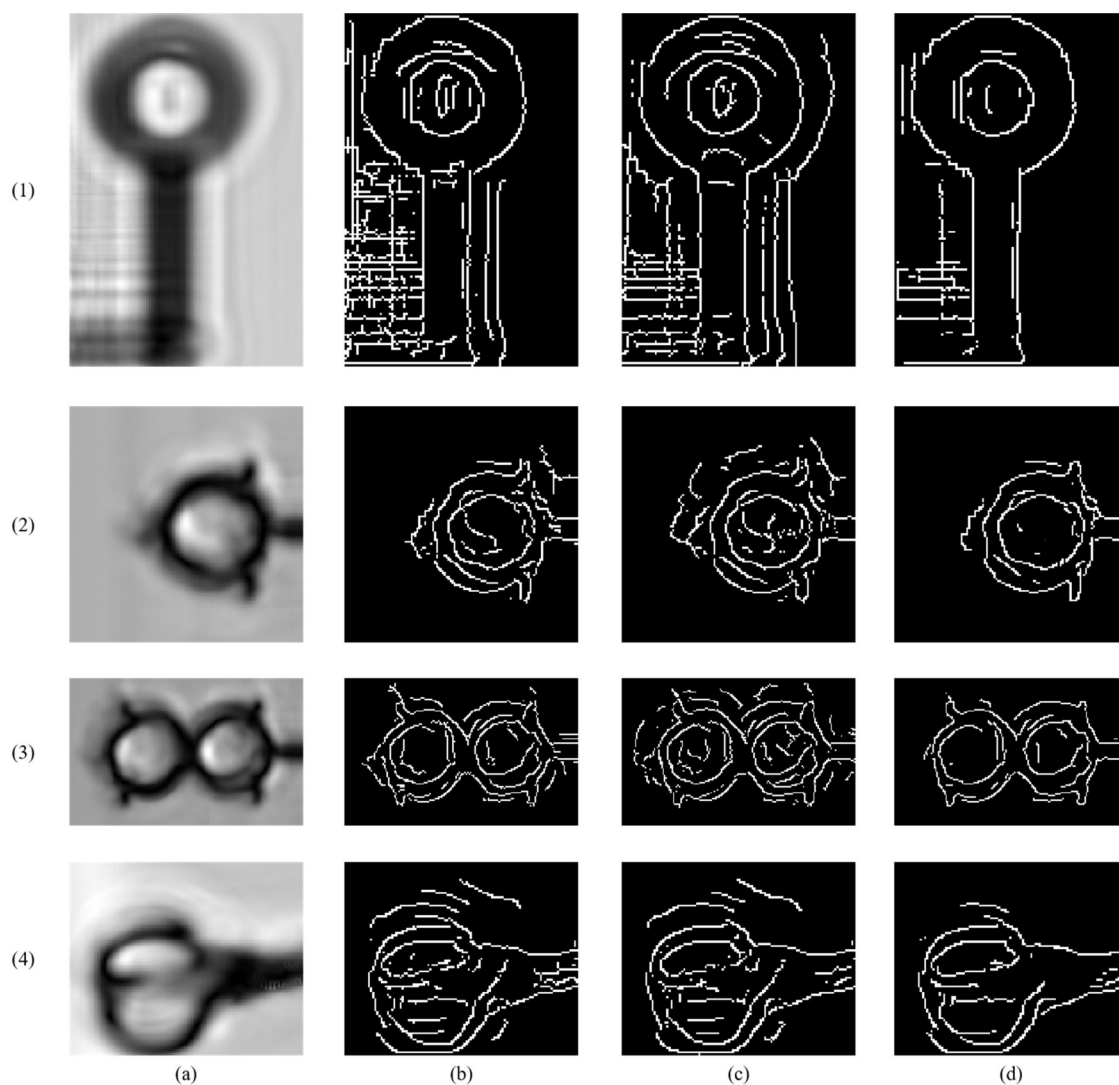


图8 太赫兹图像边缘检测。(a)原图;(b)传统Canny;(c)MF-OTSU;(d)BM-OTSU-Canny

Fig. 8 THz image edge detection. (a) Original image; (b) Traditional canny; (c) MF-OTSU; (d) BM-OTSU-Canny

通过严格的图像质量评价指标峰值信噪比 (PSNR) 进行客观评价更加能说明算法效果。峰值信噪比是一个表示信号最大可能功率和破坏性噪声功率的比值,该值越高表明去噪效果越好。高斯噪声环境下PSNR统计如图9所示,从图中可以看出,在添加噪声后三种算法处理的结果中,Canny算法的峰值信噪比最低,在方差为20时,其为22.202, BM-OTSU-Canny算法的峰值信噪比最高,在方差为20时,其为27.151。椒盐噪声

环境下 PSNR 统计如图 10 所示,从图中可以看出 MF-OTSU 算法相比其余算法的峰值信噪比最低,在椒盐噪声密度为 3% 时仅为 21.469,相同情况下 Canny 算法为 25.096, BM-OTSU-Canny 算法为 27.522。总体上在适应不同噪声的情况下,相比较 Canny 算法以及 MF-OTSU 算法, BM-OTSU-Canny 算法在 PSNR 指标上更优,滤波效果更强,可以更精确地抑制伪边缘。

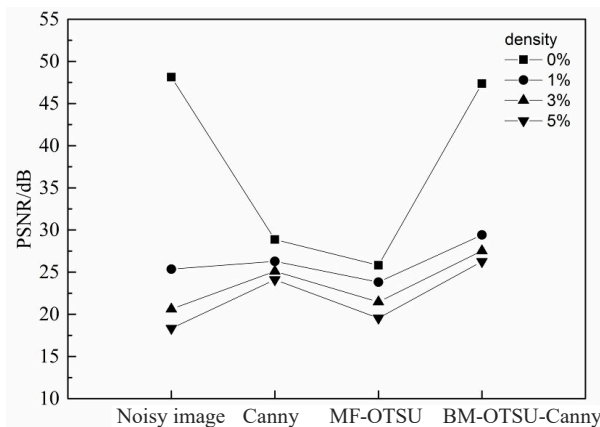


图 9 高斯噪声环境下 PSNR 统计

Fig. 9 PSNR statistics in Gaussian noise environment

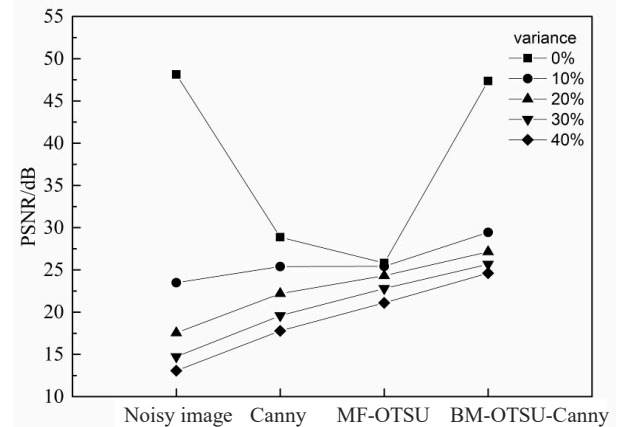


图 10 椒盐噪声环境下 PSNR 统计

Fig. 10 PSNR statistics in pepper noise environment

3 结 论

提出了一种用于太赫兹成像的基于三维块匹配的改进自适应阈值 Canny 边缘检测算法,采用三维块匹配滤波结合引导滤波代替传统高斯滤波,去除噪声的同时较好保留了边缘信息;在双阈值处理中,使用块匹配与最大类间方差结合的新方法计算了局部最佳阈值,充分考虑了图像的局部梯度分布特征,增强了局部自适应性。通过大量图片的边缘检测对比结果表明,所提出改进算法相比传统算法和现有算法可以有效去除图像噪声,并且能够提取出传统 Canny 算法无法检测的弱边缘,具有较高的边缘检测率,提高了算法的精度和有效性,可为目标识别以及缺陷检测提供一定的参考价值。将来可以将算法推广到更高维度,对太赫兹波反射信息重建的三维矩阵模型进行 3D 边缘检测,提取最真实的轮廓进行曲面重建,更好地展示物体的内外形貌。

参考文献:

- [1] Guo Y D, Ling F R, Yao J Q. Super-resolution reconstruction for terahertz images based on gradient transform [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(3): 271-277.
郭佑东, 凌福日, 姚建铨. 基于梯度变换的太赫兹图像超分辨率重建 [J]. *激光技术*, 2020, 44(3): 271-277.
- [2] Li J R, Li J S, Shi Y X. Research on terahertz imaging detection algorithm [J]. *Modern Electronics Technique*, 2019, 42(24): 71-74.
李建蕊, 李九生, 史叶欣. 太赫兹成像检测算法研究 [J]. *现代电子技术*, 2019, 42(24): 71-74.

- [3] Wang Y, Li Q. Adaptive iterative denoising of terahertz image based on noise estimation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0814001.
王月, 李琦. 基于噪声估计的太赫兹图像自适应迭代去噪 [J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0814001.
- [4] Wang H L, Liu L, Ji W L. Edge detection based on canny algorithm improved with interpolation and preferential threshold [J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(5): 394-398.
王海龙, 柳林, 纪文璐. 改进插值及择优阈值Canny算法的边缘检测 [J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 394-398.
- [5] Li J, Liu K Y, Ren X S, et al. Application of canny algorithm based on adaptive threshold in MR image edge detection [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(2): 712-719.
李健, 刘孔宇, 任宪盛, 等. 基于自适应阈值的Canny算法在MRI边缘检测中的应用 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(2): 712-719.
- [6] Wu S M, Han M, Wang J T. Morphology image edge detection algorithm based on multi-scale and multi-direction structural elements [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(3): 278-285.
吴朔媚, 韩明, 王敬涛. 基于多尺度多方向结构元素的形态学图像边缘检测算法 [J]. 量子电子学报, 2017, 34(3): 278-285.
- [7] Routray S, Ray A K, Mishra C. Image denoising by preserving geometric components based on weighted bilateral filter and curvelet transform [J]. *Optik*, 2018, 159: 333-343.
- [8] Liu L X, Li B W, Wang Y P, et al. Remote sensing image segmentation based on improved canny edge detection [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(12): 54-58, 180.
刘丽霞, 李宝文, 王阳萍, 等. 改进Canny边缘检测的遥感影像分割 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(12): 54-58, 180.
- [9] Pawar K B, Nalbalwar S L. Distributed canny edge detection algorithm using morphological filter [C]. *IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology*. Bangalore, India, IEEE, 2017: 1523-1527.
- [10] Duan H Y, Shao H, Zhang S Z, et al. An improved algorithm for image edge detection based on canny operator [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2016, 50(12): 1861-1865.
段红燕, 邵豪, 张淑珍, 等. 一种基于Canny算子的图像边缘检测改进算法 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(12): 1861-1865.
- [11] Zhao M M, Liu H X, Wan Y. An improved Canny edge detection algorithm based on DCT [C]. *IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing*. Nanjing, China, IEEE, 2015: 234-237.
- [12] Li C Y, Chen G X, Ding Y J. Improved edge detection algorithm for canny operator [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(8): 1758-1762.
李长有, 陈国玺, 丁云晋. 改进Canny算子的边缘检测算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(8): 1758-1762.
- [13] Li X, Zhang H. An improved canny edge detection algorithm [C]. *8th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science*. Beijing, China, IEEE, 2017: 275-278.
- [14] Gong Y X, Li X C, Zhang H, et al. An improved Canny algorithm based on adaptive 2D-Otsu and Newton Iterative [C]. *2nd International Conference on Image, Vision and Computing*. Chengdu, China, IEEE, 2017: 67-71.
- [15] Liu J Q, Zhang Z J, Dong N C, et al. Infrared image denoising and defect quantification based on 3D block matching [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(10): 1269-1275.
刘佳琪, 张志杰, 董宁琛, 等. 基于三维块匹配的红外图像降噪与缺陷量化方法 [J]. 激光与红外, 2020, 50(10): 1269-1275.
- [16] Zhan Y J, Dai T D, Huang J J, et al. Synthetic aperture radar image filtering based on clustering three-dimensional block-matching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 041004.
詹云军, 代腾达, 黄解军, 等. 基于聚类三维块匹配的合成孔径雷达影像滤波算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 041004.

- [17] Niu G Y. *Research on Hyperspectral Imagery Denoising Algorithm Based on BM4D* [D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
牛高阳. 基于BM4D的高光谱图像去噪算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [18] Gao C Q, Li P. Infrared image denoising based on three-dimensional block matching [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2016, 28(2): 150-155.
高陈强, 李佩. 引导滤波和三维块匹配结合的红外图像去噪 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(2): 150-155.
- [19] Li Y M, Sun H Y, Guo H C. Image preprocessing method based on bilateral filtering combined with guided filtering to enhance laser three-dimensional images [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 151007.
李媛淼, 孙华燕, 郭惠超. 双边滤波与引导滤波增强激光三维图像的图像预处理方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(15): 151007.
- [20] Li Q Z, Liu Y. Image weak edge detection algorithm based on improved Canny operator [J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(S1): 361-363.
李庆忠, 刘洋. 基于改进Canny算子的图像弱边缘检测算法 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S1): 361-363.
- [21] Song R J, Liu C, Wang B J. Adaptive Canny edge detection algorithm [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2018, 38(3): 72-76.
宋人杰, 刘超, 王保军. 一种自适应的Canny边缘检测算法 [J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 72-76.