

文章编号 1004-924X(2018)12-3028-12

自适应窗口形状的中值滤波

邹永宁^{1*}, 姚功杰^{1,2}

- (1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心, 重庆 400044;
2. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 中值滤波去除噪声的同时, 难免出现含有线形图像的边缘轮廓信息跟随丢失的情况。为了达到滤除图像噪声最大化, 有用信息损失最小化的目的, 根据图像边缘特征选择或设计了适当大小和形状的窗口来进行中值滤波等操作。一方面, 创新性地提出将 Hough 变换应用到车轮裂缝 CT 图像的滤波窗口形状的选择上, 针对单一方向轮廓的图像, 利用 Hough 变换检测出裂缝的方向, 从而采用与裂缝形状相应的窗口对裂缝进行有针对性滤波, 将该方法与传统方法进行了对比实验, 并将 60 层滤波后切片图像堆栈得到了三维图像; 另一方面, 针对含有多个方向轮廓的图像, 为了进一步改善滤波效果, 提出根据像素梯度设计斜向滤波器, 对多方向的线对进行滤波, 数据显示经改进方法滤波后图像的峰值信噪比 (PSNR) 较传统的中值滤波提高了 4~6, 结构相似性 (SSIM) 提高了 1%~2% 左右, 最后用 683 层荞麦切片 CT 图堆栈得到三维图像, 对比滤波前后图像, 可知该方法滤波效果良好。

关键词: 中值滤波; 窗口形状; 有针对性滤波; 霍夫变换; 像素梯度

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182612.3028

Median filtering algorithm for adaptive window shape

ZOU Yong-ning^{1*}, YAO Gong-jie^{1,2}

- (1. ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
 2. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)
- * Corresponding author, E-mail: zynlxu@sina.com

Abstract: While removing noise, the loss of useful information is inevitable, especially the edge information of linear images. To maximize the image and minimize the loss of useful information according to the edge features of the testing image, a window with appropriate size and shape was selected to perform median filtering and other operations. It is innovatively proposed to apply a Hough transform to the filtering window shape selection of the wheel crack CT image, aiming at the image of the single direction contour. The Hough transform was used to detect the direction of the contour, and the corresponding shape window was used to filter the crack. This method was compared with the traditional method, and the image with better visual effect can be obtained after pre-processing by Hough transform. In this paper, to improve the filtering effect for images with multi-direction edge contours, an oblique filter is designed according to the pixel gradient. The data shows that the peak signal-to-noise

收稿日期: 2018-05-29; 修订日期: 2018-07-14.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项资助 (No. 2013YQ030629)

ratio (PSNR) of the image after proposed filtering is improved by 4-6 compared with the traditional median filter. The structure similarity (SSIM) is increased by approximately 1%-2%. Three-dimensional images are obtained using the stack of CT images of buckwheat slices. The filtering result of the proposed method is favorable by the contrast of before and after.

Key words: median filtering; shape of filter window; targeted filtering; Hough transform; pixel gradient

1 引言

中值滤波是一种在一定程度上能保护图像边缘信息,同时又能去除噪声的非线性滤波方法,去除脉冲噪声的效果良好,在图像增强、复原等领域中得到了广泛的应用。但是在去除噪声的同时,难免出现有用信息的跟随丢失,尤其是含有线形图像边缘信息。CT 图像中出现的噪声是在信号采集阶段引入的,噪声对图像的质量的影响很大,即使是少量的噪声也会大大降低图像质量,影响后续如图像分割、边缘检测、特征提取等处理。因此,去除 CT 图像噪声是非常重要的预处理过程。

为了改进中值滤波,有学者提出自适应滤波^[1-9],利用滤波器区域内图像的统计特性,较好地解决了噪声浓度较高时的去噪问题,但是以往的自适应中值滤波对于一些特定形状的图形,尤其是边缘轮廓,图像噪声去除与有用信息保留难以平衡。全变分(TV)模型由 Rudi、Osher 和 Fatemi 提出的^[10],通过建立能量泛函及其约束条件,利用变分原理求解 E-L 方程的近似值来去噪声,该算法沿梯度方向无扩散,能保护图像边缘纹理,但是在平坦区域会产生虚假边缘,影响去噪效果。2005 年由 Baudes 提出的 Non-Local Means^[11],即非局部平均滤波法,该算法利用图像中普遍存在的冗余信息来去噪声,与常用的双线性滤波、中值滤波等利用图像局部信息来滤波不同的是它对整幅图像进行去噪,以图像块为单位在图像中寻找相似区域,再对这些区域求平均来去除图像噪声。BM3D(Block-matching and 3D filtering,3 维块匹配滤波)^[12-13]是当前效果最好的算法之一,该算法是在图像中寻找相似块的方法进行滤波,与 NL-Means 有点类似,但是它的复杂度是 NL-Means 的 3 倍多,为了降低复杂度,在 2017 年,基于 K-Means 聚类的 BM3D^[12]的图像去噪方法被提出,该算法平均缩短约一半的时

间消耗,但是实时计算仍无法实现。近年来,源于卷积神经网络(CNN)的深度学习法成为研究热点,用 CNN^[14-17]处理自然图像的去噪问题,神经网络模型避免了马尔可夫模型在概率学习和推断过程中的演算困难,达到降低计算复杂度的目的。2017 年,Zhang^[18]等提出用较深层的 CNN 网络,称为 DNCNN,采用的是一种残差学习的方法,对噪声而不是图像进行学习,解决了网络层数加深导致的梯度弥散效应,所得到的结果要优于此前的最优去噪方法 BM3D。深度学习法的优点毋庸置疑,但是却有随着网络层数的加深,所需的训练时间和训练数据大大增加,模型正确性验证复杂,对硬件性能要求高,训练成本高等缺点。

针对上述问题,本文创新性地提出将 Hough 变换应用到中值滤波中,利用 Hough 变换对图形简单方向的边缘形状特征进行提取,根据特征选择相应形状的滤波窗口进行有针对性滤波。另外,还提出一种针对复杂方向的改进新方法,即通过计算像素点梯度,设计与梯度方向垂直的滤波器,对多种边缘(线性,圆形等)轮廓滤波,达到自适应滤波的目的。文中进行了仿真实验,对比实验表明,对于特定的形状,有针对性的滤波比传统的中值滤波滤波效果更好,视觉效果更佳。此外,实验还将这些方法实际应用到 CT 图像中,检测出 CT 图像中车轮裂缝形状并选择简单方向滤波器滤波,对具有复杂内部结构的荞麦 CT 图像设计斜向滤波器滤波,达到自适应滤波的目的,实验数据表明本文的去噪方法在 CT 中得到良好的滤波效果,即在滤除噪声的同时能大程度上保证有用信息不受损,尤其是边缘轮廓信息,并且使滤波过程简单化,实现滤波所需成本低且可靠性较高。

2 理论基础

2.1 中值滤波

中值滤波是对滤波窗口内的灰度值按从小到

大排序,经过排序后序列的中值替换窗口中心灰度值,是一种非线性的滤波方法。二维中值滤波算法是:对于一幅图像的像素灰度矩阵,取以目标像素为中心的一个子矩形窗口,子矩形窗口是可以滑动的,可以根据需求选取 3×3 、 5×5 等,对矩形窗口内的像素灰度排序,取序列中值作为目标像素的新灰度值,通常情况下目标像素位置是原信号中心位置。

2.2 Hough 变换

Hough 变换是图像特征提取的一种方法,通过一种投票算法,它能够检测特定形状的图形。该过程是在参数空间中,计算累计结果的局部最大值进而得到与特定图形相符的集合,作为 Hough 变换结果^[19-20]。极坐标系下的直线可以用参数方程 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ 来表示, ρ 表示从原点到直线的垂直距离, θ 表示 x 轴旋逆时针旋转到该直线垂线所经过的角度, θ 的取值范围为 $\pm 90^\circ$ ^[21],如图 1(a)所示。

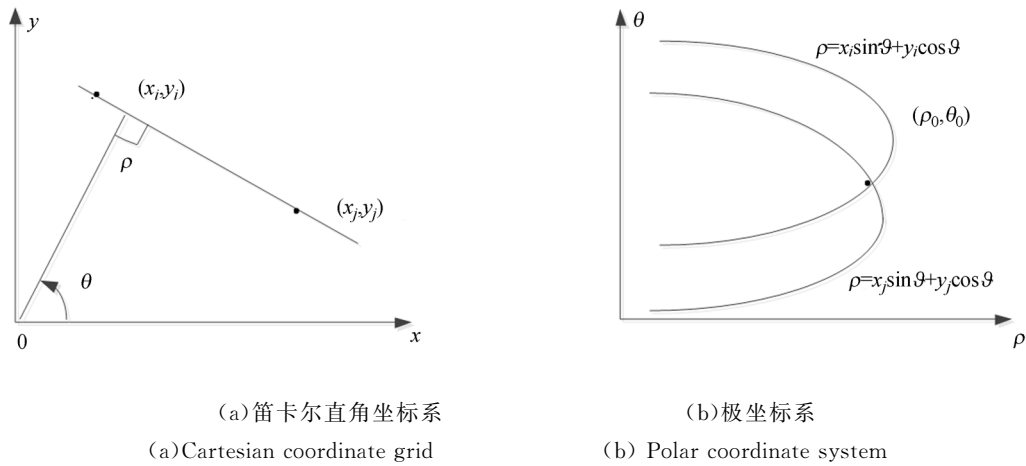


图 1 两种坐标系下直线与点表示

Fig. 1 Line and point representation in two coordinate systems

如图 1 所示,图 1(a)为笛卡尔直角坐标系下的直线和点的表示,图 1(b)图为经过 Hough 变换后由笛卡尔直角坐标空间变换到极坐标系下的表示。在极坐标下,如图 1(a)中笛卡尔直角坐标空间中共线的两个点 (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 映射到图 1(b)中极坐标参数空间是两条曲线,并且相交于点 (ρ_0, θ_0) 。

3 简单方向自适应滤波器

为了选择合适的滤波窗口,本文引入 Hough 变换,用以检测简单直线,圆等不同的几何图形,针对不同的形状可采用相应形状的窗口滤波,整个检测以及滤波流程如图 2 所示。

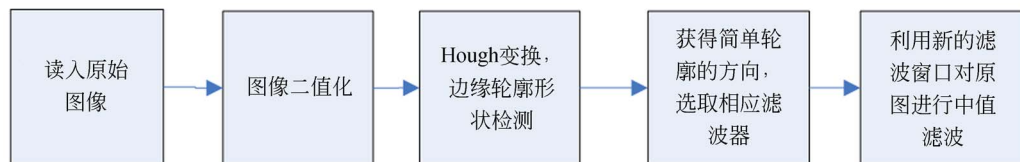


图 2 检测及滤波流程图

Fig. 2 Flow chart of detection and filtering

用 Hough 变换提取线对特征,检测出轮廓直线角度后,选择相应形状的滤波窗口进行中值滤波,例

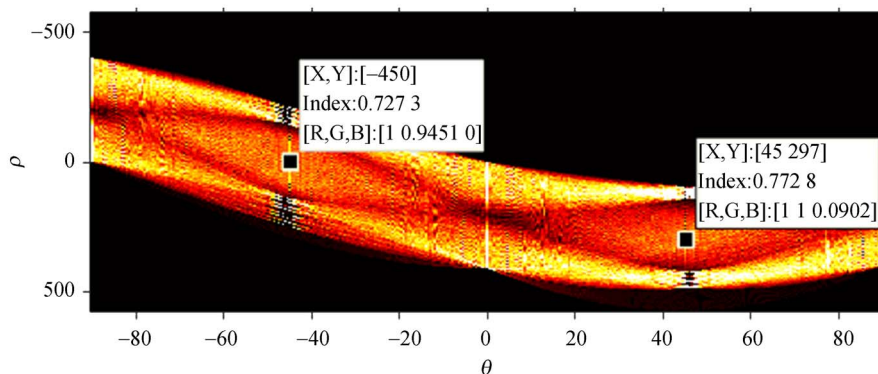
如检测到“X”形斜线段时可使用“X”形状窗口滤波,检测到“十”字线形时可用“十”形状窗口滤波等。



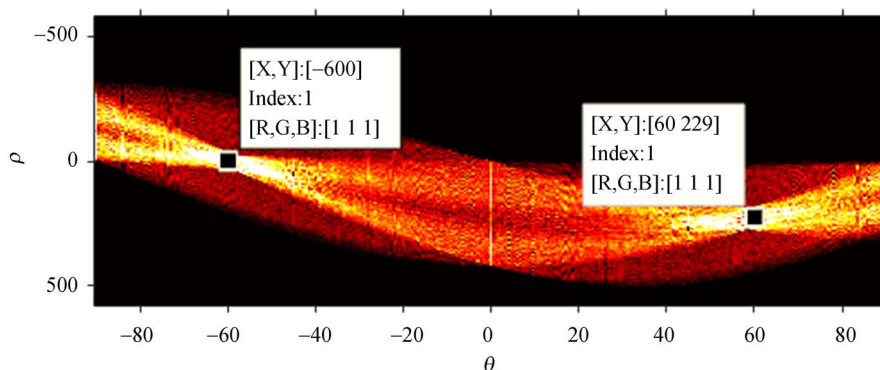
(a) 倾斜角为 45° 和 -45° 的相交线对
 (a) Tilt angle 45° and 45° of intersection line



(b) 倾斜角为 60° 和 -60° 的相交线对
 (b) Tilt angle 60° and 60° of intersection line



(c) 极坐标下(a)线对相交处
 (c) Line(a) pair meet in polar coordinates



(d) 极坐标下(b)线对相交处
 (d) Line(b) pair meet in polar coordinates

图 3 笛卡尔坐标经 Hough 变换映射到极坐标参数空间

Fig. 3 Cartesian coordinates transformed to polar coordinates by Hough transform

如图 3 所示,图 3(a)是倾斜角为 45° 和 -45° 的两组相交的线对,经过 Hough 变换后如图 3(c)所示,可以看到图 3(c)中的极坐标系下曲线相交处,即为图中标记处横坐标,也即直角坐标系

下线对与垂直方向的夹角, θ 值为分别为 45° 和 -45° ;图 3(b)为倾斜角为 60° 和 -60° 的线对,且两组线对相交,经过 Hough 变换后如图 3(d)所示,可以看到图 3(d)中的极坐标系下曲线相交

处,即为图中标记处横坐标,也即直角坐标系下线对与垂直方向的夹角,它们的 θ 分别为 60° 和 -60° ,有了边缘直线的方向,就可设计对应角度滤波窗口进行滤波。

为了测试 Hough 变换法的滤波效果,并验证流程图(图 2)的可行性,本文使用了一个铁路车轮的连续 CT 扫描图像进行实验,连续 CT 扫描图像如图 4 所示,每张图像尺寸为 428×428 。

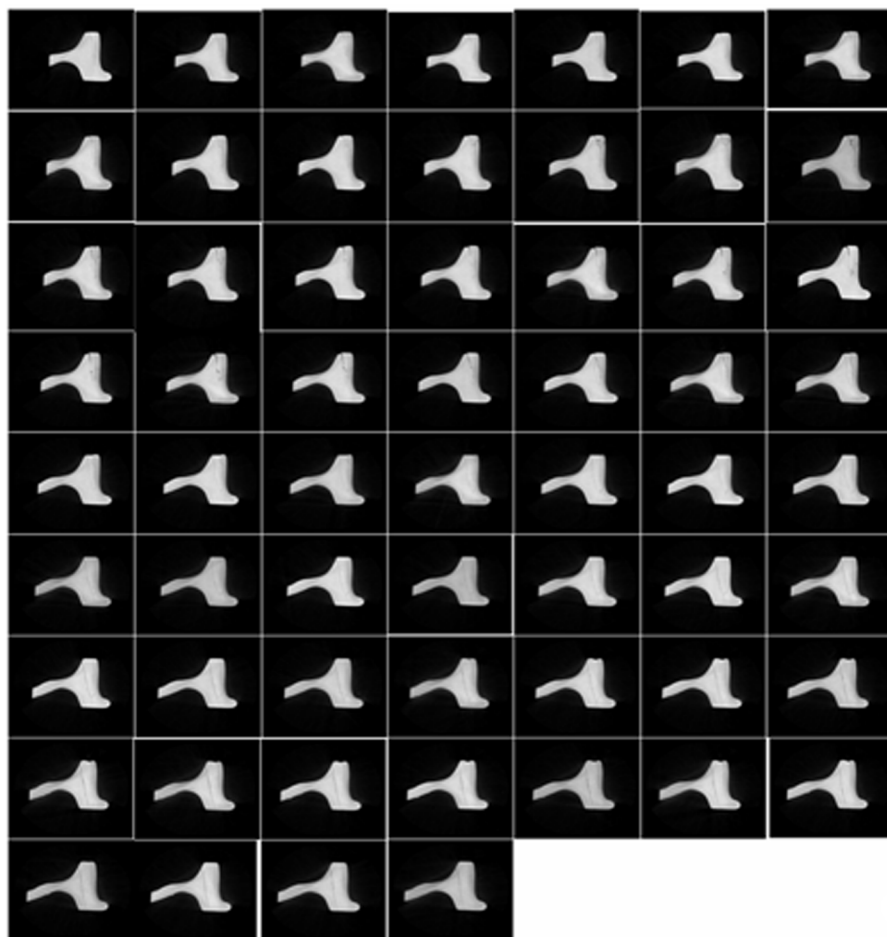


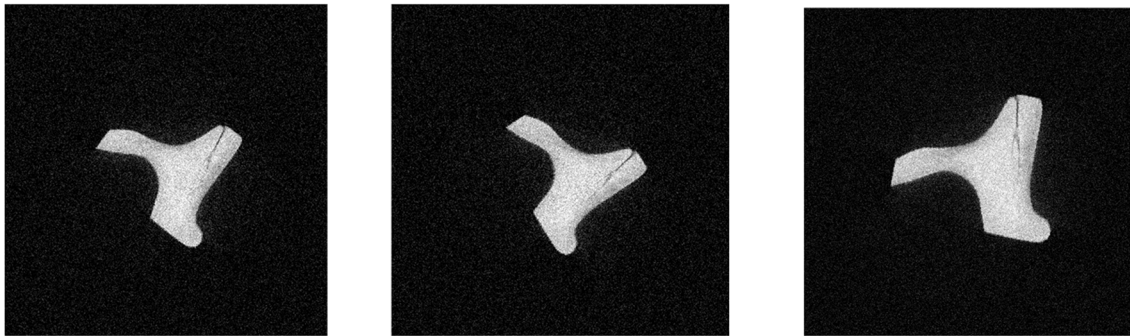
图 4 60 张连续车轮 CT 图像

Fig. 4 Sixty consecutive CT images of a wheel

为了说明 Hough 变换法的有效性,对原始图像进行了一定角度的旋转,这样可以得到不同方向裂纹的图像。

如图 5 所示,特定角度边缘以及裂缝倘若使用一般方法的中值滤波,可能造成噪声残留或者有用信息损失,后续的图像分割等操作将会受到影响,因此,采用针对性滤波窗口的中值滤波是有必要的。工业 CT 图像上,以 Hough 变换为工具,检测出车轮裂缝的方向,例如检测到图 5(a)中的裂缝角度为 60° ,可采用 60° 的窗口进行滤波,图 5(b)中的裂缝角度为 45° ,就用 45° 的窗口

进行滤波,以此类推,可以采用设计好的相应角度滤波器滤波。将本文提出的滤波方法、矩形窗口滤波以及“十”字窗口滤波三者相比较,结果如图 6 所示,另外客观上,针对同一 CT 图像,不同方法的定量评价如表 1 所示,灰度均值反映 CT 图像的平均亮度,亮度越大,图像质量越好,标准差反映 CT 图像灰度级分散程度,值越大图像质量越好,从表中可见,相较于其他两种方法,Hough 变换法的优势在于:可以根据不同角度的裂缝采用相应角度的滤波窗口滤波,达到自适应滤波的目的。



(a) 旋转后的切片 CT 图 a (b) 旋转后的切片 CT 图 b (c) 旋转后的切片 CT 图 c
 (a) CT image a of slices after rotation (b) CT image b of slices after rotation (c) CT image c of slices after rotation

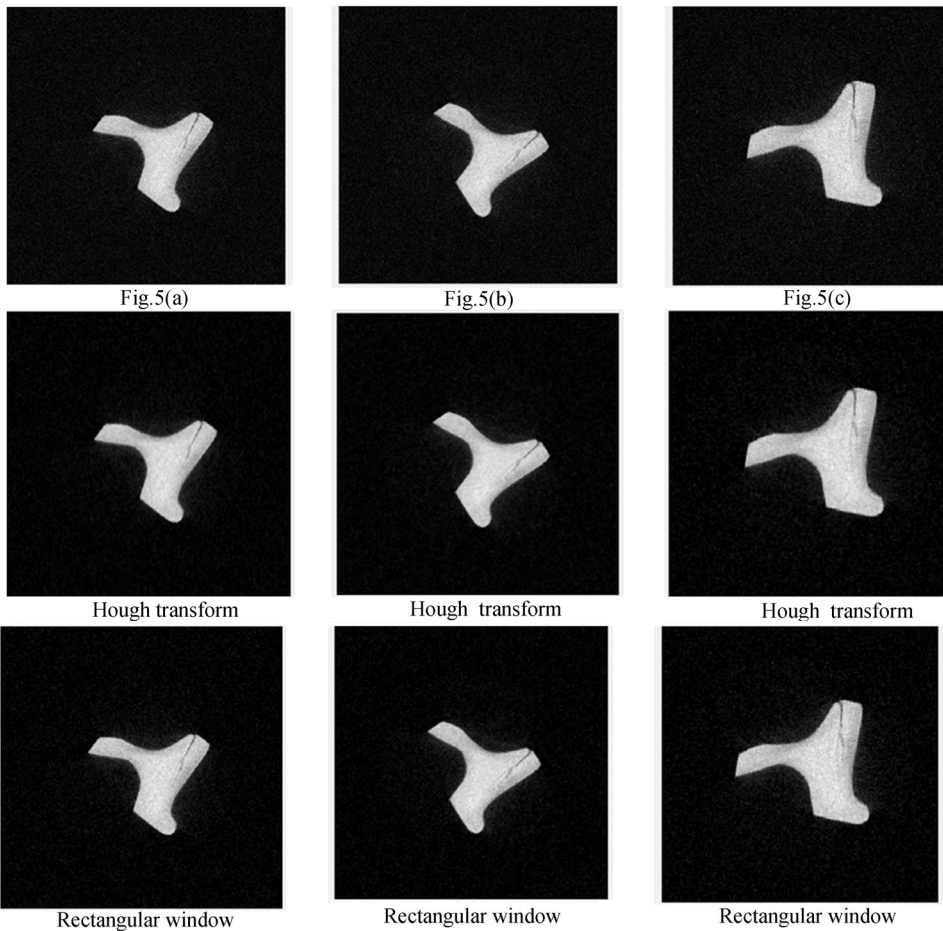
图 5 3 种不同形状车轮切片 CT 图

Fig. 5 CT images of three different tire slices

表 1 不同方法定量评价

Tab. 1 Quantitative evaluation of different methods

评价参数	Hough 变换法			矩形窗口			十字窗口		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
灰度均值	18.710 0	19.343 3	25.798 1	18.184 8	17.923 3	25.442 3	18.159 4	18.026 4	25.798 1
标准差	48.085 7	49.784 1	57.362 4	48.016 2	47.685 4	57.175 4	47.785 4	47.801 9	57.362 4



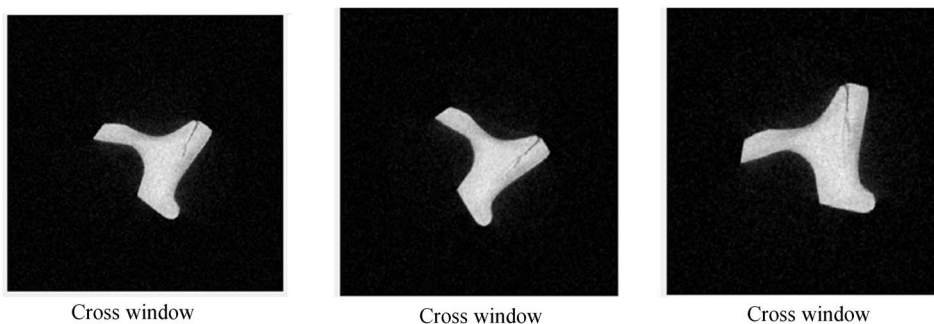
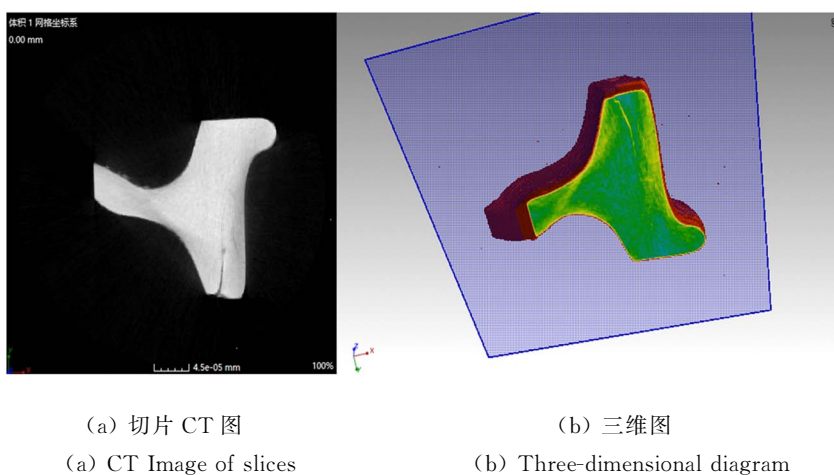


图 6 Hough 变换法与其他方法滤波效果对比图

Fig. 6 Comparison between proposed method and the general filtering method



(a) 切片 CT 图

(a) CT Image of slices

(b) 三维图

(b) Three-dimensional diagram

图 7 Hough 变换滤波方法三维图

Fig. 7 3D image of Hough transform

如图 7 所示,图 7(a)为 60 层车轮切片 CT 图经过 Hough 变换法滤波后的其中一张二维图像,利用 VGstudio MAX 软件,将多幅图进行图像堆栈操作后,并对堆栈后的三维图像中的不同灰度赋予不同的颜色,图 7(b)图为所得,可以看到滤波后的图像边缘、裂缝等轮廓清晰可见,这表明 Hough 变换法对简单方向的轮廓滤波的可靠性高。

4 复杂方向自适应滤波器

在上面一节提到的方法是适应于单一方向或 2 个互补方向(-45° 和 45° , -60° 和 60° 等)的滤波器,如果图像中边缘和裂缝的方向是复杂的,比如曲线形状的边缘和裂缝,它们的方向在每一点都不一样,如果采用固定方向滤波器,显然不符合图像中物体形状的变化,为了进一步对裂缝以外的边缘滤波,进一步改善滤波效果,提出了另外一种新的改进方法,滤波器的方向能够根据物体边缘

形状的变化而改变。具体方法是:首先计算图像的梯度,然后计算每一点像素垂直于梯度的方向,之后根据这个垂直方向设置对称线形滤波器窗口,最后在图像中进行中值滤波。图 8 为本方法的示意图(彩图见期刊电子版),红色方框表示 7×1 的滤波窗口,

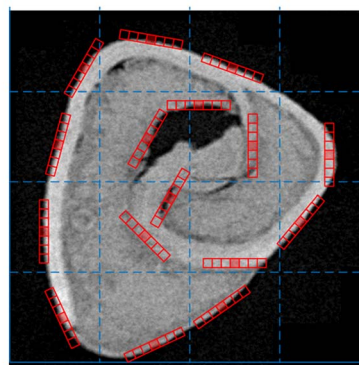


图 8 改进方法示意图

Fig. 8 Schematic diagram of improvement method

窗口中间像素是待处理像素,每个窗口的方向都是根据当前的梯度来确定的。

在求梯度时不是采用中心梯度法,因为线形物体的中心梯度等于 0。因此本文融合了前向梯度和后向梯度,新的梯度公式如下:

$$G(x) = \begin{cases} F(x), & \text{if } \text{mag}(F(x)) \leq \text{mag}(D(x)) \\ D(x), & \text{if } \text{mag}(F(x)) > \text{mag}(D(x)) \end{cases}, \quad (1)$$

其中 $F(x)$ 是前向梯度, $D(x)$ 是后向梯度, $\text{mag}()$ 函数得到自变量的大小。新梯度和传统梯度相比避免了在线形对象上的梯度为 0 的情况。

本算法的伪代码如下:

```

AdapMedian: 自适应形状的中值滤波器
Input: I: 图像, r: 滤波器的半长;
Output: X: 滤波后的图像;

    读取图像 I, 将它转成灰度图像;
    获取图像尺寸;
    计算 I 的梯度 G(D);
    初始化滤波窗口, 长度为 2 × r + 1;
    确定滤波窗口的方向, 即垂直于梯度方向 d;
    采用双线性插值法设置滤波窗口中的每个单元格的值 Q(r + k + 1);
    取窗口内的中值替代窗口中心值 Io(i, j), 自适应滤波窗口制作完成;

```

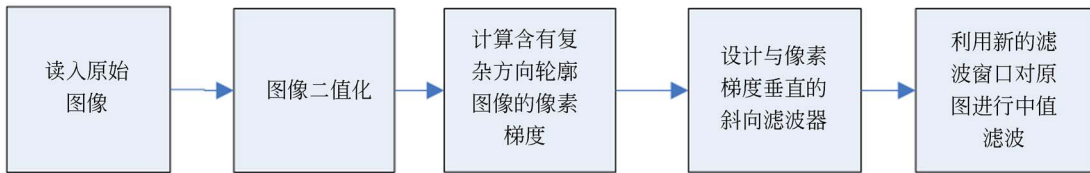


图 9 含复杂方向边缘轮廓的图像滤波流程图

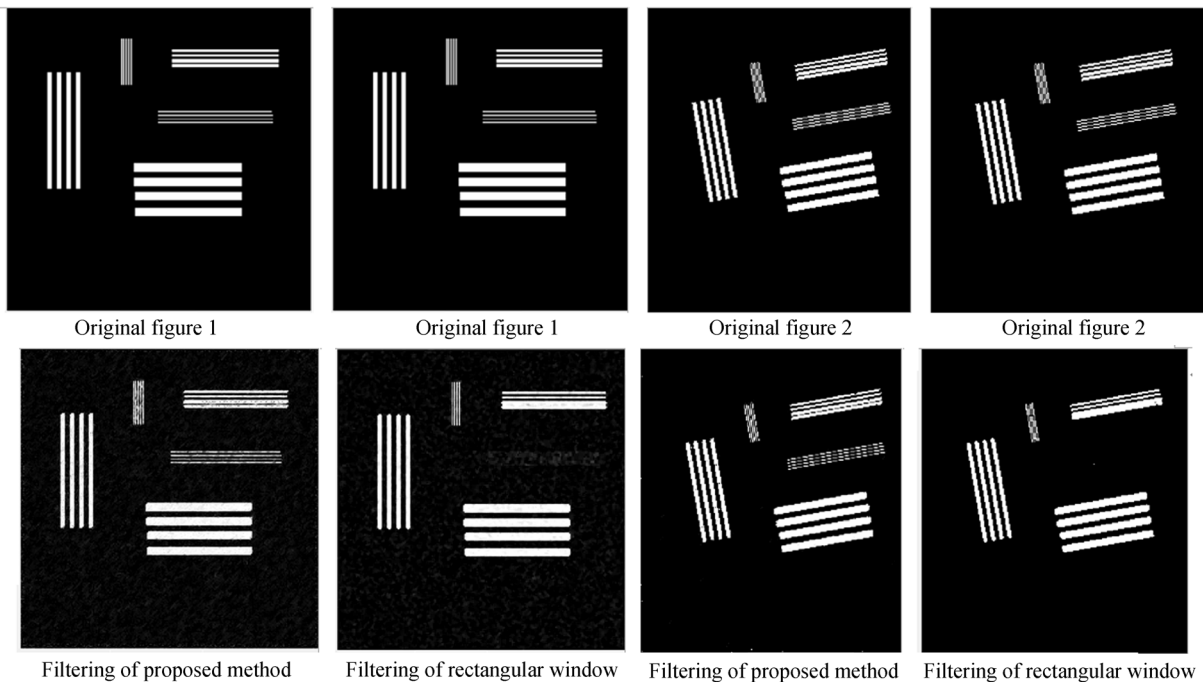
Fig. 9 Image filtering flow chart with complex direction edge contour

图 9 为具有复杂方向边缘轮廓的图像的滤波过程,为了验证图 9 流程的可行性,对不同角度(多方向)的线对测试如下。

如图 10 所示,对尺寸为 256 × 256 的原图滤波测试中,改进方法通过制作与梯度方向垂直,也即线对方向的斜向滤波器对不同角度线对进行滤

波,虽然算法复杂但可以对多个方向的边缘进行针对性滤波,与矩形窗口滤波相比,主观上即可判断出改进方法滤波效果较好,图像失真度较小。

为了进一步从客观上比较改进方法和传统滤波方法,通过计算滤波前后图像的峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)客观评价滤波效



Filtering of proposed method Filtering of rectangular window Filtering of proposed method Filtering of rectangular window

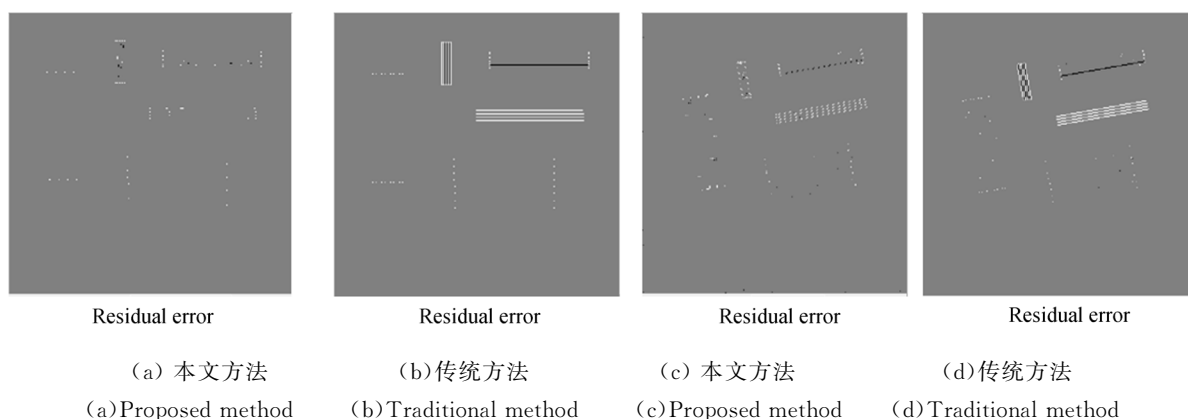


图 10 多角度线对滤波效果与矩形窗口滤波对比图

Fig. 10 Comparison of filter effect and rectangular window filter with multi-angle line

果。PSNR 是使用最为广泛的一种图像客观评价指标之一, PSNR 越高, 图像失真越小; 对于给定的两幅图像 A 和 B, 二者的结构相似度 SSIM 可以用如公式(2)所示。

$$SSIM(A, B) = \frac{(2\mu_A\mu_B + c_1)(2\sigma_{AB} + c_2)}{(\mu_A^2 + \mu_B^2 + c_1)(\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + c_2)}, \quad (2)$$

其中: μ_A 是 A 的平均值, μ_B 是 B 的平均值, σ_A^2 是 A 的方差, σ_B^2 是 B 的方差, σ_{AB} 是 A 和 B 的协方差; $c_1 = (k_1 L)^2$ 和 $c_2 = (k_2 L)^2$ 是维持稳定的常数; L 表示像素值的动态范围。 $k_1 = 0.01$, $k_2 = 0.03$ 。SSIM 取值范围为 $[0, 1]$, 其值越大, 图像失真越少。本次实验的 PSNR 以及 SSIM 的计算结果如表 2 所示。

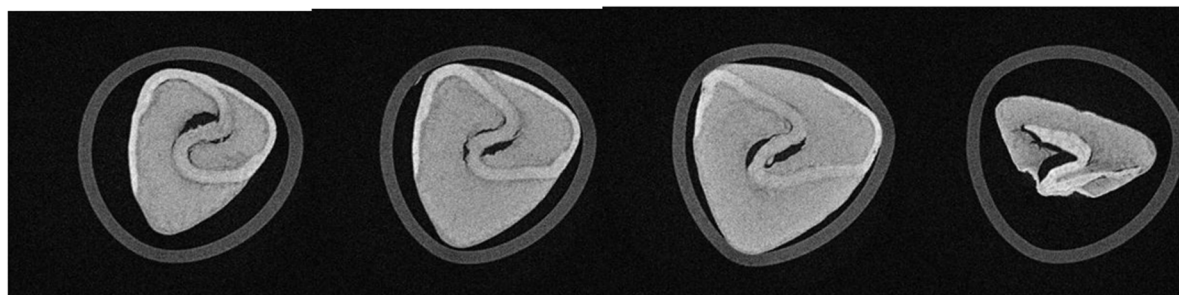
从表 2 不难看出, 同一噪声图像经过改进方法滤波后的 PSNR 以及 SSIM 的值都比矩形窗口

表 2 传统中值滤波与改进方法 PSNR、SSIM 对比

Tab. 2 Comparison of PSNR and SSIM of the proposed method and the traditional filtering method

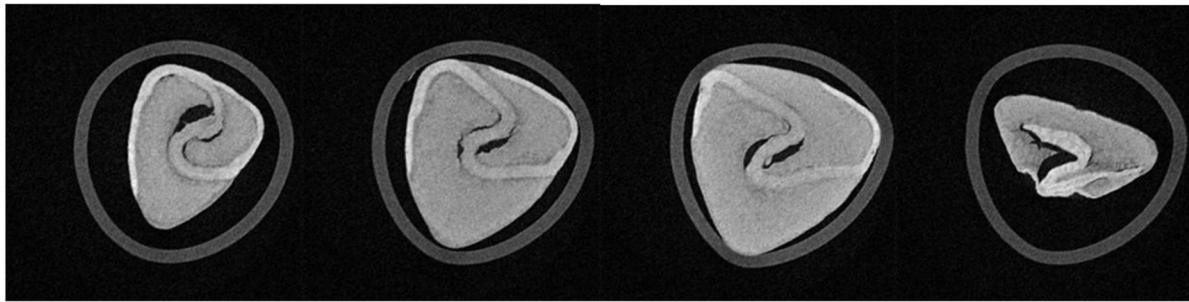
滤波	多方向梯度滤波方法		矩形窗口滤波	
	(a)	(c)	(b)	(d)
PSNR	24.228 3	25.773 6	18.830 1	20.050 0
SSIM	0.971 0	0.976 9	0.941 5	0.957 0

滤波都大。改进方法与矩形滤波相比, 对加噪声后的图 10 中的原图 1 和原图 2 滤波, 新方法的优势明显; 数据显示新方法的 PSNR 比一般方法大 4~6, 新方法的 SSIM 比一般方法约大 1%~2% 左右, 从客观上评价了改进方法的滤波效果, 这表明较传统的矩形窗口而言, 滤波后的图像失真度更小, 视觉效果更好, 可靠性更高。



(a) 滤波前的 4 张切片图

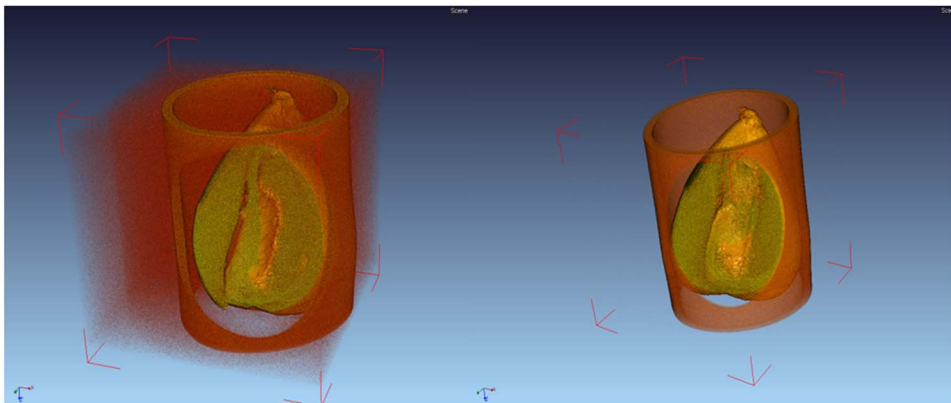
(a) Four slices of image before filtering



(b) 滤波后的 4 张切片图
(b) Four slices of image after filtering

图 11 荞麦二维切片图

Fig. 11 Two-dimensional slices of buckwheat



(a) 滤波前
(a) Before filtering

(b) 滤波后
(b) After filtering

图 12 荞麦三维渲染图

Fig. 12 3-D rendering graph of buckwheat

为了证明实际应用过程中改进方法的可靠性以及优越性,选择了一个荞麦种子的 CT 图像,荞麦直径约为 4.0 mm,装在一个塑料圆柱形管中,用 CD-5BX 型微纳 CT 进行扫描,经过图像重建生成一个各向同性的三维图像。图像的尺寸为 $800 \times 800 \times 683$,每个体素的宽度为 $6.52 \mu\text{m}$ 。用传统的中值滤波方法和改进的方法对其进行滤波处理,图 11 显示了 4 张荞麦切片图像滤波前后的效果。可以看到经改进方法滤波后的 4 张切片图像清晰,尤其是边缘轮廓清晰,达到了良好的预处理效果,同理,可将改进方法运用到实际去噪过程中,因为荞麦内部结构边缘轮廓的方向复杂多样,将像素梯度计算运用到中值滤波中,根据像素梯度设计与梯度垂直的斜向滤波器,使用新滤波器对 683 张荞麦 CT 图像滤波,最后将滤波后的 683

层切片堆栈后得到三维图如图 12 所示。图 12 (a)为滤波前荞麦三维图像,图 12 (b)为滤波后荞麦三维图像,对比滤波前后三维图,不难发现该方法在滤除 CT 图像采集过程中引入的噪声的同时能很好地减少有用信息的损失,可靠性高,经该方法滤波后的三维图视觉效果良好。

5 结 论

针对车轮裂缝这种单一方向对象的滤波,提出利用 Hough 变换计算中值滤波窗口方向,再采用该方向的窗口进行中值滤波。将 Hough 变换法、传统的矩形窗口滤波方法和十字窗口滤波进行对比,并实际应用到工业 CT 上,二维图像堆栈得到三维图的实验表明了针对性滤波的可行性。

针对复杂多方向边缘轮廓的对象,首先计算图像每一点的梯度,根据该点梯度计算滤波器的方向,再用特定形状的滤波器对该点像素进行滤波。对具有复杂内部结构的荞麦 CT 图进行了中值滤波实验,结果表明本文方法具有保持边缘形状的优点。从主观上判断,两种新方法在实际应用中,都能更好地滤除噪声和减少有用信息的损失。Hough 变换法的缺点在于滤波窗口模板需要提前制作以适应 1~2 个角度的边缘轮廓,模板角度和轮廓角度间存在些许偏差也会对滤波造成影响;复杂方向的滤波不存在上述缺点,虽在算法上较简单

方向滤波复杂,且存在线性插值带来的误差,但可以对多个方向同时滤波,鲁棒性良好,通过计算线对图滤波前后的峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)客观评价滤波效果,数据结果表明改进方法的 PSNR 比一般方法大 4~6,改进方法的 SSIM 比一般方法大 1%~2%左右。本文的创新点在于将 Hough 变换和像素梯度计算运用到中值滤波中,对窗口的形状选择和设计有较大意义,能够实现有针对性的中值滤波,针对不同形状的边缘轮廓,在滤除噪声的同时能更好地减少有用信息的损失,从而达到良好的图像预处理效果。

参考文献:

- [1] 张新明,康强,程金凤,等.采用自适应四点窗中点滤波的高椒盐噪声滤除方法[J].计算机应用,2017,37(3):832-838.
ZHANG X M, KANG Q, CHENG J F, et al.. Adaptive four-dot midpoint filter for removing high density salt-and-pepper noise in images[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(3): 832-838. (in Chinese)
- [2] KHAN S, LEE D H. An adaptive dynamically weighted median filter for impulse noise removal [J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2017, 2017(1):67.
- [3] 宗永胜,胡晓辉,张荣光.一种自适应双阈值中值滤波方法[J].小型微型计算机系统,2017,38(7):1642-1647.
ZONG Y SH, HU X H, ZHANG R G. Adaptive dual-threshold median filtering method[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2017, 38(7): 1642-1647. (in Chinese)
- [4] NASRI M, SARYAZDI S, NEZAMABADI-POUR H. A fast adaptive salt and pepper noise reduction method in images[J]. *Circuits Systems & Signal Processing*, 2013, 32(4):1839-1857.
- [5] SA P K, MAJHI B. An improved adaptive impulsive noise suppression scheme for digital images[J]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2010, 64(4):322-328.
- [6] 王志军,于之靖,马凯,等.一种自适应中值梯度倒数加权的图像滤波算法[J].激光与光电子学进展,2017,54(12):148-154.
WANG ZH J, YU ZH J, MA K, et al.. An image filtering algorithm based on adaptive median and gradient inverse weigh[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12):148-154. (in Chinese)
- [7] 刘鹏宇,哈睿,贾克斌.改进的自适应中值滤波算法及其应用[J].北京工业大学学报,2017,43(4):581-586.
LIU P Y, HA R, JIA K CH. Improved adaptive median filter and Its' application[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, 43(4): 581-586. (in Chinese)
- [8] ROY A, LASKAR R H. Non-casual linear prediction based adaptive filter for removal of high density impulse noise from color images[J]. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 2017, 72:114-124.
- [9] 张雷,王延杰,孙宏海,等.采用核相关滤波器的自适应尺度目标跟踪[J].光学精密工程,2016,24(2):448-459.
ZHANG L, WANG Y J, SUN H H, et al.. Adaptive scale object tracking with kernelized correlation filters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 448-459. (in Chinese)
- [10] 黄金,周先春,吴婷,等.混合维纳滤波与改进型TV的图像去噪模型[J].电子测量与仪器学报,2017,31(10):1659-1666.
HUANG J, ZHOU X CH, WU T, et al.. Image denoising model of hybrid wiener filtering and improved TV [J]. *Journal of electronic measurement and instrumentation*. 2017, 31(10): 1659-1666. (in Chinese)
- [11] 孙京阳,喻春雨,董仕佳.非局部均值噪声预测的独立成分分析降噪研究[J].光学精密工程,2018,26(2):511-516.
SUN J Y, YU CH Y, DONG SH J. Independent component analysis and noise reduction for non-lo-

- cal mean noise prediction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,26(2):511-516. (in Chinese)
- [12] DANIELYAN A, KATKOVNIK V, EGIAZARIAN K. BM3D frames and variational image deblurring[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(4):1715-1728.
- [13] CHEN G, LUO G, TIAN L, *et al.*. Noise reduction for images with non-uniform noise using adaptive block matching 3D filtering[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2017, 26(6):1227-1232.
- [14] 初广丽,王延杰,邱男,等. 复杂场景中航天器靶标的快速识别[J]. *光学精密工程*,2016,24(4):865-872.
- CHU G L, WANG Y J, DI N, *et al.*. Fast identification of spacecraft target in complex scene [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(4):865-872. (in Chinese)
- [15] 刘智,黄江涛,冯欣. 构建多尺度深度卷积神经网络行为识别模型[J]. *光学精密工程*,2017,25(3):799-805.
- LIU ZH, HUANG J T, FENG X. Construction of multi-scale depth convolution neural network behavior recognition model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(3):799-805. (in Chinese)
- [16] KANDI H, MISHRA D, GORTHI S R K S. Exploring the learning capabilities of convolutional neural networks for robust image watermarking [J]. *Computers & Security*, 2017, 65:247-268.
- [17] CHONG B, ZHU Y K. Speckle reduction in optical coherence tomography images of human finger skin by wavelet modified BM3D filter[J]. *Optics Communications*, 2013, 291(6):461-469.
- [18] ZHANG K, ZUO W, CHEN Y, *et al.*. Beyond a Gaussian denoiser: residual learning of deep CNN for image denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(7):3142-3155.
- [19] 张广斌,束洪春,于继来. 基于 Hough 变换直线检测的行波波头标定[J]. *中国电机工程学报*,2013, 33(19):165-173.
- ZHANG G B, SHU H CH, YU J L. Surge identification for travelling wave based on straight lines detection via Hough transform[J]. *Proceedings of the CSEE*,2013,33(19):165-173. (in Chinese)
- [20] NAVA F A. The intersective Hough transform for geophysical applications[J]. *Geofisica Internacional*, 2014, 53(3):321-332.
- [21] 乔凯,陈健,李中国,等. 锥束 CT 图像中的印刷电路板导线自动检测方法[J]. *光学精密工程*,2016, 24(2):413-421.
- QIAO K, CHEN J, LI ZH G, *et al.*. An automatic detection method for printed circuit board conductors in conebeam CT images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(2):413-421. (in Chinese)

作者简介:



邹永宁(1974—),男,江西乐安人,副研究员,硕士生导师,博士,主要从事CT图像重建、CT体数据可视化、图像并行处理方面的研究。E-mail: zynlxu@sina.com



姚功杰(1995—),男,福建平潭人,硕士研究生,2017年于河南科技大学获得学士学位,主要从事工业CT、图像处理的研究。E-mail: 617823648@qq.com