

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4785.201211014

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20130515.0942.011.html>

# 复 Contourlet 和各向异性扩散的织物疵点图像降噪

吴一全<sup>1,2,3</sup>, 万红<sup>1</sup>, 叶志龙<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 210016; 2. 东华大学 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620; 3. 浙江理工大学 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 图像降噪是织物疵点自动检测的首要步骤, 其效果直接影响后续的图像分割、特征提取及识别结果。为进一步改善降噪性能, 提出了一种基于复 Contourlet 变换和各向异性扩散的织物疵点图像降噪方法。首先通过复 Contourlet 变换将织物疵点图像分解成低频和高频分量; 然后分别利用 P\_Laplace 算子和 Catte\_PM 模型进行相应的扩散; 最后经复 Contourlet 逆变换重构疵点图像。大量实验结果表明, 与小波阈值收缩和全变差扩散的混合方法、小波与 PM 模型扩散相结合的方法、Contourlet 结合全变差和自适应对比度扩散的方法、非下采样 Contourlet 结合非线性扩散的方法相比, 所提出的方法在主观视觉效果和客观定量评价指标上都有了较大的提高, 更好地保留了织物图像的纹理细节信息, 说明了其降噪能力更强, 能够有效地抑制噪声。

**关键词:** 织物疵点检测; 织物疵点图像; 图像降噪; 复 Contourlet 变换; 各向异性扩散; P\_Laplace 算子; Catte\_PM 模型  
**中图分类号:** TP391.4; TS103.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2013)03-0214-06

中文引用格式: 吴一全, 万红, 叶志龙. 复 Contourlet 和各向异性扩散的织物疵点图像降噪[J]. 智能系统学报, 2013, 8(3): 214-219.

英文引用格式: WU Yiquan, WAN Hong, YE Zhilong. Fabric defect image noise reduction based on complex contourlet transform and anisotropic diffusion[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8(3): 214-219.

## Fabric defect image noise reduction based on complex contourlet transform and anisotropic diffusion

WU Yiquan<sup>1,2,3</sup>, WAN Hong<sup>1</sup>, YE Zhilong<sup>1</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Key Laboratory of Textile Science &amp; Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Image noise reduction has been identified as the first step of automatic fabric defect detection. Its effect has a direct impact on subsequent image segmentation, feature extraction and the final recognition result. To improve the performance of noise reduction, a method of noise reduction for a fabric defect image based on complex contourlet transform and anisotropic diffusion has been proposed. Firstly, a fabric defect image was decomposed into low-frequency and high-frequency components through complex contourlet transform. Next, a P\_Laplace operator and Catte\_PM model were used to diffuse low-frequency and high-frequency components, respectively. Finally, the defect image was reconstructed by inverse complex contourlet transform. A large number of experimental results indicate that, compared with the hybrid method of wavelet threshold shrinkage with total variation diffusion, the method combining the wavelet with PM model diffusion, the method combining contourlet with total variation and adaptive contrast diffusion, and the method combining nonsubsampling contourlet with nonlinear diffusion, the proposed method has great improvement in both subjective visual effect and objective quantitative evaluation indicators, which can preserve the texture and details of fabric image better. The proposed method has stronger noise reduction capabilities and can suppress noise effectively.

**Keywords:** fabric defect detection; fabric defect image; image noise reduction; complex contourlet transform; anisotropic diffusion; P\_Laplace operator; Catte\_PM model

织物疵点是纺织品生产过程中影响产品质量的

重要因素之一。传统的人工检测方法速度慢, 劳动强度大, 易造成误检和漏检。基于图像处理技术的自动检测系统可以极大地提高织物疵点的检测效率和精度, 减少人为因素制约, 大大提高了纺织品生产流程中的自动化程度。织物疵点图像获取和传输过程中常受到高斯噪声和微量椒盐噪声的污染<sup>[1]</sup>, 致使图

收稿日期: 2012-11-08. 网络出版日期: 2013-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872065); 纺织面料技术教育部重点实验室开放基金资助项目(P1111); 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室开放课题基金资助项目(2010001); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

通信作者: 吴一全. E-mail: [nuaimage@163.com](mailto:nuaimage@163.com).

像信噪比下降,一些疵点特征细节淹没于噪声中,影响后续特征提取的有效性和疵点分类的正确性.对疵点图像进行降噪预处理就成了织物疵点自动检测的重要环节<sup>[2-3]</sup>.传统的织物疵点图像降噪方法主要有均值滤波、中值滤波和维纳滤波.它们在去除噪声的同时,容易模糊图像的边缘细节<sup>[1]</sup>,势必造成后续疵点类型的误判.近年来,随着小波和多尺度几何分析的发展,基于小波<sup>[4-5]</sup>、Contourlet<sup>[6]</sup>、非下采样 Contourlet (nonsampled contourlet transform, NSCT)<sup>[7]</sup>等更为有效的图像降噪方法相继出现.小波变换具有低熵性、多分辨率、去相关性和选基灵活性等特点,但方向性有限,不能有效表示线、面奇异性,无法捕捉图像的轮廓信息.而 Contourlet 变换具有时频局部性、方向性和各向异性,能很好地表示图像的边缘信息,但缺乏平移不变性,冗余度高.NSCT 具备多尺度多方向性和平移不变性,但分解中采用的非下采样金字塔对图像中细节信息捕捉能力较差.而近年来提出的复 Contourlet<sup>[8]</sup>则同时关注了幅值和相位信息,具有近似的平移不变性和时频局部特性,且冗余度较低.

另一方面,人们将异质扩散和迭代平滑引入图像处理中,得到基于各向异性扩散的图像降噪方法<sup>[9]</sup>.每个方向扩散的速度和程度不同,由此实现各向异性,但各向异性扩散对细节纹理信息保留得不够.若将其与小波、Contourlet 等多尺度变换相结合,会比直接在空域上进行各向异性扩散降噪更为有效,边缘信息保持得更好.吴亚东等<sup>[10]</sup>提出的二维小波阈值收缩和全变差(total variation, TV)扩散的混合方法说明了两者的结合可取得更好的降噪效果.类似的方法还有小波与 PM (Perona-Malik) 扩散相结合的方法<sup>[11]</sup>、NSCT 变换结合非线性扩散的方法<sup>[12]</sup>,但因这些方法只对高频分量或低频分量其中的一个进行非线性扩散,降噪不够充分. Contourlet 结合全变差和自适应对比度扩散的方法<sup>[13]</sup>对此做出了改进,低频和高频分量分别采用 TV 扩散和 PM 模型的自适应对比度扩散,实验结果优于此前的方法.然而,TV 模型会将图像平滑的区域处理为分段区域,产生阶梯效应,而 P\_Laplace 算子具有 2 个方向,可以减小阶梯效应<sup>[14]</sup>.经 PM 模型扩散处理后的图像可能存在阶梯效应,不适用于强噪声环境,而 Catte\_PM 模型针对这一点进行了改进,尤其适合于受高斯噪声污染的图像.

根据上述分析,如果将复 Contourlet 变换和 P\_Laplace 算子、Catte\_PM 模型相结合,那么有望取得更好的降噪效果.因此本文提出了一种基于复 Cont-

ourlet 变换和各向异性扩散的织物疵点图像降噪方法.首先对织物疵点图像进行复 Contourlet 分解,得到图像的低频分量和高频分量;然后对低频分量采用 P\_Laplace 算子扩散,高频分量则依据 Catte\_PM 模型扩散;最后通过复 Contourlet 逆变换重构,得到降噪后的疵点图像.文中给出了实验结果,并与其他相关方法做了比较,依据主观视觉效果和客观定量指标对图像降噪效果进行了评价.

## 1 复 Contourlet 变换和各向异性扩散的织物疵点图像降噪方法

### 1.1 复 Contourlet 变换

复 Contourlet 变换<sup>[15]</sup>由多分辨率分解和方向分析 2 部分构成.前者采用双树复小波的形式,通过作用于图像行、列上的 2 棵离散小波树实现实部和虚部运算,每一级分解得到 2 个低频子带和 6 个对应不同方向( $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 75^\circ$ )的高频子带.后者通过在每个高频子带上级联方向滤波器组,使其对应更多的方向,以进一步提高方向分辨率,更灵活地表现图像中的细节部分.复 Contourlet 变换具有近似的平移不变性,可在图像分解和重构的过程中保证精度,更好地保留边缘和纹理等图像细节信息.

### 1.2 P\_Laplace 算子

设  $I$  为含噪图像,P\_Laplace 算子定义为<sup>[16]</sup>

$$\Delta_p I = \nabla \cdot (|\nabla I|^{p-2} \nabla I), 1 < p < \infty. \quad (1)$$

式中: $p$  表示扩散因子, $\nabla I$  表示像素点的梯度.采用 P\_Laplace 算子进行图像降噪可以归结为求如下能量方程的最小值问题:

$$E(I) = \frac{1}{p} \int_{\Omega} |\nabla I|^p dx dy + \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} |I - R I_0|^2 dx dy.$$

式中: $E(I)$  表示  $I$  的能量; $\Omega$  为图像区域; $\lambda$  为 Lagrange 常数,控制噪声对图像的影响程度; $R$  为退化算子,对图像有模糊作用; $I_0$  表示  $I$  的初值.

选取正交坐标集 $(\xi, \eta)$ , $\eta$  轴平行于像素点处的梯度方向, $\xi$  轴正交于该梯度方向,即为:

$$\xi = \frac{(-I_y, I_x)}{|\nabla I|} = \frac{\nabla^\perp I}{|\nabla I|}, \eta = \frac{(I_x, I_y)}{|\nabla I|} = \frac{\nabla I}{|\nabla I|}.$$

由此,式(1)可以改写为

$$\Delta_p I = |\nabla I|^{p-2} I_{\xi\xi} + (p-1) |\nabla I|^{p-2} I_{\eta\eta}. \quad (2)$$

扩散效果取决于 $|\nabla I|^{p-2}$ 和 $(p-1) |\nabla I|^{p-2}$ .当 $p=1$ 时,式(2)即为 TV 模型扩散方程.由于只对正交于 $\nabla I$ 的方向有扩散效果,TV 模型会将图像平滑的区域处理为分段区域,产生阶梯效应.而 $p$ 为其他值时,P\_Laplace 算子具有 2 个方向,可减小阶梯效应,较好地保留图像边缘信息<sup>[17]</sup>.

### 1.3 Catte\_PM 模型

作为一种改进的 PM 模型, Catte\_PM 模型可以有效地去除图像中存在的高斯噪声<sup>[18]</sup>. 将经过高斯平滑的梯度模代替原始图像的梯度模, 便于控制扩散的过程, 能更准确地反映图像边缘的变化. Catte\_PM 模型为:

$$\begin{cases} \frac{\partial I}{\partial t} = \text{div}[c(\|\nabla(G_\sigma * I)\|) \cdot \nabla I], \\ I|_{t=0} = I_0. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\text{div}$  为散度算子,  $G_\sigma(x) = C\sigma^{-1/2}\exp(-x^2/4\sigma)$  是均值为 0、方差为  $\sigma$  的高斯函数,  $*$  表示卷积,  $I_0$  为初始含噪图像,  $I$  为  $t$  时刻的平滑图像. 取扩散方程:

$$c(\|\nabla(G_\sigma * I)\|) = \frac{1}{1 + (\|\nabla(G_\sigma * I)\|/k)^2},$$

当  $\|\nabla(G_\sigma * I)\|$  远大于对比度因子  $k$  时,  $c(\|\nabla(G_\sigma * I)\|)$  趋近于 0, 扩散被抑制; 反之, 扩散被加强.

假设  $c(\|\nabla(G_\sigma * I)\|)$  在  $p$  点和  $q$  点  $t$  时刻的值分别为  $\alpha_p^t$  和  $\alpha_q^t$ , 则 Catte\_PM 模型的离散表达式为

$$I_p^{t+1} = I_p^t + \lambda \sum_{q \in \eta_p} (\alpha_p^t + \alpha_q^t) \nabla I_{p,q}^t.$$

式中:  $I_p^t$  和  $I_p^{t+1}$  分别表示  $t$  时刻和  $t+1$  时刻图像的离散采样,  $\lambda$  为控制扩散总体强度的常数,  $p$  表示像素点的坐标,  $\eta_p$  表示像素  $p$  的邻域空间, 梯度值  $\nabla I_{p,q}^t = I_p^t - I_q^t$ .

### 1.4 复 Contourlet 变换域各向异性扩散降噪方法

1) 含噪疵点图像的复 Contourlet 分解. 对含噪织物疵点图像进行单层双树复小波分解, 选择“biort\_b”和“qshift\_b”滤波器, 对得到的 6 个双树高频分量用方向滤波器组进行分解, 选择“pkva”滤波器.

2) 图像低频分量扩散. 复 Contourlet 分解后, 低频分量中主要是近似信号, 细节和噪声大部分在高频分量中. 低频分量采用特征保持较好的 P\_Laplace 算子进行扩散. 式(2)即为所用的扩散方程, 其中取  $p = 1 + \frac{\kappa}{\kappa + |\nabla I|}$ ,  $\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla I}{|\nabla I|}$  表示图像各像素点的曲率, 它取决于图像自身的几何信息.

3) 图像高频分量扩散. 采用式(3)所示的扩散方程, 对高频分量进行 Catte\_PM 模型扩散. 要进行有效的各向异性扩散. 关键是选择适当的扩散系数, 而  $c(\|\nabla(G_\sigma * I)\|) = \frac{1}{1 + (\|\nabla(G_\sigma * I)\|/k)^2}$  特别适合于高对比度的边缘. 对分解后的带通部分进行  $n$  次扩散. 根据稳健对比度理论<sup>[19]</sup>,  $k$  的取值为

$$k = \frac{1}{0.6745} m_l [\|\nabla I - m_l(\|\nabla I\|)\|].$$

式中:  $m_l$  为中值算子.

4) 降噪后疵点图像的重构. 将步骤 2)、步骤 3) 的处理结果综合, 对降噪后的低频和低频分量进行复 Contourlet 逆变换, 重构图像信号, 得到降噪后的疵点图像.

复 Contourlet 变换域各向异性扩散降噪方法的流程图如图 1 所示.

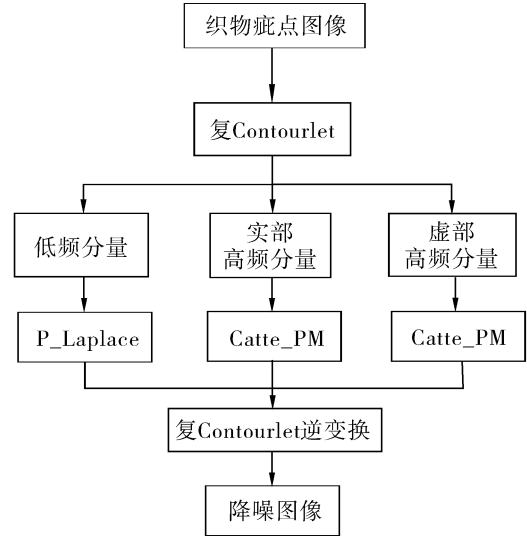


图 1 复 Contourlet 域各向异性扩散图像降噪方法

Fig.1 Flowchart of the image noise reduction method by anisotropic diffusion in complex contourlet domain

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验配置

针对多幅织物疵点图像, 采用本文提出的基于复 Contourlet 变换和各向异性扩散的图像降噪方法, 进行了大量实验. 并与近年来提出的小波阈值收缩和全变差扩散的混合方法 (wavelet threshold shrinkage with total variation diffusion, WSTV)<sup>[10]</sup>、小波与 PM 模型扩散相结合的方法 (wavelet with PM model, WPM)<sup>[11]</sup>、Contourlet 结合全变差和自适应对比度扩散的方法<sup>[13]</sup>、NSCT 结合非线性扩散的方法<sup>[12]</sup>进行了比较. 图像降噪效果的评价标准包括主观视觉效果和峰值信噪比 (PSNR)、均方误差 (MSE) 以及降噪后图像与原始图像之间的相关系数 ( $R$ ) 3 个客观定量指标. 实验环境为 Intel (R) Core (TM) 2、1.80 GHz、3GB 内存、MATLAB R2007b. 对比实验中的参数设置如下: WSTV 方法进行 1 层 Haar 小波分解, 采用阈值  $T = \sigma \sqrt{2 \log N}$  实现高频分量的小波收缩, 其中  $N$  代表图像中像素个数,  $\sigma$  代表噪声方差, 一般取  $\sigma \approx q/0.6745$ ,  $q$  为小波系数中值; 低频分量采用 TV 扩散模型, 时间和空间步长分别取 0.2 和



1,如果相邻迭代的图像均方误差小于0.1,则扩散终止.WPM方法采用与WSTV方法相同的小波分解,高频分量依据PM模型扩散,扩散步长为1/7,低频分量不做处理.Contourlet结合全变差和自适应对比度扩散的方法先经过Contourlet分解,低频分量按照TV模型扩散,参数选取与WSTV方法相同;高频分量采用自适应对比度扩散,扩散步长为1/7,迭代次数取30.NSCT结合非线性扩散的方法利用NSCT分解,对得到的低频分量用P\_Laplace扩散,迭代步长为0.1,高频分量不做处理.

## 2.2 主观评价实验

为了说明本文提出的方法在降噪的同时可以很好地保持图像纹理和细节信息,现以2幅织物疵点图像为例加以说明.图2和图3给出了原始图像、含噪图像、利用小波阈值收缩和全变差扩散的混合方法(WSTV)<sup>[10]</sup>、小波与PM模型扩散相结合的方法(WPM)<sup>[11]</sup>、Contourlet结合全变差和自适应对比度扩散的方法<sup>[13]</sup>、NSCT结合非线性扩散的方法<sup>[12]</sup>以及本文方法所得到的降噪图像.

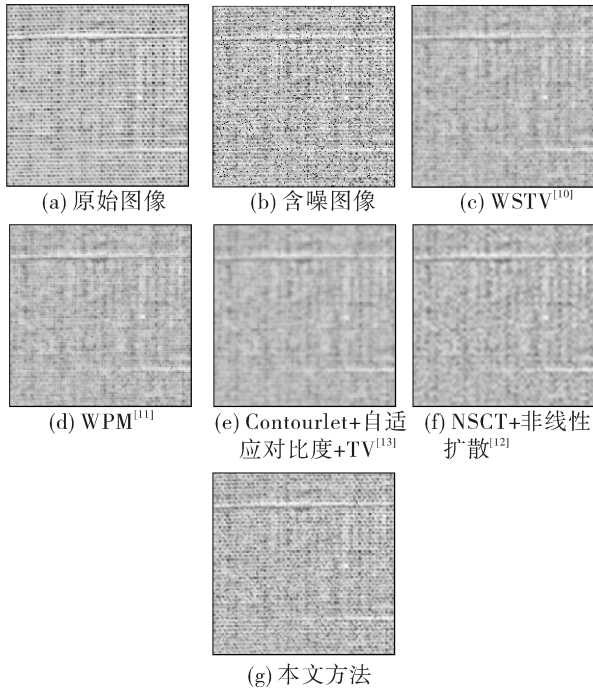


图2 织物断纬疵点的降噪

Fig.2 Noise reduction of fabric weft lacking defects

图2(b)中可以看出,织物疵点图像明显受到高斯噪声和少量椒盐噪声的污染,疵点模糊不清.图3(b)受到高斯噪声污染,噪声均值为0、方差为0.01.从主观视觉效果上来看,由图3可见,本文方法能有效去除噪声,细节方面保持得比较好,可以比较清楚

地看出织物的纹理.而其他4种方法均在降噪的同时,在一定程度上平滑了织物的纹理,模糊了图像细节,尤其是通过NSCT结合非线性扩散的方法处理后,纹理看得不太清楚,疵点部分也较为模糊,难以分辨.大量的实验图像证明了本文方法对于不同的织物疵点图像都有很好的降噪效果.

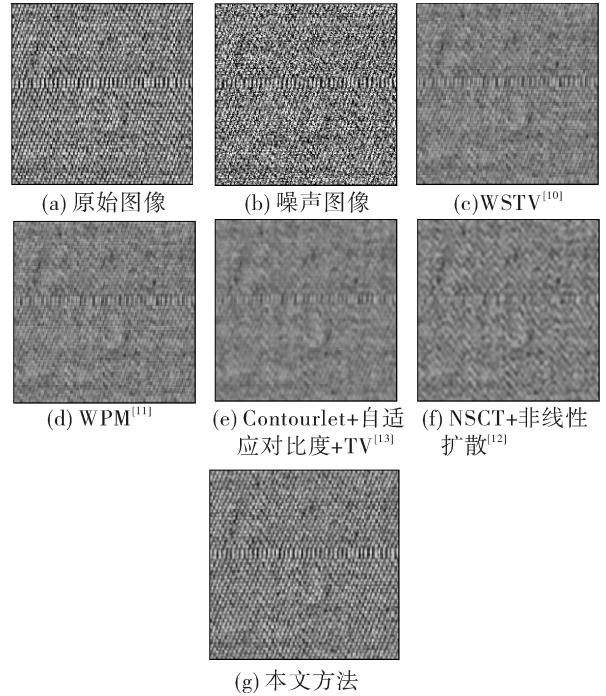


图3 织物双纬疵点的降噪

Fig.3 Noise reduction of fabric double weft defects

## 2.3 客观评价实验

引入峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)、降噪后图像与原始图像之间的相关系数( $R$ ),相应的计算公式分别为:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{(255)^2}{\text{MSE}},$$

$$\text{MSE} = \frac{1}{M_1 \times M_2} \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} (\hat{f}(i,j) - f(i,j))^2,$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} (f(i,j) - \bar{f}(i,j))(\hat{f}(i,j) - \bar{\hat{f}}(i,j))}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} (f(i,j) - \bar{f}(i,j))^2 \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} (\hat{f}(i,j) - \bar{\hat{f}}(i,j))^2}}$$

式中: $M_1 \times M_2$ 为图像像素数, $f(i,j)$ 和 $\bar{f}(i,j)$ 为实际降噪图像及其均值图像, $\hat{f}(i,j)$ 和 $\bar{\hat{f}}(i,j)$ 为原始图像及其均值图像.5种降噪方法的峰值信噪比、均方误差、降噪后图像与原始图像之间的相关系数及运行时间如表1所示.

表 1 5 种降噪方法的定量评价指标比较

Table 1 Comparison of the five noise reduction methods in quantitative evaluation indicators

降噪方法	PSNR/dB	MSE	R	t/s
含噪图像	71.16	0.005 0	0.860 8	—
本文方法	78.88	0.000 8	0.970 4	0.945 9
WSTV <sup>[10]</sup>	73.77	0.002 7	0.919 3	0.104 2
WPM <sup>[11]</sup>	73.75	0.002 7	0.918 4	0.567 2
Contourlet	75.47	0.001 9	0.955 3	0.391 9
结合扩散 <sup>[13]</sup>				
NSCT	74.63	0.002 3	0.929 9	3.615 1
结合扩散 <sup>[12]</sup>				

可以看出,本文方法获得了最高的 PSNR 值和最小的 MSE 值,PSNR 比其他 4 种方法均高出 2~5 dB;同时,得到的 R 值最接近于 1,表示降噪后的图像与原始图像最为相似.由此证明图像经过复 Contourlet 变换后,低频分量使用的 P\_Laplace 算子能很好地保留织物的纹理细节部分,高频分量采用的 Catte\_PM 扩散模型能有效地去除大部分的噪声.此外,运行时间方面,WSTV 方法、WPM 方法、Contourlet 结合全变差和自适应对比度扩散的方法、NSCT 结合非线性扩散的方法所需运行时间分别为 0.104 2 s、0.567 2 s、0.391 9 s 和 3.615 1 s,其中 NSCT 的运行时间过长,效率较低,不能用于实时处理.而本文方法的运行时间比 WSTV 方法、WPM 方法、Contourlet 结合全变差和自适应对比度扩散的方法略长,但工程应用中可将高低频并行处理,提高运算效率.

### 3 结束语

本文提出了一种基于复 Contourlet 变换和各向异性扩散的织物疵点图像降噪方法.对织物疵点图像经复 Contourlet 分解后的低频和高频分量分别采用 P\_Laplace 和 Catte\_PM 模型进行扩散,实现了更为有效的疵点图像降噪.针对所提出的方法进行了大量实验,并与近年提出的小波阈值收缩和全变差扩散的混合方法(WSTV)、小波与 PM 模型相结合的方法(WPM)、Contourlet 结合全变差和自适应对比度扩散的方法、NSCT 结合非线性扩散的方法做了比较.结果表明,在主观视觉和客观定量评价指标 2 个方面,本文方法可更有效地抑制噪声,同时能更完整地保留织物图像的纹理细节.本文方法在织物疵点自动检测系统中实际应用效果极佳.

### 参考文献:

- [1] 刘建立,左保齐.织物疵点图像消噪方法的比较[J].纺织学报, 2007, 28(11): 128-131.
- [2] LIU Jianli, ZUO Baoqi. Comparison of denoising methods used in fabric defects image[J]. Journal of Textile Research, 2007, 28(11): 128-131.
- [3] SHU Guangliu, PING Gequ. Inspection of fabric detection based on wavelet analysis and BP neural network[C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Hong Kong, China, 2008: 232-236.
- [4] KUMAR A. Computer-vision-based fabric defect detection: a survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 348-363.
- [5] 郭晓霞,杨慧中.小波去噪中软硬阈值的一种改良折衷法[J].智能系统学报, 2008, 3(3): 222-225.
- [6] GUO Xiaoxia, YANG Huizhong. An improved compromise for soft/hard thresholds in wavelet denoising[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2008, 3(3): 222-225.
- [7] BORSODORF A, RAUPACH R, FLOHR T, et al. Wavelet based reduction in CT-images using correlation analysis[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2008, 27(12): 1685-1703.
- [8] 杨帆,赵瑞珍,胡绍海.基于 Contourlet 系数相关特性的自适应图像降噪算法[J].光学学报, 2009, 29(2): 357-361.
- [9] YANG Fan, ZHAO Ruizhen, HU Shaohai. Adaptive algorithm for image denoising based on correlation properties of contourlet coefficients[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 357-361.
- [10] CUNHA A L, ZHOU J, DO M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and application[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [11] SHAO Weidai, YAN Kuisun, XIAO Lintian, et al. Image denoising based on complex contourlet transform[C]//Proceedings of the 2007 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Beijing, China, 2007: 1742-1747.
- [12] 余锦华,汪源源.基于各向异性扩散的图像降噪算法综述[J].电子测量与仪器学报, 2011, 25(2): 105-116.
- [13] YU Jinhua, WANG Yuanyuan. Image noise reduction based on anisotropic diffusion: a survey[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(2): 105-116.
- [14] 吴亚东,孙世新.基于二维小波收缩与非线性扩散的混合图像降噪算法[J].电子学报, 2006, 34(1): 163-166.
- [15] WU Yadong, SUN Shixin. A new hybrid image de-noising algorithm based on 2D wavelet shrinkage and nonlinear diffusion[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(1): 163-166.
- [16] YONG Yue, CROITORU M M, BIDANI A, et al. Nonlinear multiscale wavelet diffusion for speckle suppression and

- edge enhancement in ultrasound images[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2006, 25(3): 297-311.
- [12] 陈建军, 田逢春, 邱宇, 等. 基于非下采样 Contourlet 和扩散的图像降噪[J]. 计算机工程, 2010, 36(14): 185-189.
- CHEN Jianjun, TIAN Fengchun, QIU Yu, et al. Image denoising based on nonsubsampling contourlet and diffusion [J]. Computer Engineering, 2010, 36(14): 185-189.
- [13] 吴一全, 侯雯, 吴诗娅. 基于 Contourlet 域非线性扩散的织物疵点图像降噪[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(8): 665-670.
- WU Yiquan, HOU Wen, WU Shihua. Fabric defect image denoising based on contourlet transform and nonlinear diffusion[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(8): 665-670.
- [14] 陈建军, 田逢春, 李灿. 基于 NSCT 阈值和自适应扩散的图像降噪[J]. 计算机工程, 2011, 37(12): 204-205.
- CHEN Jianjun, TIAN Fengchun, LI Can. Image denoising based on NSCT threshold and adaptive diffusion[J]. Computer Engineering, 2011, 37(12): 204-205.
- [15] 吴一全, 纪守新, 尹丹艳. 基于 NMF、ICA 和复 Contourlet 变换的红外小目标检测[J]. 宇航学报, 2011, 32(8): 1833-1839.
- WU Yiquan, JI Shouxin, YIN Danyan. Infrared small target detection based on NMF, ICA and complex contourlet transform[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(8): 1833-1839.
- [16] ZHANG Hongying, PENG Qicong, WU Yangdong. Wavelet inpainting based on P\_Laplace operator[J]. Aata Automatica Sinica, 2007, 33(5): 546-549.
- [17] CHEN Jianjun, GUO Jing. Image restoration based on adaptive P\_Laplace diffusion[C]//2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing. Yantai, China, 2010: 143-146.
- [18] CATTE F, LIONS P, MOREL J, et al. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1992, 29(2): 182-193.
- [19] 白俊奇, 陈钱. 基于各向异性扩散的红外图像噪声滤波算法[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 866-869.
- BAI Junqi, CHEN Qian. Algorithm for infrared image noise filtering based on anisotropic diffusion[J]. Aata Optica Sinica, 2008, 28(5): 866-869.

#### 作者简介:



吴一全,男,1963年生,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为图像处理与分析、目标检测与识别、智能信息处理等,发表学术论文200余篇。



万红,女,1989年生,硕士研究生,主要研究方向为纺织品疵点检测、图像处理与分析。



叶志龙,男,1988年,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与视频通信。