



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
01
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像模糊测量 P20



第20卷第1期（总第225期）

2015年1月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

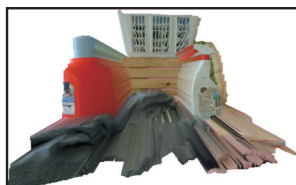
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

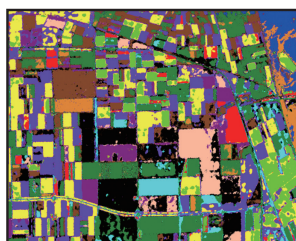
国内定价 50.00元



结合同场景立体图对的高质量深度图像重建(第0001页)



全局和局部结构内容自适应正则化的单幅图像超分辨模型(第0011页)



极化SAR相干斑抑制的非局部加权最小均方误差滤波算法(第0140页)

图像处理和编码

结合同场景立体图对的高质量深度图像重建

杨宇翔, 高明煜, 尹克, 吴占雄 0001

全局和局部结构内容自适应正则化的单幅图像超分辨模型

唐松泽, 肖亮, 黄伟, 刘鹏飞 0011

基于BP神经网络的图像局部模糊测量

黄善春, 方贤勇, 周健, 沈峰 0020

基于投影轮廓的文本图像倾斜检测

程立, 姚为, 李波 0029

图像分析和识别

稀疏表示和贪婪搜索的人脸分类

刘梓, 宋晓宁, 唐振民 0039

分块LBP的素描人脸识别

周汐, 曹林 0050

随机场中运动一致性的多线索目标跟踪

陈晨树, 张骏, 谢昭, 高隼 0059

融合背景权重直方图的目标跟踪

田浩, 巨永锋, 孟凡琨, 李涪帆 0072

英文字母特征的双面碎纸拼接

周一凡, 王松静, 黄永斌 0085

图像理解和计算机视觉

融合特征的快速SURF配准算法

罗天健, 刘秉瀚 0095

垂直交叉双向搜索策略的自适应窗口匹配算法

符立梅, 彭国华 0104

针对重复模式图像的成对特征点匹配

罗楠, 孙权森, 陈强, 纪则轩, 夏德深 0113

医学图像处理

量子衍生PDE医学超声图像去斑

付晓薇, 王奕, 陈黎, 田菁 0125

遥感图像处理

PCA与移动窗小波变换的高光谱决策融合分类

叶珍, 何明一 0132

极化SAR相干斑抑制的非局部加权最小均方误差滤波算法

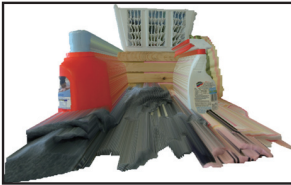
马晓双, 沈焕锋, 杨杰, 张良培 0140

数据筛选的低频UWB SAR图像快速可视化

李超, 李悦丽, 安道祥, 王广学 0151

CONTENTS

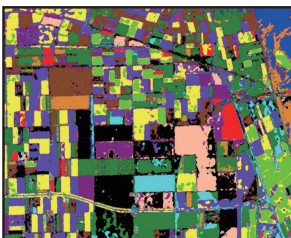
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



High-quality depth map reconstruction combining stereo image pair(P0001)



Global and local structural content adaptive regularization model for single image super-resolution(P0011)



PCA and windowed wavelet transform for hyperspectral decision fusion classification (P0140)

Image Processing and Coding

- High-quality depth map reconstruction combining stereo image pair
Yang Yuxiang, Gao Mingyu, Yin Ke, Wu Zhanxiong 0001
- Global and local structural content adaptive regularization model for single image super-resolution
Tang Songze, Xiao Liang, Huang Wei, Liu Pengfei 0011
- Image local blur measurement based on BP neural network
Huang Shanchun, Fang Xianrong, Zhou Jian, Shen Feng 0020
- Improved projection profile based algorithm for skew detecting in document images
Cheng Li, Yao Wei, Li Bo 0029

Image Analysis and Recognition

- Sparse representation based face recognition classification algorithm using greedy search strategy
Liu Zi, Song Xiaoning, Tang Zhenmin 0039
- The sketch face recognition combining with AdaBoost and blocking LBP
Zhou Xi, Cao Lin 0050
- Multi-cues object tracking based on motion consistence in random field
Chen Chenshu, Zhang Jun, Xie Zhao, Gao Jun 0059
- Improved tracking algorithm with background-weighted histogram
Tian Hao, Ju Yongfeng, Meng Fankun, Li Fufan 0072
- Double-sided shreds restoration based on English letters feature
Zhou Yifan, Wang Songjing, Huang Yongbin 0085

Image Understanding and Computer Vision

- Fast SURF key-points image registration algorithm by fusion features
Luo Tianjian, Liu Binghan 0095
- Cross-based bidirectional adaptive window for stereo matching
Fu Limei, Peng Guohua 0104
- Pair-wise feature points based matching algorithm for repetitive patterns images
Luo Nan, Sun Quansen, Chen Qiang, Ji Zexuan, Xia Deshen 0113

Medical Image Processing

- Quantum-inspired partial differential equation-based medical ultrasound image despeckling method
Fu Xiaowei, Wang Yi, Chen Li, Tian Jing 0125

Remote Sensing Image Processing

- PCA and windowed wavelet transform for hyperspectral decision fusion classification
Ye Zhen, He Mingyi 0132
- Polarimetric SAR speckle filtering using a nonlocal weighted minimum mean squared error filter
Ma Xiaoshuang, Shen Huanfeng, Yang Jie, Zhang Liangpei 0140
- Fast visualization method for UWB SAR images based on 3σ measurement
Li Chao, Li Yueli, An Daoxiang, Wang Guangxue 0151

中图法分类号: TP391.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)01-0125-07

论文引用格式: Fu X W, Wang Y, Chen L, Tian J. Quantum-inspired partial differential equation-based medical ultrasound image despeckling method [J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(1): 0125-0131. [付晓薇, 王奕, 陈黎, 田菁. 量子衍生 PDE 医学超声图像去斑[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(1): 0125-0131.] [DOI:10.11834/jig.20150113]

量子衍生 PDE 医学超声图像去斑

付晓薇, 王奕, 陈黎, 田菁

武汉科技大学计算机科学与技术学院智能信息处理与实时工业系统湖北省重点实验室, 武汉 430065

摘要: **目的** 医学超声图像常常受到斑点噪声的污染而导致质量降低, 影响后续诊疗。为了解决医学超声图像在滤波去斑的同时保持图像边缘细节和结构特征的问题, 借鉴量子力学的基础理论, 提出一种量子衍生偏微分方程(PDE)医学超声图像去斑方法。**方法** 针对传统 P-M 方程各向异性扩散的自适应去斑能力有限的问题, 引入量子理论改进扩散系数增强去斑算法的自适应能力。同时构造出各向异性扩散模型, 提出一种量子衍生的偏微分方程医学超声图像去斑方法。**结果** 通过对模拟斑点噪声污染的图像和真实医学超声图像实验, 比较信噪比(SNR)、边缘保持度、结构相似度(SSIM)等客观评价指标, 本文方法较其他图像去斑方法更能有效去除斑点噪声, 同时又能较好地保持图像边缘细节与结构特征。**结论** 本文方法能够有效地解决医学超声图像去斑中保持图像细节特征的问题, 同时, 量子理论的引入也为后续医学超声图像的研究提供了新思路。

关键词: 量子衍生; 偏微分方程(PDE); 医学超声图像; 去斑

Quantum-inspired partial differential equation-based medical ultrasound image despeckling method

Fu Xiaowei, Wang Yi, Chen Li, Tian Jing

College of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Hubei Province Key Laboratory of Intelligent Information Processing and Real-time Industrial System, Wuhan 430065, China

Abstract: **Objective** Ultrasonography is one of the most important modalities of medical imaging system, and medical ultrasound images play a significant role in medical imaging techniques. However, medical ultrasound images are always contaminated by a noise called "speck noise", which has a visual effect similar to speck, instead of the point-like Gaussian white noise. Speck noise seriously degrades the quality of medical ultrasound images. Thus, in a contaminated medical ultrasound image, the observer has difficulty discriminating the fine details and structural features, hindering the application of ultrasound images in clinical diagnosis and treatment. In this paper, the quantum-inspired diffusion coefficient is introduced to discuss the challenge of despeckling while preserving the edge detail and structural features of ultrasound images.

Method The proposed method improves the diffusion coefficient in traditional P-M equations based on the denoising method by some foundational knowledge in quantum theory. Anisotropic diffusion model is built on the basis of the traditional P-M equations. The proposed quantum-inspired diffusion coefficient changes over the gradient direction to take advantage of the better directional selectivity of wavelet coefficients. The optimization of this coefficient can be strengthened by the improved anisotropic diffusion model. Thus, a novel quantum-inspired partial differential equation based on medical ultrasound image

收稿日期: 2014-07-09; 修回日期: 2014-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61201423, 61375017, 61105010); 湖北省重点实验室开放基金子项目(znss2013B016)

第一作者简介: 付晓薇(1977—), 女, 副教授, 2010年于华中科技大学获博士学位, 主要研究方向为图像处理、量子信号处理、目标识别与跟踪等。E-mail: fwx_wh0409@wust.edu.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61201423, 61375017, 61105010)

despeckling method is proposed. **Result** Experiments are conducted on both images with simulation speck noise and real medical ultrasound images to show the performance of the proposed method in comparison with other classic despeckling methods. Among all compared methods, the proposed method obtains the best objective evaluation, such as signal-to-noise ratio, edge preserve measurement, structural similarity index measurement, and equivalent number of looks. Experimental results of both images with simulation speck noise and real medical ultrasound images can demonstrate that the proposed method efficiently reduces the speck noise and maintains the edge, detail, and structure of the images. **Conclusion** An effective despeckling method inspired by quantum theory and based on partial differential equations is proposed for medical ultrasound image despeckling; experiments are conducted to demonstrate the effectiveness of this method. The proposed method effectively addresses the problem of reducing speck noise in a medical ultrasound image while maintaining the details, edge, and structure of the image. Good despeckling results are obtained. The introduction of quantum theory can not only provide a solution to the present medical ultrasound image despeckling problems but also inspire researchers to make use of the theory in various medical image processing methods. A new path of interdisciplinary exploration can be achieved in the medical image processing research and even in other complicated problems in various disciplines by combining the quantum-inspired theory or other advanced theories in multiple fields to gain better processing performance.

Key words: quantum-inspired; partial differential equation; medical ultrasound images; despeckling

0 引言

超声成像系统因其所具有的无创、无放射性损害,安全快捷等优良特性,被广泛应用于医学成像领域^[1]。然而,这种图像常常受到乘性斑点噪声的污染,出现形状各异的斑点。斑点噪声不同于对图像影响较小的点状高斯噪声,它会掩盖一些灰度差别不大的图像细节和结构特征,严重削弱超声成像的准确性和有效性,影响后续医学诊疗。因此,医学超声图像去斑方法的研究具有重要意义。

对乘性斑点的滤除是图像恢复的一大难题。大量文献已对加性噪声进行了研究。BM3D^[2]是近几年经验证的较为成功的有效去加性高斯白噪声的方法,但去乘性斑点噪声能力有限。基于小波变换的去斑方法也获得了有效应用^[3],但其中的下采样操作使得小波域中原始图像信号的非连续性难以保持,影响了去噪图像的质量。局部统计滤波方法如Kuan滤波、Frost滤波、Lee滤波等,以及非对数变换的小波域医学图像去斑方法 GenLik,虽然具有较好的去斑效果,但保持原始图像的细节特征能力有限。利用偏微分方程(PDE)抑制图像噪声已经被认为是一种有效的图像去噪技术。Perona等人^[4]所提出的基于PDE各向异性扩散方法利用PDE模型,通过足够次数的迭代演变一幅图像,得到期望的结果。所提出的扩散系数能够在多次迭代后保持图像的分辨率,较好地保持边缘。但该方法对含有斑点噪声

且图像细节模糊的医学超声图像去斑能力极为有限。P-M方法本身具有病态性,因此Catté等人^[5]在P-M方法的基础之上对梯度进行正则化,实现了稳定的P-M模型,在数学理论上解决了存在的唯一性,消除了P-M方法的病态性。但在实际图像去噪中,没有解决图像边缘保持与抑噪平衡的问题。

量子信号处理(QSP)是信号处理领域的最新研究方向之一。QSP的概念和理论最早由美国麻省理工学院的Eldar等人^[6]提出,其基本思想与量子计算和量子信息不同,不依赖于量子级物理设备,不受量子力学中物理规律的限制,通过借鉴量子力学的基本概念、规律、数学体系和一些有趣的公理及约束,在经典计算机上,实现新算法或改进已有的信号处理算法。QSP框架是量子力学理论在信号处理领域的一种新的衍生机制。该理论与图像处理技术的结合是一个新的研究方向。Zhang等人^[7]提出一种改进的量子衍生遗传算法应用于多阈值图像分割,取得了良好的图像分割效果。Dey等人结合量子智能算法,提出一种量子衍生启发式多阈值图像分割方法^[8]。谢可夫等人^[9-11]提出一种量子衍生形态学算子,巧妙地利用了量子叠加态原理,丰富了图像形态学处理理论。付晓薇等人^[12]借鉴量子基础理论,提出量子衍生医学图像增强和量子衍生基于小波的医学超声图像去斑方法^[1],取得了一定的效果。由上述文献可知,引入量子理论,考虑图像全局与局部信息,能更有效地提高图像处理的效果。鉴于此,本文针对传统P-M方程各向异性扩散的自适应去斑

能力不足,引入量子理论改进扩散系数,增强去斑算法的自适应能力。同时构造出各向异性扩散模型,提出一种量子衍生的偏微分方程医学超声图像去斑方法。本文方法能够在较少的计算时间中取得较好的去斑效果、图像结构和细节保持程度,是一种有效的医学超声图像去斑方法。

1 理论基础

图像是一个定义在矩形区域内的函数,即图像 $u: x \in \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$, 灰度值为 $u(x, y)$ 。在 PDE 方法中,为图像方程引入时间因子 t , 则图像的变化表示为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F[u(x, y, t)] \quad (1)$$

式中, F 表示某给定算法,根据 F 方程,去噪模型可分为线性扩散模型、非线性扩散模型等。偏微分方程的解即尺度 t 时的图像。文献[4]提出了非线性各向异性扩散方程

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \operatorname{div}[g(|\nabla u|) \nabla u] \\ u(x, y, 0) = u_0(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

式中, div 是散度算子,函数 $g(|\nabla u|)$ 是扩散系数。

模型根据图像梯度实现有选择性的扩散平滑。对于图像边缘细节部分,由于它具有较大的梯度模值,所以 $g(|\nabla u|)$ 的值较小,该模型在此处进行较弱平滑以保护边缘信息;反之,对于图像平滑部分,由于它具有较小的梯度模值,所以 $g(|\nabla u|)$ 的值较大,该模型在此处进行较强平滑以更有效抑制斑点噪声。

图像梯度在一定程度上能够反映出图像边缘特征。然而,对于含乘性斑点噪声的医学超声图像,图像成像模糊,图像梯度与图像细节信息相关性并不能确定。因此,本文主要针对 P-M 方法进行改进,利用小波系数的尺度间相关性,通过父子带小波系数的归一化乘积,引入量子衍生的理论自适应调整扩散系数和改进扩散模型。

2 本文方法

2.1 量子衍生的扩散系数

相对噪声小波系数,尺度间信号小波系数具有很强的相关性。对信号系数而言,若父系数的模较大,则其子系数也同样具有较大的模值^[1]。在所提出的方法中,父子带小波系数的乘积表达式为

$$C^d(m, n) = |Y_1^d(m, n)| \times |Y_2^d(m, n)| \quad (3)$$

式中, d 为子带方向,可以取水平、垂直、对角 3 个方向, $|Y_1^d(m, n)|$ 和 $|Y_2^d(m, n)|$ 分别表示第 1 和第 2 尺度 d 方向上空间位置 (m, n) 上的小波系数的模。根据量子叠加态原理,高频子带的父子带小波系数的乘积 C^d 可以认为是在高频子带中,噪声与信号两种量子态的叠加

$$|C^d(m, n)\rangle = p_0 |0\rangle + p_1 |1\rangle \quad (4)$$

式中, p_0 和 p_1 分别表示量子基态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的概率幅, $|p_0|^2$ 和 $|p_1|^2$ 分别为噪声基态 $|0\rangle$ 和信号基态 $|1\rangle$ 的出现概率,且满足归一化条件 $|p_0|^2 + |p_1|^2 = 1$ 。

NC^d 表示归一化的 C^d ,它在某种程度上反映信号出现的概率,其值越大表明该系数对应的位置上父子带小波系数均有较大能量和相关性,该位置出现高频信号的概率也越大;反之亦然。根据量子叠加性,小波系数对应像素呈现信号基态 $|1\rangle$ 的概率和父子带小波系数的归一化乘积 NC 之间的关系可以用一个酉变换 U 来表示为

$$\text{输出态矢量} = U \times \text{输入态矢量} \quad (5)$$

式中,酉变换 U 用量子旋转门^[13]表示为

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

因此 $|p_0|^2 = \cos^2\left(NC^d \times \frac{\pi}{2}\right)$,由此定义量子衍生的扩散系数为

$$g(NC^d) = \cos^2\left(NC^d \times \frac{\pi}{2}\right) \quad (7)$$

该扩散系数函数满足 $g(0) = 1$, $g(NC^d)$ 为减函数, $\lim_{NC^d \rightarrow \infty} g(NC^d) = 0$ 这 3 个条件。

对于 PDE 图像滤波方法,扩散函数的值与信号出现的概率呈反比。当像素出现高频信号的概率较小时,扩散需要增强,可通过增大扩散系数有效消除噪声;反之,当像素出现高频信号的概率较大时,扩散需要减弱,通过减小扩散系数保持图像细节。

2.2 量子衍生的各向异性扩散模型

本文考虑保持图像边缘和各方向上的细节,采用的各向异性扩散方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \operatorname{div}[g(NC) \cdot NC \cdot \nabla u_t] \quad (8)$$

式中, div 是散度算子,函数 $g(NC)$ 是式(7)所定义的扩散系数, u_t 是 t 时刻的图像。

离散化的该各向异性扩散模型表示为

$$u_{i+1} = u_i + \lambda \sum_{d=1}^8 [g(NC^d) \cdot NC^d \cdot \nabla u_i^d] \quad (9)$$

式中, λ 是控制稳定性的参数, 用小波低频子带系数自适应性地确定

$$\lambda = \frac{m(L_1)}{m(L_4)} \quad (10)$$

算子 $m(X)$ 表示求 X 的中值, L_i 表示第 i 层小波分解的低频系数, 下标 i 表示层数。 ∇u_i^d 表示 d 方向上的梯度值, 定义为

$$\nabla u_i^{0^\circ}(x, y) = u_i(x, y+1) + u_i(x, y-1) - 2u_i(x, y) \quad (11)$$

$$\nabla u_i^{90^\circ}(x, y) = u_i(x-1, y) + u_i(x+1, y) - 2u_i(x, y) \quad (12)$$

$$\nabla u_i^{\pm 45^\circ}(x, y) = u_i(x+1, y-1) + u_i(x-1, y+1) + u_i(x-1, y-1) - 4u_i(x, y) \quad (13)$$

式中, (x, y) 表示像素的空间位置。

本文方法的基本流程如下:

1) 量子衍生扩散系数 $g(NC)$:

- (1) 对含斑图像进行 4 层离散 DB2 小波分解;
- (2) 计算高频子带小波系数 Y ;
- (3) 根据式(7), 计算量子衍生扩散系数。

2) 利用本文所提出的量子衍生各向异性扩散式(9)模型初始化含斑图像 u 。

3) 根据式(10), 计算参数 λ 。

4) 通过式(11)~(13) 计算图像水平、垂直、对角方向梯度。

5) 通过式(9), PDE 扩散滤波图像; 如果迭代次数未达到最大迭代次数, 返回步骤 4) 否则算法结束。

3 实验结果

为了比较本文方法的性能, 与传统的空间域滤波器 Frost、双树复小波(DTCWT)软阈值方法、P-M 方法进行对比实验。实验采用如下客观评价指标: 信噪比(SNR)、边缘保持度 β 、结构相似度(SSIM)、图像均值、等效视数(ENL)。

SNR 反映原始图像信号和去斑后图像的像素灰度值的差异, 其值越大, 说明噪声去除的效果越好。其定义为

$$\text{SNR} = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F_{ij}^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F_{ij} - \hat{F}_{ij})^2} \quad (14)$$

式中, F 和 $\hat{F}$ 分别表示原始图像信号和含斑点噪声的图像。

边缘保持度 β 反映原始图像信号和去斑后图像的边缘差异, 其取值在 0 和 1 之间。去斑后图像的边缘保持度的值越接近 1, 说明算法的边缘细节保持能力越好。其定义为

$$\beta = \frac{\Gamma(\Delta F - \overline{\Delta F}, \Delta \hat{F} - \overline{\Delta \hat{F}})}{\sqrt{\Gamma(\Delta F - \overline{\Delta F}, \Delta F - \overline{\Delta F}) \cdot \Gamma(\Delta \hat{F} - \overline{\Delta \hat{F}}, \Delta \hat{F} - \overline{\Delta \hat{F}})}} \quad (15)$$

$$\Gamma(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_1(i, j) x_2(i, j)$$

式中, ΔF 和 $\Delta \hat{F}$ 分别表示 F 和 $\hat{F}$ 经过 3×3 的拉普拉斯算子高通滤波后的结果。

结构相似度反映原始图像信号和去斑后图像的结构相似程度, 其取值在 0 和 1 之间。去斑后图像的结构相似度的值越接近 1, 说明算法的结构保持能力越好。其定义为

$$\text{SSIM} = [l(F, \hat{F})]^\alpha \cdot [c(F, \hat{F})]^\beta \cdot [s(F, \hat{F})]^\gamma \quad (16)$$

式中, 常数 α, β, γ 皆为正数, 用于调整 3 个相关部分的权重。函数 $l(F, \hat{F}), c(F, \hat{F}), s(F, \hat{F})$ 为

$$\begin{cases} l(F, \hat{F}) = \frac{2\mu_F\mu_{\hat{F}} + C_1}{\mu_F^2 + \mu_{\hat{F}}^2 + C_1} \\ c(F, \hat{F}) = \frac{2\sigma_F\sigma_{\hat{F}} + C_2}{\sigma_F^2 + \sigma_{\hat{F}}^2 + C_2} \\ s(F, \hat{F}) = \frac{\sigma_{F\hat{F}} + C_3}{\sigma_F\sigma_{\hat{F}} + C_3} \end{cases} \quad (17)$$

式中, 常数 C_1, C_2, C_3 皆为正数, 用于避免分母取零。

图像均值反映图像平均灰度值。去斑后的图像均值越接近原始图像信号, 说明去斑算法对图像在统计意义上造成的形变越小。

等效视数 ENL 反映同质区内图像的平滑程度。图像同质区中的 ENL 值越大, 说明该区域越平滑、去斑效果越好。其定义为

$$\text{ENL} = \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \quad (18)$$

式中, μ 为选定同质区内的像素灰度的均值, σ 为该同质区内像素灰度的标准差。

3.1 模拟斑点图像去斑实验

图1是方差为0.9的模拟含斑肝脏超声图像去斑视觉效果对比。其中图1(a)是利用Logic 9超声仪(GE Medical System, Milwaukee WI USA)硬件系统滤波生成的理想肝脏超声原始图像。表1—表3为对方差为0.6~1的含斑肝脏超声图像模拟去斑实验的客观评价指标。实验中采用的模拟斑点程序来自 Aleksandra Pizurica (<http://telin.ugent.be/~sanja/>)。

如图1所示,图1(a)是理想肝脏超声图像,图1(b)是方差为0.9的含斑图像;图1(c)—(f)分别对应所比较的各种方法去斑后的结果。从图像视觉效果来看,图1(c)—(f)中依然存在大量的斑点噪声,说明这些方法的去斑能力存在不足。P-M方法去斑效果较显著,但去斑后的图像较模糊,图像细节和结构特征信息出现丢失。本文方法不仅去斑效果显著,而且还保持了大部分图像细节和组织结构。

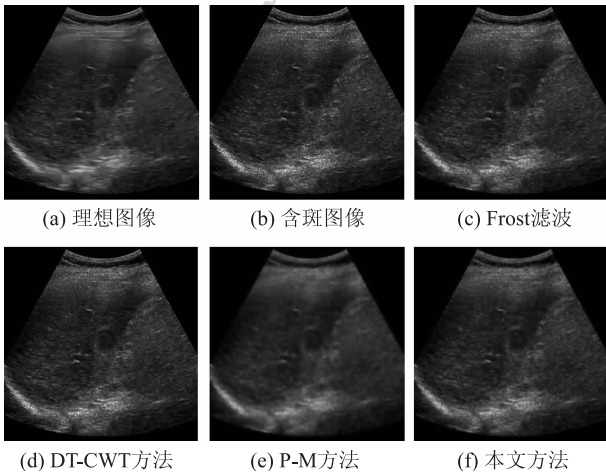


图1 模拟斑点噪声图像去斑视觉效果

Fig.1 Despeckling experiments on simulation speck

表1 模拟斑点噪声图像去斑 SNR 指标

Table 1 SNR of despeckled images with simulation speck					
σ^2	含噪	frost	DTCWT	PM-PDE	本文方法
0.6	13.30	16.93	14.64	15.00	17.50
0.7	11.86	15.75	13.43	14.95	16.82
0.8	10.66	14.73	12.51	14.81	16.18
0.9	9.64	13.83	11.91	14.70	15.60
1	8.63	12.85	11.16	14.59	14.87

表2 模拟斑点噪声图像去斑边缘保持度 β 指标

Table 2 β of despeckled images with simulation speck					
σ^2	含噪	frost	DTCWT	PM-PDE	本文方法
0.6	0.32	0.45	0.40	0.45	0.55
0.7	0.27	0.40	0.36	0.44	0.52
0.8	0.23	0.35	0.32	0.43	0.50
0.9	0.20	0.31	0.29	0.44	0.46
1	0.18	0.27	0.28	0.42	0.42

表3 模拟斑点噪声图像去斑 SSIM 指标

Table 3 SSIM of despeckled images with simulation speck					
σ^2	含噪	frost	DTCWT	PM-PDE	本文方法
0.6	0.73	0.87	0.78	0.81	0.89
0.7	0.68	0.84	0.75	0.81	0.87
0.8	0.64	0.82	0.71	0.81	0.85
0.9	0.60	0.79	0.69	0.81	0.84
1	0.56	0.76	0.67	0.81	0.81

表1—表3 各项图像质量客观评价指标中,本文方法对含斑方差为0.6~1的图像取得较好的结果。因此,表1—表3的结果进一步证明了本文方法在去斑效果、细节保留、结构相似方面有着较好的效果。

为了进一步证明本文方法较传统 P-M 方法的改进效果,对方差 0.6~1.0 的模拟含斑 goldhill 图像进行对比实验,表4显示了实验结果的各项客观评价指标。

表4 本文方法与传统 P-M 方法的模拟斑点噪声图像对比

Table 4 Proposed method and traditional P-M method on images with simulation speck						
σ^2	SNR		β		SSIM	
	PM-PDE	本文	PM-PDE	本文	PM-PDE	本文
0.6	10.90	13.14	0.47	0.52	0.58	0.69
0.7	10.81	12.77	0.47	0.52	0.58	0.67
0.8	10.78	12.47	0.47	0.52	0.57	0.66
0.9	10.67	12.09	0.47	0.51	0.57	0.64
1	10.62	11.77	0.47	0.51	0.57	0.63

3.2 真实医学超声图像去斑实验

图2为肝脏部位的真实医学超声图像使用不同去斑方法视觉效果对比。图2中白色方框对应

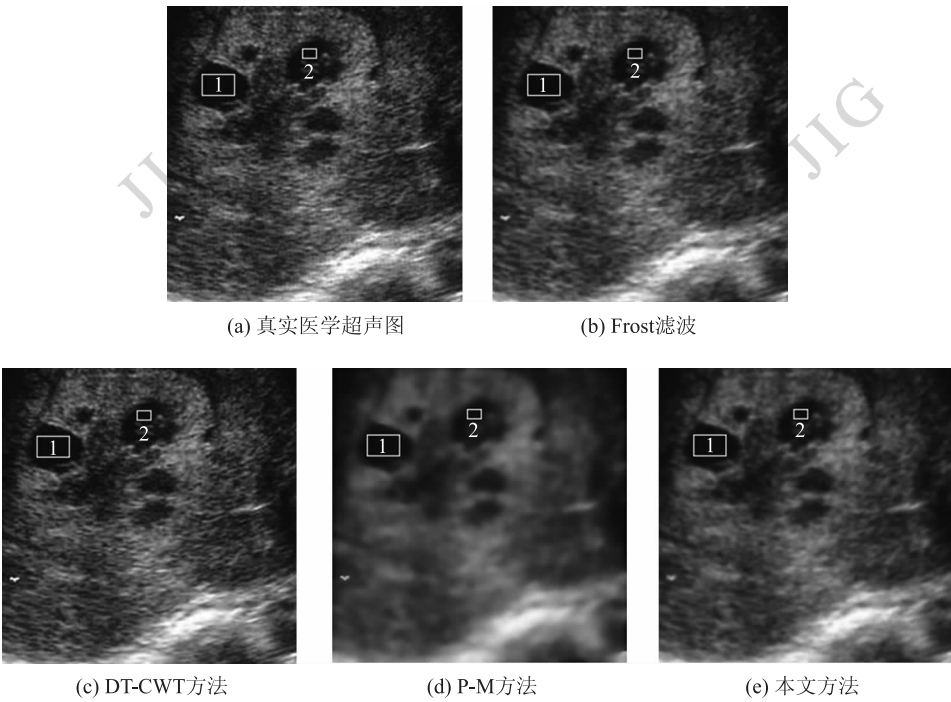


图2 真实医学超声图像去斑实验视觉效果

Fig. 2 Despeckling experiments on real medical ultrasound image

选定的同质区。表5为各种方法图像去斑客观评价比较。

表5 真实医学超声图像去斑实验

Table 5 Experiments of real medical ultrasound image

指标	含噪	frost	DTCWT	PM-PDE	本文方法
均值	90.97	91.10	90.85	90.27	90.97
ENL of Fig. 2 region1	179.38	270.58	252.51	327.69	383.75
ENL of Fig. 2 region2	96.56	189.89	124.87	160.79	222.00
运行时间/s	—	3.07	0.06	0.24	1.77

图2中各去噪方法的处理结果显示,空间域滤波器能取得一定的去斑效果;DT-CWT方法的去斑效果不明显;P-M方法大幅消减了斑点噪声,但也造成了组织细节上的明显模糊,可见这是以过度平滑图像细节作为代价的。本文方法能够明显减弱真实医学超声图像中的斑点噪声,同时避免了大量图像细节的损失。

表5显示了P-M方法在所选取的两个同质区中均能取得较大的ENL,说明对图像的平滑程度较大。本文方法能够保持原始图像的灰度均值,同时,在所选取的两个同质区中,均能获得最大的ENL,即对同质区的平滑效果最好,进一步证明了图2的

结果。同时,通过在同一个过程中完成噪声的去除和细节的保持,本文方法也能在较短的时间内完成对图像的处理。

4 结论

医学超声图像被斑点噪声污染,现有的去除高斯白噪声的方法往往不能有效应用于斑点噪声。鉴于此,本文提出了一种量子衍生PDE医学超声图像去斑方法。通过引入量子衍生的扩散系数,以及构造各向异性扩散模型,有效地解决了在去斑的同时保持图像边缘细节和结构特征的困难。实验结果表明,本文方法在模拟斑点噪声和真实医学超声图像上的对比实验中都取得了较好的结果,是一种有效的医学超声图像去斑方法。本文方法具有较好的自适应去斑性能,可自适应性确定参数,具有较好的医学超声图像自适应去斑与图像细节保持能力。量子理论的引入,也为今后的医学图像处理研究指出了新的思路。

参考文献 (References)

[1] Fu X W, Ding M Y, Cai C. Despeckling of medical ultrasound

- images based on quantum-inspired adaptive threshold[J]. Electronics Letters, 2010, 46(13): 889-891. [DOI: 10.1049/el.2010.1092]
- [2] Dabov K, Foi A, Katkovnik V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 2080-2095. [DOI: 10.1109/TIP.2007.901238]
- [3] Tian J, Chen L. Image despeckling using a non-parametric statistical model of wavelet coefficients[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2011, 6(4): 432-437. [DOI: 10.1016/j.bspc.2010.11.006]
- [4] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629-639. [DOI: 10.1109/34.56205]
- [5] Catté F, Lions P L, Morel J M, et al. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1992, 29(1): 182-193. [DOI: 10.1137/0729012]
- [6] Eldar Y C, Oppenheim A V. Quantum signal processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(6): 12-32. [DOI: 10.1109/MSP.2002.1043298]
- [7] Zhang J, Li H, Tang Z, et al. An improved quantum-inspired genetic algorithm for image multilevel thresholding segmentation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014:295402(1-12). [DOI: 10.1155/2014/295402]
- [8] Dey S, Saha I, Bhattacharyya S, et al. Multi-level thresholding using quantum inspired meta-heuristics[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 67:373-400. [DOI: 10.1016/j.knsys.2014.04.006]
- [9] Xie K F, Luo A. Research on quantum-inspired mathematical morphology[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(2): 284-287. [谢可夫, 罗安. 量子启发数学形态学的研究[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 284-287.] [DOI: 10.3321/j.issn:0372-2112.2005.02.022]
- [10] Xie K F, Luo A, Zhou X Y. Morphological method inspired by quantum for edge detection of image[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(11): 87-89. [谢可夫, 罗安, 周心一. 量子衍生形态学图像边缘检测方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(11): 87-89.] [DOI: 10.3321/j.issn:1002-8331.2007.11.030]
- [11] Xie K F, Zhou X Y, Xu G P. Morphology filtering inspired by quantum collapsing[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(5): 967-972. [谢可夫, 周心一, 许光平. 量子衍生坍塌形态学滤波[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(5): 967-972.] [DOI: 10.11834/jig.20090530]
- [12] Fu X W, Ding M Y, Zhou C P, et al. Research on image enhancement algorithms of medical images based on quantum probability statistics[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1590-1596. [付晓薇, 丁明跃, 周成平, 等. 基于量子概率统计的医学图像增强算法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1590-1596.]