

# 基于小波变换的发动机表面缺陷 图像去噪方法的研究

肖静<sup>1</sup>, 游世辉<sup>2</sup>

(1.九江学院 机械与材料工程学院, 江西 九江 332005;

2.湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105)

**摘 要:** **目的** 滤除发动机表面缺陷图像上的噪声, 使发动机表面缺陷信息得以更好地呈现。**方法** 首先利用小波变换将发动机表面缺陷含噪图像进行系数分解, 获取不同的小波系数; 接着利用支持向量机对小波分解系数进行分类, 以达到将噪声信号与非噪声信号进行分离的效果; 最后利用插值运算对硬阈值函数进行优化, 以克服函数不连续性引起的振铃效应等弊端, 使得去噪后图像能够保持更多的细节信息。通过实验仿真将所提方法以及中值滤波、双边滤波方法的去噪效果进行对比。**结果** 所提方法去噪后图像与中值滤波以及双边滤波方法去噪后图像相比, 具有更高的 PSNR 值以及 SSIM 值。测试图像噪声强度为 25% 时, 所提方法去噪后图像的 PSNR 值以及 SSIM 值较中值滤波方法去噪分别提高了 20.66% 以及 11.89%, 较双边滤波方法去噪分别提高了 10.30% 以及 5.48%。**结论** 所提方法比中值滤波、双边滤波方法具有更好的去噪效果, 能够对发动机表面缺陷图像的噪声进行去除, 并较好地保留图像的细节信息。

**关键词:** 发动机表面缺陷图像; 图像去噪; 小波变换; 支持向量机; 插值运算

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0328-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.044

## Denoising Method of Engine Surface Defect Image Based on Wavelet Transform

XIAO Jing<sup>1</sup>, YOU Shi-hui<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical & Material Engineering, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China;

2.School of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**ABSTRACT:** The work aims to filter the noise from the engine surface defect image so that the engine surface defect information can be better presented. Firstly, wavelet transform was used to decompose the noise image of engine surface defect to obtain different wavelet coefficients. Then, SVM was used to classify the wavelet decomposition coefficients in order to separate the noise signal from the non-noise signal. Finally, interpolation was used to optimize the hard threshold function to overcome the ringing effect caused by the discontinuity of the function, so that the denoised image could keep more details. The denoising effect of the proposed method was compared with that of the median filter and the bilateral filter through experimental simulation.

收稿日期: 2018-08-01; 修订日期: 2018-10-15

Received: 2018-08-01; Revised: 2018-10-15

基金项目: 江西省科技厅工业支撑项目 (2011BBE50011)

Fund: Supported by Industrial Support Project of Science and Technology Agency of Jiangxi Province (2011BBE50011)

作者简介: 肖静 (1978—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为先进制造技术和智能控制。邮箱: xiaojing181817@163.com

Biography: XIAO Jing (1978—), Male, Master, Lecturer, Research focus: advanced manufacturing technology and intelligent control. E-mail: xiaojing181817@163.com

The image denoised by the proposed method had higher PSNR and SSIM values than that denoised by median filtering and bilateral filtering methods. When the noise of tested image was 25%, the PSNR value and SSIM value of the image denoised by the proposed method increased by 20.66% and 11.89% respectively, compared with that denoised by the median filtering method and increased by 10.30% and 5.48% respectively, compared with that denoised by bilateral filter. Therefore, the proposed method has better denoising effect than the median filter and bilateral filter. It can remove the noise of the engine surface defect image and retain the details of the image better.

**KEY WORDS:** engine surface defect image; image denoising; wavelet transform; support vector machine; interpolation operation

汽车发动机是整车中非常重要的一个部件,其质量的好坏关乎到汽车的生命周期以及驾驶员的安全。由此可见,汽车发动机表面缺陷的检测尤为重要。随着计算机科学技术突飞猛进的发展,汽车发动机表面缺陷的检测已经由原始的人工检测,进步到以计算机图像处理为技术主体的机器视觉检测。较人工检测方法,通过机器视觉方法对发动机表面缺陷进行检测,虽然降低了人工劳动力,提高了检测效率,但是在表面图像的采集过程中,由于设备的完好度、采集环境的适宜度等因素的制约,采集到的发动机表面图像难免会含有一定的噪声<sup>[1-2]</sup>。受到发动机表面图像中噪声的干扰,一些发动机表面缺陷就不能很好地体现,这给发动机表面缺陷的检测造成了非常不利的影响<sup>[3]</sup>。因此,如何将发动机表面缺陷图像中含有的噪声进行有效滤除,成为了一项非常重要而且具有实际意义的研究内容。

专家学者们对发动机的去噪进行了研究。例如,朱敏等人<sup>[4]</sup>对发动机图像中噪声产生的原因进行了分析,明确了发动机图像主要包含的噪声种类,并且将均值滤波、中值滤波、维纳滤波和小波变换滤波的滤波效果进行对比,确定了将维纳滤波用于发动机图像的滤波。虽然维纳滤波原理较为简单,而且具有一定的去噪效果,但维纳滤波的退化模型不具备自适应性,难以适应混合噪声,使得其去噪效果不佳。Florkowski<sup>[5]</sup>利用小波变换的方法对发动机图像进行去噪,但由于该方法不具备较好的连续性,使得去噪图像存在不连续现象。Liu 等人<sup>[6]</sup>利用 Contourlet 变换对图像进行分解,通过邻域收缩法来完成图像去噪,并将该方法用于发动机图像去噪。虽然该方法对发动机图像具有较好的去噪效果,但邻域收缩法去噪的同时,也会将图像的弱边缘信息去除,使得去噪后图像的细节信息有所丢失。

因此,本文在小波变换的基础上,联合利用支持向量机设计了基于小波变换的发动机表面缺陷图像去噪方法。利用支持向量机在小波分解系数的基础上,完成噪声信号与非噪声信号的分类。利用插值运算对硬阈值函数进行改进,通过改进的硬阈值函数对噪声信号进行去除。实验结果显示,本文所提方法在去除发动机表面缺陷图像噪声的同时,还能够较好地保留图像的细节信息。

## 1 相关工作

### 1.1 小波变换

小波变换的实质是将发动机表面缺陷图像在小波域进行分解,从而得到一系列的小波系数。从能量的角度出发可将小波变换所得的小波系数分为两类,一类为纯噪声分布的小波系数,另一类为既含有噪声也含有非噪声分布的小波系数。其中前者的数目较多,并且幅值较小;后者数目较少,幅值较大。根据两类小波系数的分布特征,可通过设置基于阈值的滤波方法,将发动机表面缺陷图像中所含的噪声滤除。

对于含噪发动机表面缺陷图像  $f(t)$ , 其表述如式 (1)<sup>[7]</sup>。

$$f(t) = w(t) + u(t) \quad (1)$$

其中,  $w(t)$  和  $u(t)$  分别表示无噪声信号与噪声信号。

令  $f(t)$  采样后的信号为  $f(n)$ ,  $n=1,2,3,\dots,N$ 。则  $f(n)$  对应的小波变换表达式为式 (2)<sup>[8]</sup>。

$$Xf(t,k) = 2^{-\frac{j}{2}} \sum_{n=1}^N f(n) \varphi(2^{-j} - k) \quad j, k \in Z \quad (2)$$

通过 (2) 式便可得到图像的小波系数  $Xf(t,k)$ 。

利用小波变换对图 1 进行分解后的结果如表 1 所示。从表 1 可见,小波变换对图 1 进行分解后,获得了 12 个纯噪声分布的小波系数及 4 个既含有噪声也含有非噪声分布的小波系数。

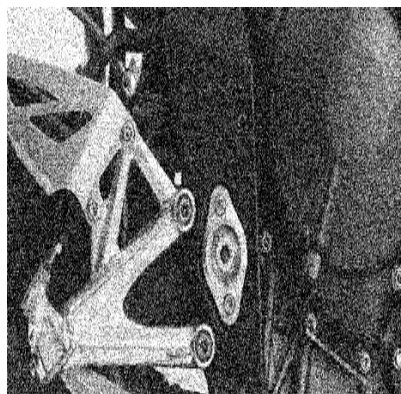


图 1 含噪图

Fig.1 Noisy image

表 1 小波变换结果  
Tab.1 Wavelet transform results

The number of wavelet coefficients for pure noise distribution	The number of wavelet coefficients containing both noise and non noise distributions
12	4

## 1.2 支持向量机

通过小波变换获取小波系数后,需要对小波系数中的像素点与噪声点进行分类,以实现噪声信号与非噪声信号的分离。支持向量机通过一个决策函数以解决一个线性二次规划问题,从而实现对样本的分类,其对非线性以及小样本等问题能够具有良好的解决效果<sup>[9]</sup>。

令  $(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$  为所得小波系数中的像素点,将其作为训练样本。 $y_j \in \{-1, +1\}$  为两个类标识,其中-1 为噪声标识, +1 为非噪声标识。若  $x_j$  线性可分,则有权值  $\varepsilon$  与调节因子  $v$  满足<sup>[10]</sup>式 (3)。

$$y_j(\varepsilon x_j + v) \geq 1 \quad j=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

令最优超平面  $H$  为:

$$\varepsilon x + v = 0 \quad (4)$$

则支持向量机需要寻求参数  $\varepsilon_0$  与  $v_0$ , 使离最优超平面最近的样本点与最优超平面具有最大的距离。

$$p(\varepsilon_0, v_0) = \frac{|\varepsilon_0 x + v_0|}{\|\varepsilon_0\|} \quad (5)$$

此时,  $\varepsilon_0$  的值应满足式 (6) 达到最小化:

$$p(\varepsilon_0, v_0) = \frac{2}{\|\varepsilon_0\|} = \frac{2}{\sqrt{(\varepsilon^T \varepsilon)}} \quad (6)$$

通过拉格朗日乘子  $\eta_i$  可求出  $\varepsilon_0$  与  $v_0$  分别为<sup>[11]</sup>:

$$\varepsilon_0 = \sum_{i=1}^m \eta_i y_i x_i \quad (7)$$

$$v_0 = -\frac{\varepsilon_0}{2} [x_n + x_s]$$

其中,  $x_n$  与  $x_s$  分别为两个类的特征向量<sup>[12]</sup>。

则决策函数可表述为:

$$F(x) = \text{sgn} \left[ \sum_{i=1}^m \eta_i y_i x_i K(x, y) + v_0 \right] \quad (8)$$

其中,  $K(x, y)$  为高斯径向基。

支持向量机对小波系数中像素点与噪声点的分类过程中,首先将像素点  $(x_i, y_i)$  作为输入量,然后通过式 (5)、式 (6) 与式 (7) 求取调节因子,最后将调节因子代入式 (8) 计算决策值  $F(x)$ ,若  $F(x)$  小于 0 则表示该像素点为噪声点。图 2 为支持向量机对含噪小波系数图像的分类结果。从图 2 可见,支持向量机能够较好地对应像中的噪声信息进行分离。



a 含噪小波系数图像



b 分离出的噪声信息

图 2 支持向量机噪声信号分离效果图

Fig.2 Separation effect diagram of support vector machine noise signal: a) Noisy wavelet coefficients; b) Isolated noise information

## 2 本文方法

通过支持向量机将小波系数分类后,需要通过阈值滤波方法对噪声信号进行滤除。常用的阈值滤波方法有硬阈值法与软阈值法。软阈值函数的表达式为<sup>[13]</sup>:

$$W_h = \begin{cases} \text{sgn}(W)(|W| - \delta) & |W| \geq \delta \\ 0 & |W| < \delta \end{cases} \quad (9)$$

硬阈值函数的表达式为:

$$W_h = \begin{cases} W & |W| \geq \delta \\ 0 & |W| < \delta \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $W$  为小波系数,  $\delta$  为阈值。

在整个小波域内,硬阈值函数不具备连续性,使得其去噪后的图像存在不连续效应等。软阈值函数则具有连续性,并且在小波系数大于阈值时,软阈值函数采用了等值减少小波系数的方法,使得图像的细节部分也会对应地减少丢失<sup>[14]</sup>。

对此,本文采用插值运算对硬阈值函数进行改进,以克服硬阈值函数在小波域内不连续的弊端。首先,选取任意两个数值  $\delta_1$  和  $\delta_2$ , 满足  $0 < \delta_1 < \delta < \delta_2$ 。当小波系数  $W$  处于区间  $\delta_1 \leq |W| \leq \delta_2$  时对硬阈值函数进行插值运算。然后,当  $|W| < \delta_1$  时,对小波系数进行取 0 处理。当  $|W| > \delta_2$  时,保留小波系数原值。



最后, 可得插值运算改进后的硬阈值函数为:

$$W_h = \begin{cases} W & |W| > \delta_2 \\ \text{sign}(W)T(|W|) & \delta_1 \leq |W| \leq \delta_2 \\ 0 & |W| < \delta_1 \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $T(x)$  为一个三次的多项式, 由其连续可导的性质可得:

$$\begin{cases} T(\delta_1) = 0 \\ T(\delta_2) = \delta_2 \\ T'(\delta_1) = 0 \\ T'(\delta_2) = 1 \end{cases} \quad (12)$$

因此,  $T(x)$  可表述为:

$$T(x) = \frac{\delta_1 + \delta_2}{(\delta_1 - \delta_2)^3} x^3 - \frac{2\delta_1^2 + 2\delta_1\delta_2 + 2\delta_2^2}{(\delta_1 - \delta_2)^3} x^2 + \frac{\delta_1^3 + \delta_1^2\delta_2 + 4\delta_1\delta_2^2}{(\delta_1 - \delta_2)^3} x - \frac{2\delta_1^2\delta_2^2}{(\delta_1 - \delta_2)^3} \quad (13)$$

从 (11) 式可见, 由于插值运算的优化, 使得小波系数处于较小的值时, 具有良好的平滑性, 使得硬阈值函数保持了连续性。另外, 当  $|W| > \delta$  时, 由于  $\delta_2$  的调节作用, 克服了等值减少小波系数的方法, 使得图像的细节信息得以保留。

采用通用阈值估计法对  $\delta$  进行计算, 表述如下<sup>[15]</sup>:

$$\delta = \beta \sqrt{2 \log(N)} \quad (14)$$

其中,  $\beta$  表示噪声方差,  $N$  表示采样点总数<sup>[16]</sup>。

综上所述, 本文方法的去噪过程为: 首先, 利用小波变换获取小波系数, 并利用支持向量机对小波系数进行分类; 然后, 通过插值运算对硬阈值函数进行改进; 最后, 利用通用阈值估计法获取阈值, 并通过改进的硬

阈值函数滤除发动机表面缺陷图像中所含的噪声。

通过本文所提方法对图 1 进行去噪后的效果图如图 3 所示。从图 3 可见, 本文方法具有良好的去噪效果。



图 3 去噪效果图  
Fig.3 Denoising result

### 3 实验仿真结果与分析

实验以配置 Core i5 2.8 GHz 的 CPU、内存为 8 GB 的 PC 机作为硬件平台, 采用 VC6.0 软件作为仿真环境。利用对比实验法对所提方法的性能进行测试, 将中值滤波方法<sup>[17]</sup>以及双边滤波方法<sup>[18]</sup>作为对照组。实验中, 选取发动机表面凹陷缺陷图像以及发动机表面裂纹缺陷图像作为测试图像。对发动机表面凹陷缺陷图像施加噪声强度为 20% 的椒盐噪声, 对发动机表面裂纹缺陷图施加噪声强度为 10% 的高斯噪声并混合 20% 的椒盐噪声。利用不同去噪方法对施加噪声的图像进行去噪。

不同方法对发动机表面缺陷图像的去噪效果分别如图 4 和图 5 所示。从图 4 可见, 不同方法对发动

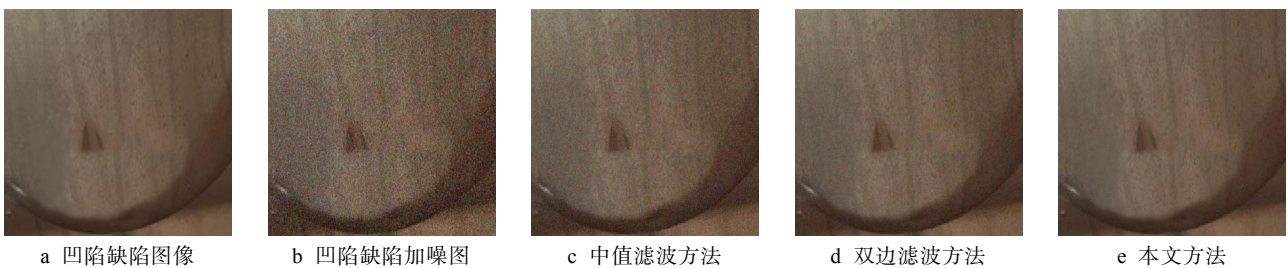


图 4 凹陷缺陷图像去噪效果图

Fig.4 Denoising result of sunken defect image: a) Sunken defect image; b) Sunken defect noise image; c) Median filtering method; d) Bilateral filtering method; e) Method in this paper

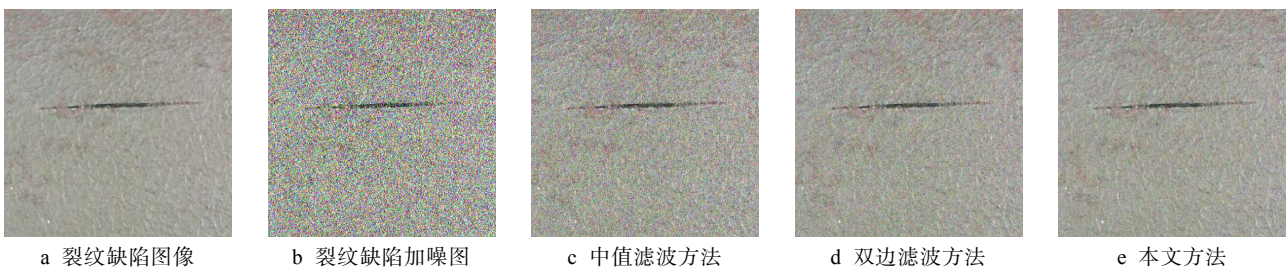


图 5 裂纹缺陷图像去噪效果图

Fig.5 Denoising result of crack defect image: a) Crack defect image; b) Crack defect noise image; c) Median filtering method; d) Bilateral filtering method; e) Method in this paper

机表面凹陷缺陷图像的去噪效果都较好,但是将中值滤波方法(图 4c)、双边滤波方法(图 4d)以及本文方法(图 4e)进行对比可见,本文方法的去噪效果图中残留的噪声最少。

对比图 5 中不同方法的去噪效果图可见,本文方法的去噪效果图中不仅残留噪声最少,而且去噪后图像更为清晰,说明本文去噪方法不仅能够对噪声进行良好地去除,而且还能较好地保留图像的细节信息。

为了更直观地体现所提方法的去噪性能,选取峰值信噪比(Peak signal to noise ratio, PSNR)及结构相似度(Structural similarity index, SSIM)两个指标对不同方法的去噪性能进行测试。PSNR 值代表了去噪后图像质量的好坏,其值越大表示图像质量越好。SSIM 值代表了去噪后图像与原图像的相似度,其值越大表示去噪后图像的相似度越高。测试过程中选取图 4 凹陷缺陷图像作为测试对象,对其施加不同强度的椒盐噪声,然后用不同方法对加噪图像进行去噪,最后通过去噪后图像的 PSNR 值与 SSIM 值体现不同方法的去噪性能。

不同噪声强度下各个方法去噪后图像对应的 PSNR 值与 SSIM 值分别如表 2 所示。通过观察表 2 可见,随着施加噪声强度的不断增加,不同方法去噪后图像的 PSNR 值与 SSIM 值都呈递减趋势。当噪声强度分别为 15%、25%、35%、45%时,本文所提方法去噪后图像的 PSNR 值与 SSIM 值分别为 35.4218 与 0.9146、33.5274 与 0.8835、29.8574 与 0.8092、24.6914 与 0.7447。对比表中数据可见,本文所提方法去噪后图像对应的 PSNR 值与 SSIM 值较对照组方法始终为最大,说明本文所提方法具有良好的去噪

性能,而且去噪后所得图像具有较好的质量与结构相似度。

## 4 结 论

1) 本文在小波变换的基础上设计了一种发动机表面缺陷图像的去噪方法,利用小波变换获取缺陷图像的小波系数。

2) 通过支持向量机对小波系数进行分类,并利用插值运算改进的硬阈值函数对噪声进行滤除。

3) 通过实验仿真将本文所提算法与中值滤波方法以及双边滤波方法进行对比,显示了本文所提方法对发动机表面缺陷图像中的噪声具有良好的滤除性能,去噪后图像具有较高的结构相似度以及较高的峰值信噪比。

## 参考文献:

- [1] XIONG Qing, XU Yan-hai, PENG Yi-qiang. Low-speed rolling bearing fault diagnosis based on EMD denoising and parameter estimate with alpha stable distribution[J]. Journal of mechanical science and technology, 2017, 31(4): 1587-1601.
- [2] HARRISON A P, XU Z, BLUEMKE D A, et al. A multi-channel block-matching denoising algorithm for spectral photon-counting CT images[J]. Medical physics, 2017, 44(10): 5540.
- [3] 郭慧平, 王召巴, 金永. 火箭发动机包覆层表面缺陷检测系统研究[J]. 电子测试, 2011(2): 72-75.  
GUO Hui-ping, WANG Zhao-ba, JIN Yong. Study on detection system for surface defects of rocket motor cladding[J]. Electronic test, 2011(2): 72-75.
- [4] 朱敏, 卢洪义, 文建国. 固体发动机 ICT 断层图像去噪技术[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(1): 1-4.  
ZHU Min, LU Hong-yi, WEN Jian-guo. Solid motor ICT tomography image denoising technology[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(1): 1-4.
- [5] FLORKOWSKI M. Wavelet based partial discharge image de-noising[J]. IET generation transmission & distribution, 2007, 1(2): 340-347.
- [6] LIU Jian, LI Tong, XU Ke. An improved image denoising method based on contourlet transform and NeighShrink algorithm[J]. International journal of computer applications in technology, 2018, 57(2): 94-103.
- [7] YANG Peng, YANG Guo-wei, GAI Shan. Block thresholding image denoising with dual-tree complex wavelet transform[J]. Journal of intelligent & fuzzy systems, 2016, 30(6): 3197-3207.
- [8] GAI Shan, ZHANG Yong, YANG Ci-hui. Color monogenic wavelet transform for multichannel image denois-

表 2 不同方法去噪效果对比  
Tab.2 Comparison of denoising effect by different methods

Noise intensity/%	Method name	Median filtering method	Bilateral filtering method	This paper method
15	PSNR value	29.6317	32.1526	35.4218
	SSIM value	0.8362	0.8724	0.9146
25	PSNR value	27.7863	30.3961	33.5274
	SSIM value	0.7896	0.8351	0.8835
35	PSNR value	25.8325	27.1593	29.8574
	SSIM value	0.7279	0.7852	0.8092
45	PSNR value	20.7539	21.8663	24.6914
	SSIM value	0.6391	0.7063	0.7447

- ing[J]. Multidimensional systems and signal processing, 2017, 28(4): 1463-1480.
- [9] YANG Hong-ying, WANG Xiang-yang, NIU Pan-pan. Image denoising using nonsubsampling shearlet transform and twin support vector machines[J]. Neural networks, 2014, 57(1): 152-165.
- [10] XU Shu-qiong, LIU Zhi, ZHANG Yun. Least squares support vector regression and interval type-2 fuzzy density weight for scene denoising[J]. Soft computing, 2016, 20(4): 1459-1470.
- [11] WANG Xiang-yang, YANG Hong-ying, ZHANG Yu. Image denoising using SVM classification in nonsubsampling contourlet transform domain[J]. Information sciences, 2013, 246(1): 155-176.
- [12] SHAHDOOSTI H R, HAZAVEI S M. Combined ripplelet and total variation image denoising methods using twin support vector machines[J]. Multimedia tools and applications, 2018, 77(6): 7013-7031.
- [13] PANKAJ S, KASHIF K, KHALIL A. Image denoising using local contrast and adaptive mean in wavelet transform domain[J]. International journal of wavelets, multiresolution and information processing, 2014, 12(6): 1450038-1450052.
- [14] ERI M, TSAI D Y, LEE Y. A modified undecimated discrete wavelet transform based approach to mammographic image denoising[J]. Journal of digital imaging, 2013, 26(4): 748-758.
- [15] SILVA R D D, MINETTO R, WILLIAM SCHWARTZ W R. Adaptive edge-preserving image denoising using wavelet transforms[J]. Pattern analysis and applications, 2013, 16(4): 567-580.
- [16] 贾宏斌. 基于小波变换的三维滤波和块匹配算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
- JIA Hong-bin. Research on block-matching and 3D-filtering based on the wavelet transform[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018.
- [17] ASHOK K, KALAISELVI A, VIJAYKUMAR V R. Adaptive impulse detection based selective window median filter for removal of random-valued impulse noise in digital images[J]. Compel international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 2016, 35(5): 1604-1616.
- [18] YAN Qiang, ZHANG Xiao-hui. Image denoising method based on wavelet transform and bilateral filter in vehicle gesture recognition[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(4): 376-380.