

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012
Vol.17 No.

4

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年4月 第17卷 第4期(总第192期)

目次

综述

图像分割中的模糊聚类方法 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨率重建中的应用 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

图像分析和识别

核空间散度阈值法 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测	王千,夏利民,谭论正(560)
利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度	朱新懿,耿国华,温超(568)

计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现	赵艳伟,程振林,董慧,方金云(575)
------------------------	---------------------

虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制	张兵强,张立民,张建廷(582)
----------------------------	------------------

遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法	杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)
自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪	杨萌,张弓(596)

第 18 届中国遥感大会征文通知	封 2
第 33 届亚洲遥感会议征文通知	封 2

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 4 期

2012 年 4 月 16 日出版

主管单位 中国科学院
主 办 中国科学院遥感应用研究所
 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
 北京 9718 信箱 邮编 100101
 电子信箱:jig@irsa.ac.cn
 电话:010-68407995 010-82614429
 网 址:www.cjig.cn
印刷装订 北京北林印刷厂
广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
 (中国国际书店)
 (北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
 CAS China Society of Image and Graphics
 Institute of Applied Physics and Computational
 Mathematics
Chief editor LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
 of Journal of Image and Graphics
 (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
 E-mail: jig@irsa.ac.cn
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
 and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading Corporation
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公共事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;
论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;
论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;
网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;
会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。
会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>

与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

Contents

Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image
..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale
..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space
..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images
..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application
..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation
..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps
..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method
..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD
..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data
..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary
..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0471-09

论文引用格式: 许光宇, 檀结庆, 钟金琴. 自适应的有效非局部图像滤波[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 471-479

自适应的有效非局部图像滤波

许光宇¹, 檀结庆^{1,2}, 钟金琴¹

1. 合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009; 2. 合肥工业大学数学学院 合肥 230009

摘要:研究了基于预选择的非局部均值滤波方法,并指出已有方法在提取图像子块特征方面的不足,利用梯度域奇异值分解(SVD)提出一种自适应的有效非局部滤波方法。该方法对基于预选择的非局部滤波方法的贡献主要有:1)是一种基于图像子块结构特征的鲁棒预选择方法;2)研究了相似集大小与滤波性能的关系;3)相似子块的自动选取;4)提出一种局部自适应的滤波参数选取方法,根据图像局部内容的不同确定滤波参数。此外,利用欧氏距离的对称性进一步提高运行速度。实验结果表明:本文方法滤波后的图像在主客观方面都优于原算法和其他快速方法,且运行速度较快,是一种有效的滤波方法。

关键词:非局部滤波;奇异值分解;图像特征;预选择;滤波参数

Adaptive efficient non-local image filtering

Xu Guangyu¹, Tan Jieqing^{1,2}, Zhong Jinqin¹

1. School of Computer & Information of HFUT, Hefei 230009, China; 2. School of Mathematics of HFUT, Hefei 230009, China

Abstract: Non-local Means Filtering (NLMF) has been a popular issue in the image filtering field. The existing NLMFs based pre-selections are analyzed, and it is pointed out that they all have deficiencies in terms of feature extraction from image patches. An adaptive and efficient NLMF method is proposed using singular value decomposition (SVD) in the gradient domain. Our contributions to NLMF based pre-selection are: 1) the robust pre-selection method based structure feature from image patch; 2) the relation between size of the similar sets and filtering performance is analyzed; 3) automatic selection of similar patches; 4) local adaptive selection of the filtering parameter. In addition, the symmetry of the Euclidean distance is considered to accelerate the proposed method further. The experimental results show that the proposed method outperforms the original NLMF and other fast NLMFs on subjective and objective aspects, and has rapid running speed. The proposed method is an efficient filtering method.

Key words: nonlocal means filtering; singular value decomposition; image feature; preselection; filtering parameter

0 引言

噪声的存在严重影响了图像质量,降低了对图像目标的信息解译能力,如图像复原、分割与目标识别,因此抑制噪声是图像预处理中的重要内容,吸引了大量研究者的关注。许多噪声可以近似为服从高

斯分布的白噪声,去除图像中的加性高斯白噪声成为图像滤波中一个重要的研究方向。

近年来,人们提出了许多性能优良的图像滤波方法如双边滤波算法^[1]、总变分最小化算法^[2]等。Buades^[3]给出了较全面的综述,同时也给出了一种性能优异的滤波方法,即非局部均值滤波(NLMF)算法,其主客观方面都优于常见的滤波方法如高斯

收稿日期:2011-06-30;修回日期:2011-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目(61070227, 60773043);教育部科学技术研究重大项目(309017)

第一作者简介:许光宇(1976—),男,合肥工业大学计算机与信息学院计算机应用技术专业博士研究生,主要研究方向为图像处理、模式识别。E-mail:xyg761220@163.com

滤波、双边滤波等。NLMF 中被处理像素的值由图像中像素灰度值加权平均得到,对于每个像素的权值,采用以它为中心的图像子块与被处理像素为中心的图像子块高斯加权欧氏距离的负指数函数值来计算,权的大小体现了图像子块的相似度。NLMF 的基本思想是利用图像中结构的冗余,具有相似结构的图像子块能够输出更大的权值。

虽然 NLMF 具有优异的滤波性能,但它仍存在一些不足,主要有:算法的计算量太大,关键滤波参数如何确定不明确。高的计算复杂度主要是由于在滤波过程中要计算图像中所有像素的权。实际应用中为了减少权的计算次数,往往把搜索邻域限定在一定大小的局部区域,但计算量仍然很大。为了提高算法的效率,Mahmoudi^[4]利用图像子块的均值和平均梯度方向对邻域进行预选择,生成相似像素集合;Coupe^[5]采用图像子块的均值和方差选择与当前图像子块相似的邻域。前者平均梯度方向能反映图像细节信息,但抗噪能力较差;后者方差虽然能反映像素灰度变化的程度,但无法刻画边缘、纹理等信息,且对噪声较敏感。因此,上述两种方法会降低预选择的有效性和准确性,造成相似集不可靠,影响滤波的结果。Ramanathan^[6]使用概率统计的方法排除不相似子块,在降低复杂度的同时,也提高了估计的准确性。上述方法对计算复杂度的降低是靠减少权的计算次数来达到的。Tasdizen^[7]提出的基于主成分分析的 NLMF (PCA-NLMF) 获得了较好的效果,该方法使用 PCA 把图像子块投影到特征向量空间,选取一定维数的特征向量用于计算相似权系数,此方法的缺点是矩阵向量化破坏图像的结构信息^[8];Dimiiri^[9]采用 Stein 无偏风险估计 (SURE) 的方法来优化 NLMF 滤波参数;Brox^[10]提出一种迭代的 NLMF 方法并利用聚类树生成相似集合,但代价较高。国内许多研究者也对 NLMF 展开了研究,主要有:郑钰辉等人^[8]提出了基于 2DPCA 的 NLMF,利用 2DPCA 生成相似集,取得较理想的滤波效果;孙伟峰等人^[11]提出有效保持具有对称结构图像中结构信息的 NLMF,通过对称变换与两次(两级)滤波的方法来滤除噪声;王志明等人^[12]提出了一种定量估计滤波参数的方法。

由此可见,有效的 NLMF 方法应该具备以下特性:1) 滤波效果优良;2) 稳定可靠;3) 较低的计算复杂度。而图像信息的有效表示则是提高 NLMF 性能的关键。

本文在图像梯度域奇异值分解(SVD)的基础上,提出了一种自适应的有效 NLMF 方法(SVD-NLMF),从滤波性能和计算复杂度两个方面对 NLMF 进行了改进。主要包括以下内容:1) 采用一种梯度域奇异值分解方法估计图像中的局部结构信息,根据提取的特征对邻域进行自动选取,排除不相似像素,生成相似像素集合;2) 为了提高 SVD-NLMF 的滤波性能,提出一种基于图像局部内容的局部自适应滤波参数选取方法。3) 考虑了欧氏距离的对称性,对任意两个像素之间的距离只计算一次,SVD-NLMF 计算量下降了近一半。实验表明:SVD-NLMF 不仅能够保持较好的滤波性能,而且显著地提高了算法的运行速度,耗时只有 NLMF 的三分之一左右。

1 非局部均值滤波(NLMF)

假定噪声图像 $f = \{f(i) \mid i \in \Omega\}$, Ω 为图像的支撑域, $f(i)$ 表示像素 i 的灰度值,滤波后图像为 \hat{f} 。则 NLMF 表示为:

$$\hat{f}(i) = \frac{\sum_{j \in \Xi} w(i,j)f(j)}{\sum_{j \in \Xi} w(i,j)} \quad (1)$$

$$w(i,j) = \exp\left(-\frac{d(i,j)}{h}\right) \quad (2)$$

$$d(i,j) = \|\mathbf{G}_a \otimes (\mathbf{N}(i) - \mathbf{N}(j))\|^2 \quad (3)$$

式中, \mathbf{G}_a 是标准差为 a 的高斯核; \otimes 表示集合内对应元素相乘; $d(i,j)$ 为欧氏距离; h 为控制平滑程度的滤波参数; $\mathbf{N}(i)$ 表示以像素 i 为中心的图像子块; Ξ 表示以像素 i 为中心的搜索窗口,相似权系数 $w(i,j)$ 由两个图像之块内像素之间的高斯加权欧氏距离来定义,它的大小表示两个图像子块间的相似程度。理论上 Ξ 可为整个图像,但其计算复杂度太高,实际计算过程中,通常把搜索窗口限定在一定大小的局部区域。假设图像、搜索窗口和图像子块的大小分别为 $M \times M$ 、 $W \times W$ 和 $P \times P$ (一般取 $P = 5, 7, 9$),那么 NLMF 的计算复杂度为 $O(P^2 W^2 M^2)$,一般 W 的取值不超过 21,即 $W \ll M$,算法的效率得到显著的提高,但计算量仍然很大,影响了它的应用。

NLMF 不仅比较了像素灰度值的差异,而且还考虑了图像中结构的冗余^[3]。主要包含 3 个方面内容:1) 为了满足平均滤波的思想,保证滤波后图像足够平滑,要有一定数量的像素进行加权平均;

2) 每个像素的权系数由以它为中心的图像子块与被滤波像素所在图像子块的高斯加权欧氏距离来计算;3) 利用结构相似的邻域保持图像细节信息。与当前图像子块相似度越高,则邻域的中心像素被赋予的权重越大,反之越小。这些相似邻域对像素恢复起关键作用。

2 基于梯度域 SVD 的有效 NLMF

在 NLMF 算法中,权的计算几乎耗费了算法的全部开销,抛弃不相似邻域是一种有效的提高算法效率的方法,但此种方法是否有效依赖于鲁棒的预选择依据(特征),即有效的图像信息表示是预选择是否有效的关键。因此,用于预选择的特征必须满足以下两个基本条件:1) 鲁棒性,要求方法抗噪能力强;2) 有效性,要求能够区分图像不同区域的内容,并有较好的响应。

另外,相似集大小(相似像素的个数)与算法的滤波性能和运行速度密切相关,而相似集大小一般由阈值决定。因此,合适的阈值是解决滤波性能与运行速度这一矛盾的关键。

基于上述分析,本文采用一种梯度域 SVD 的方法估计图像局部结构信息。此方法提取的特征具有鲁棒性,能够很好地反映原图像的信息。利用梯度域 SVD 的结果构造一种结构描述子,然后用局部结构描述子的响应值作为特征值对邻域进行预选择,生成相似像素集合。同时,利用提取的特征研究了相似集大小与算法性能的关系,进而给出一种阈值选取的方法。

2.1 梯度域 SVD

为了能够有效地提取图像特征,本文采用基于梯度域 SVD 的图像局部方向估计方法^[13]。该方法也是构造方向可调高斯核的核心内容^[14]。对于图像 f ,首先计算 f 的梯度,然后把局部区域内的梯度信息排列成 $N \times 2$ (N 为局部区域内像素的个数) 的矩阵 G ,并进行奇异值分解,其形式如下:

$$G = [\nabla f^T(1) \nabla f^T(2) \dots \nabla f^T(N)]^T = U \Sigma V^T \quad (4)$$

式中,

$$\nabla f(i) = \left[\frac{\partial f(i)}{\partial x} \quad \frac{\partial f(i)}{\partial y} \right]^T \quad (5)$$

为图像 f 在 i 处的梯度, U 是大小为 $N \times N$ 的正交矩阵; Σ 是大小为 $N \times 2$ 奇异值矩阵, V 是 2×2 的正交

矩阵,其第二列向量 $v_2 = [v_1 \ v_2]^T$ 对应着最小非零奇异值,决定了局部区域的主方向 $\theta = \arctan(v_1/v_2)$ 。

2.2 局部结构描述子

对于自然图像,图像中不同区域包含的内容不同,一般可分为平坦区域、边缘纹理方向一致区域和细节丰富区域(如存在相交边缘和纹理)。为了能较好地解决平滑和保持图细节信息间的矛盾,在滤波过程中要能够区分图像中内容的不同。对于 NLMF 算法,就是发现与当前图像子块内容一致的邻域。

奇异值矩阵 Σ 的特征值 λ_1, λ_2 反映了在特征向量方向上能量变化的大小。在图像平坦区域,灰度值变化较小或几乎没有变化,两个特征值为 $\lambda_1 = \lambda_2 \approx 0$; 在边缘纹理一致区域,跨越边缘的方向灰度变化大,特征值为 $\lambda_1 > \lambda_2 \approx 0$; 在细节丰富区域,在不同的方向灰度都有变化,则 $\lambda_1 > \lambda_2 > 0$ 。由于奇异值分解具有很强的抗噪能力,且噪声没有任何方向性,特征值 λ_1, λ_2 能够很好地表征图像局部区域的内容。

采用 $e(i) = \lambda_1(i) + \lambda_2(i)$ 作为局部方向能量的度量。 e 值的大小体现了图像局部区域基本结构模式,如果 e 值较大,则当前区域包含丰富细节信息;如果 e 值较小,则当前区域较平坦。因此, e 可作为描述图像局部结构信息的描述子,其值可用来表征图像中各子块内容的特征。归一化后的图像子块特征集为

$$\bar{e} = \frac{e - \min(e)}{\max(e) - \min(e)}, \bar{e}(i) \in [0, 1] \quad (6)$$

图 1 所示为根据式(6)得到的 Lena 图像与噪声图像特征可视图像。比较图 1(b)(d) 可以看出,即使在噪声标准差 $\sigma = 10$ 时,噪声图像提取的特征与原图像的非常接近,能较好地反映图像中不同区域的内容,如平坦、边缘(帽子)与细节丰富区域(头发)。由此可知,梯度域 SVD 具有较好的抗噪能力,而本文基于梯度域 SVD 构造的局部结构描述子是鲁棒的、有效的。因此,提取的特征可作为预选择的依据。图 1(a) 中标出的区域 1 和区域 2 是为验证局部自适应滤波参数而选中的两个区域。

2.3 相似集的自动选取

提取图像子块特征集 \bar{e} 后,可利用其比较图像子块的相似性,生成各点的相似集 $\{S(i)\}_{i=1}^L$, L 为相似集内相似像素的个数。正如前文所述,相似集大小决定着算法的滤波性能和运行速度。为了取得

滤波性能与运行速度之间较好的平衡,本文利用特征集 \bar{e} 通过实验研究了相似集大小与滤波性能的关系,在此基础上通过阈值的设置生成相似集。



图 1 原图像与噪声图像提取的特征比较

Fig. 1 Feature comparison of the original and noisy images

图 2 给出相似集大小的改变对算法性能的影响(所用搜索窗口、子块大小分别为 21×21 、 7×7),图中不同曲线对应着不同的图像。横坐标 δ 为相似集中元素个数(参与加权平均的像素个数)占当前搜索窗口内所有像素的比例,当 $\delta = 1$ 时即为原 NLMF 方法。纵坐标为滤波结果的峰值信噪比(PSNR)。从图 2 中可以看出:1)若相似集太小,算法的滤波性能不理想,但其优点是运行速度快;若相似集太大,虽然滤波性能有所提高,但运行速度较慢;2)当 $\delta = 0.5$ 时,除了 House 图像以外(PSNR 值最大误差不超过 0.1),其余图像滤波结果的 PSNR 值已经接近或达到最大值;3)滤波结果的 PSNR 值与相似集大小并不总是成正比关系,如 Lena、Boat 与 Man 图像,当相似集中元素个数超过一定数量时,滤波性能反而有所下降。

综上所述,为了解决滤波性能与运行速度间的矛盾,相似集必须满足:1)相似集中各元素应与当前像素相似;2)相似集的大小适中。也就是要解决相似集元素的选取与相似集中有多少元素的问题。

对于相似集大小的问题。从图 2 中可知,当 $\delta = 0.5$ 时,对大部分图像的滤波结果基本上达到最优。因此,本文相似集中元素个数固定为当前搜索窗口内像素个数的 50%。

相似集大小确定以后,接下来就是相似集元素

选取的问题。也就是选取具有相似特征值的像素,达到排除不相似像素的目的。因此,为了保留与当前特征值相似的那些特征值,必须首先设置一个阈值 $\tau(i)$ 。 $\tau(i)$ 的选取可表述为

$$\tau(i) = \text{median}[|\bar{e}(i) - \bar{e}_{W \times W}(i)|] \quad (7)$$

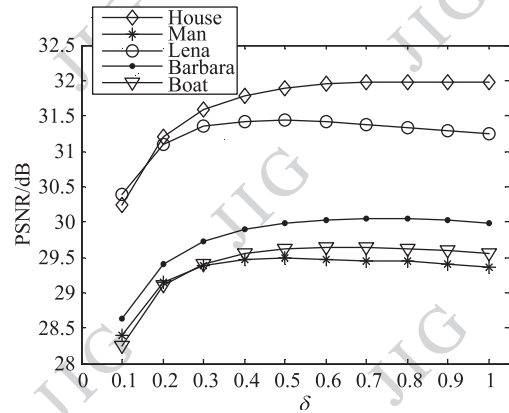


图 2 相似集大小与滤波性能关系

Fig. 2 Relation between size of similar set and filtering performance

式中, $\text{median}[\cdot]$ 表示取中值; $\bar{e}(i)$ 为像素 i 处的特征值; $\bar{e}_{W \times W}(i)$ 表示以像素 i 为中心的大小为 $W \times W$ 的局部区域内特征值的集合。滤波过程中,根据 $\tau(i)$ 排除不相似像素得到相似集 $\{S(i)\}_{i=1}^L$ 后,可由下式来滤波图像:

$$\hat{f}(i) = \frac{\sum_{j \in S(i)} w'(i,j) f(j)}{\sum_{j \in S(i)} w'(i,j)} \quad (8)$$

式中,

$$w'(i,j) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{d(i,j)}{h(i)}\right) & |\bar{e}(i) - \bar{e}(j)| \leq \tau(i) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$h(i)$ 为局部自适应滤波参数(其选取在以下讨论)。 $|\bar{e}(i) - \bar{e}(j)| \leq \tau(i)$ 用来判断邻域像素与当前像素的相似程度,如果相似则与其对应的图像子块被保留下来参与权的计算,否则被排除。通过排除不相似像素,SVD-NLMF 的计算复杂度降为 NLMF 的一半。

另外,利用距离的对称性,即 $d(i,j) = d(j,i)$,是提高算法效率的有效方法。因此,本文也考虑了距离的对称性,对任意两个像素的距离只计算一次,SVD-NLMF 的时间复杂度又降了约一半。这样做的代价是要增加一些内存占用,分别用于存储两个像

素的距离和它们的位置。

3 局部自适应的滤波参数

NLMF 中的滤波参数 h 是一个敏感参数,对滤波性能的影响较大。主要指:1)参数 h 与噪声标准差有关,噪声标准差越大 h 值就越大,反之越小;2)噪声水平、图像一定时, h 值偏大易造成滤波结果过于平滑,偏小则噪声得不到较好的去除。Buades^[3] 在 NLMF 中采用与噪声标准差的线性正比关系确定参数 h ,即 $h = 10\sigma$ 。但随着人们对 NLMF 研究的不断深入,发现参数 h 可以进一步优化,如全局自适应 h 参数选取方法^[7,9,12]。此外, Brox 等人^[15] 指出,不可能找到一个全局的滤波参数对图像的各个部分都具有很好的去噪效果。

图3所示为滤波参数 h 变化对 NLMF 滤波性能的影响。图像均加入噪声水平 $\sigma = 20$ 的高斯白噪声,图中横坐标为参数 h 的变化过程,纵坐标为滤波后图像的峰值信噪比 (PSNR),不同的曲线对应着不同的图像。从图3可以看出:1)参数 h 确实存在一个最优值,太大或太小都会造成滤波性能的下降;2) h 取值与图像内容有关。在取得最优滤波结果时,与包含较多平坦区域的 House、Man 图像对应的 h 值大于包含大量细节的 Lena、Barbara 图像的 h 值。

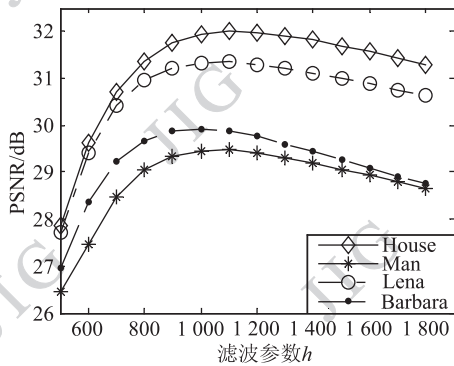


图3 滤波性能随滤波参数 h 的变化

Fig. 3 Filtering performance with filter parameter h

综上所述,参数 h 不但与噪声水平有关,而且与图像内容也有很大的关系。如果图像较平坦应采用相对较大的滤波参数,而细节丰富的图像则相对较小。不难想象对于自然图像,如果图像中各内容采用不同的滤波参数则可以提高滤波性能。

分析式(2)可以看出,欧氏距离和滤波参数 h 的比值决定权的大小,参数 h 决定滤波结果的平滑

程度。在平坦区域,像素的冗余性大,绝大多数邻域像素与当前图像子块像素的欧氏距离较小,为了排除少数奇异点,就必须加快衰减速度,即取较大的 h 值,虽然这样也会降低相似像素点的当前权重,但在归一化后各像素点权值重新分配,相似像素点又可获得较大的权重,而不相似欧氏距离由于衰减速度较快,其输出的权值仍然较小。在细节丰富区域,像素的冗余性小,除了结构相似、灰度相似的邻域,其他邻域与当前图像子块的欧氏距离一般较大,但结构相似、灰度相似的邻域很少。因此,为了保持细节信息必须利用这些结构相似的邻域,此时就要放缓衰减速度,即取较小的 h 值,归一化后这些具有相似结构的邻域输出较大的权重。这也是 NLMF 的本质:利用图像中结构的冗余。基于上述实验和分析,提出一种基于图像内容的局部自适应滤波参数选取方法。

3.1 参数 h 的局部自适应选取

由于图像被噪声污染,通过像素灰度值来判断局部内容显然会失真。而特征集 \bar{e} 中的元素能够较好地反映图像中局部内容的不同。为此,我们首先把基于图像内容的局部自适应滤波参数 $h(i)$ 定义为

$$h(i) = \beta \sigma_e^2 \quad (10)$$

式中,常数 β 与图像局部内容有关,对 $h(i)$ 起调控作用; σ_e^2 为估计的噪声方差。

由于本文滤波方法是基于相似集的,因此要判断当前相似集的内容是较平坦还是包括细节信息。采用均值 $\bar{e}_m(i)$ 来度量各相似集的内容, $\bar{e}_m(i)$ 定义为

$$\bar{e}_m(i) = \frac{1}{|\mathbf{S}(i)|} \sum_{j \in \mathbf{S}(i)} \bar{e}(j) \quad (11)$$

最后将 β 设计成与 $\bar{e}_m(i)$ 有关的函数,即

$$\beta(\bar{e}_m(i)) = \begin{cases} \beta_1 = 7.5 & 0 \leq \bar{e}_m(i) \leq 1/3 \\ \beta_2 = 5.6 & 1/3 < \bar{e}_m(i) \leq 2/3 \\ \beta_3 = 3.2 & 2/3 < \bar{e}_m(i) \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中, β 的取值分别对应着不同内容的相似集,如果当前相似集的内容较平坦则赋予较大值 β_1 ;如存在较少细节或纹理则赋予 β_2 ;如细节信息丰富则赋予较小值 β_3 。式(12)中 $\beta_1 = 7.5, \beta_2 = 5.6, \beta_3 = 3.2$ 为经验值,是采用本文方法通过大量实验,并以 PSNR 作为滤波结果的评价标准得到的。实验中采用上述经验值进行滤波能够获得较好的结果。

3.2 噪声方差的估计

噪声水平与算法滤波性能有密切的关系。在噪声先验知识未知的情况下必须进行噪声水平的估计,对于高斯白噪声,均值为零,只需要估计其标准差。常见的噪声估计算法主要有基于滤波的方法和基于图像块的方法。基于滤波的方法首先对图像进行低通滤波,然后用图像与滤波后图像之差来估计噪声方差;基于块的方法利用图像中一系列同质块,因为同质块的方差主要由噪声引起,平均这些同质块的方差可估计出噪声水平。因此基于块的噪声估计方法的关键是发现图像中的同质块。

Aishy^[16]采用图像子块 8 个方向的二阶差分绝对值之和作为同质块的度量,在此基础上估计噪声水平。由于本文的特征集 \bar{e} 中的元素很好地表征了图像中对应子块的内容,因此可以利用它来发现图像中的同质块,进而估计出噪声方差。具体做法是:首先利用 \bar{e} 筛选出几个最平坦的子块,然后计算子块的方差并选取一个参考方差(取中值或平均),当图像中子块的方差与参考方差之差的绝对值小于某个阈值时,则此子块的方差被保留,最后把这些子块(重叠或不重叠)方差的平均值作为估计的噪声方差 σ_e^2 。参考方差与阈值的设置参见文献[16]。实验结果表明此方法估计的噪声方差是准确、可靠的。

4 算法效率分析

NLMF 方法的计算复杂度为 $O(P^2W^2M^2)$ 。SVD-NLMF 方法通过抛弃不相似邻域以及考虑了距离的对称性,计算复杂度为 $O(0.25P^2W^2M^2)$,计算量仅为 NLMF 的四分之一。额外开销主要有奇异值分解 $O(4P^2M^2)$ 和阈值 τ 的选取 $O(W^2M^2)$,其他开销可以忽略不计,如噪声估计。SVD-NLMF 方法总的计算复杂度为 $O(M^2(0.25P^2W^2 + 4P^2 + W^2))$ 。可见 SVD-NLMF 方法的计算量要明显小于 NLMF 的,算法的效率得到显著的提高,运行速度约是 NLMF 的 3 倍左右。另外,PCA-NLMF 的计算复杂度为 $O(M^2(W^2d + P^4 + 0.1P^2d))$ ^[7],其中 d 为 PCA 提取图像子块的特征向量空间的维数,一般取 $d > 8$ 。

5 实验结果与分析

实验主要包括:1)SVD-NLMF 方法与 NLMF 方法^[3]、Mahmoudi 方法^[4],以及 PCA-NLMF 方法^[7]滤

波结果的主客观比较;2)全局参数与局部自适应参数的滤波结果比较;3)各方法滤波耗时比较。

为了验证本文算法的有效性,选取大小为 512×512 的 Lena、Barbara 图像与大小为 256×256 的 House、Man 图像进行仿真实验,图像分别叠加均值为零、标准差不同的高斯噪声。相关参数设置为:计算加权欧氏距离的高斯函数标准差为 1.5;搜索窗口(SW)大小为 13×13 、 21×21 ;图像子块大小固定为 7×7 (包括特征提取与噪声估计),这一尺寸能够很好地描述图像的细节和结构^[3]。Mahmoudi 方法生成各点相似集的条件为^[4]:1)邻域与当前图像子块灰度均值之比介于 $[0.5, 1.5]$ 范围内才被考虑;2)平均梯度方向之差小于某一阈值,阈值由中值估计器得到,其滤波参数的选取采用本文方法。PCA-NLMF 方法中特征向量空间的维数为 $d = 10$ 、参数 $h_{\text{pea}} = (3.15\sigma + 22.55)^{2[7]}$, σ 为噪声标准差。采用峰值信噪比 PSNR 与平均结构相似度(MSSIM)作为滤波性能客观评价指标。MSSIM 值越大表示滤波后图像与原图像结构越相似,反之则不相似。

表 1 所示为采用全局 h 和局部自适应 h 的滤波结果比较。Lena 图像叠加噪声水平 $\sigma = 20$ 的高斯白噪声,从滤波后的图像中选取较平坦区域(区域 1)和包含大量细节的区域(区域 2)(见图 1(a)),然后分别比较不同方法在这两个区域的滤波结果。对于采用全局 h 的 NLMF、SVD-NLMF 方法,表中数据为最优 h 时的滤波结果,PCA-NLMF 方法采用的全局滤波参数是 h_{pea} 。从表 1 中可以看出:采用全局 h 的 SVD-NLMF 在区域 2 的滤波结果优于 NLMF 的,这表明了本文由结构特征构造的相似集是有效的,可以更有效地保持细节信息。采用全局 h 的 SVD-NLMF 在区域 1 的滤波结果低于 NLMF 的。但采用局部自适应 h 后,由于区域 1 较平坦, h 取得较大的值(见式(12)),增强了 SVD-NLMF 在平坦区域的平滑作用,从而提高 SVD-NLMF 在区域 1 的滤波结果。同时采用局部自适应 h 也提高了在区域 2 的滤波结果。局部自适应 h 的 SVD-NLMF 滤波结果也优于 PCA-NLMF 的。

表 1 滤波结果的 PSNR 比较

Table 1 Performance (PSNR) comparison

Lena	全局 h			局部自适应 h
	NLMF	PCA-NLMF	SVD-NLMF	SVD-NLMF
区域 1	35.77	35.79	35.75	35.81
区域 2	27.58	27.64	27.62	27.66

图4所示为4种方法对Lena图像滤波结果,图像叠加标准差 $\sigma = 20$ 的高斯白噪声,搜索窗口为 21×21 。从图4中可以看出,Mahmoudi方法的滤波结果最差(见图4(d)),模糊了图像的细节信息,如头发和帽子上的纹理。这主要是因为该方法依靠灰度均值和梯度方向来生成相似集,由于灰度均值和梯度方向对噪声都较敏感,使得提取的相似集不可靠,最终影响了滤波结果。NLMF方法滤波后图像较Mahmoudi方法清晰,在细节保持上也好于Mahmoudi方法,但不如PCA-NLMF和SVD-NLMF两种方法;PCA-NLMF方法和SVD-NLMF方法滤波

后的图像较为清晰,且细节信息都能够很好地保持。但仔细观察可以发现,SVD-NLMF方法对图像中重要的结构信息的保持能力要优于PCA-NLMF方法,如图4(f)中帽子上的纹理信息,这是因为PCA-NLMF方法矩阵向量化破坏了图像的结构,以及采用全局滤波参数的结果。而SVD-NLMF方法则是充分利用结构相似的邻域,同时采用了局部自适应滤波参数。因此,SVD-NLMF方法在结构保持能力上要略优于PCA-NLMF方法。因此,本文提出的SVD-NLMF方法在去除噪声的同时能够很好地保持图像的细节信息。



图4 Lena图像滤波结果比较($\sigma = 20$)

Fig. 4 Comparison of filtering results

图5给出了4种方法对具有不同场景的Man图像滤波结果,噪声标准差为20。从图5可以看出,NLMF与Mahmoudi方法都模糊了具有弱梯度信息的远处建筑与具有复杂纹理信息的草地;PCA-NLMF和SVD-NLMF方法的滤波结果视觉效果较好,远处建筑较清晰,纹理信息也能够较好地保持,仔细观察可知SVD-NLMF更胜一筹,如远处建筑。

表2所示为4种方法滤波结果的PSNR、MSSIM值比较。图像分别叠加标准差 $\sigma = 10, 20, 40$ 的高斯白噪声,搜索窗口大小为 21×21 。从表2可以看出:Mahmoudi方法滤波结果的PSNR、MSSIM值较低,尤其是在噪声水平较高时,这主要是由于其生成的相似集包括太多不相似邻域,造成滤波性能较差;NLMF

方法滤波结果的PSNR、MSSIM值好于Mahmoudi方法,但由于采用全局滤波参数,不能对图像中各个部分都有较好的去噪,其滤波结果不太理想;PCA-NLMF方法滤波结果要优于上述两种方法,这主要因为:PCA-NLMF方法采用具有一定抗噪能力的PCA进行预选择,生成的相似集较可靠,但PCA的矩阵向量化破坏了图像的结构,且PCA-NLMF采用的是全局滤波参数,所以其滤波结果不如SVD-NLMF方法好;SVD-NLMF方法滤波结果的PSNR、MSSIM值在各噪声水平均优于上述3种方法。可见,本文采用的预选择方法是可靠的,基于图像内容的局部自适应滤波参数保证了图像中各个部分的噪声都能较好地滤除。此外,表2中也给出了本文噪声估计方法估计的噪声标准差。

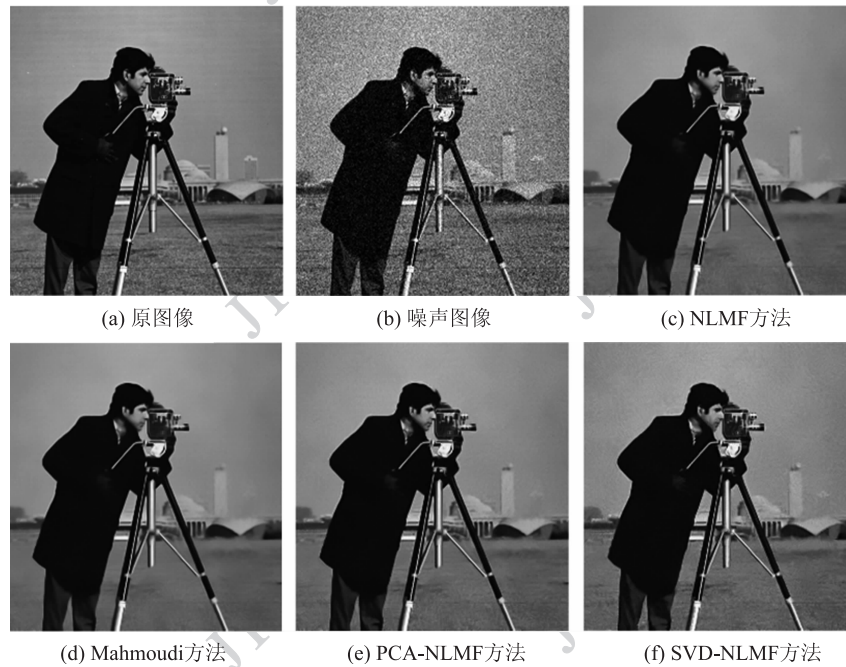
图 5 Man 图像滤波效果比较($\sigma = 20$)

Fig. 5 Comparison of filtering results

表 2 滤波结果的 PSNR、MSSIM 比较

Table 2 Performance (PSNR, MSSIM) comparison

σ	测试图像	σ_e	噪声图像		NLMF		Mahmoudi		PCA-NLMF		SVD-NLMF	
			PSNR/dB	MSSIM	PSNR/dB	MSSIM	PSNR/dB	MSSIM	PSNR/dB	MSSIM	PSNR/dB	MSSIM
10	Lena	10.17	28.15	0.687 6	34.92	0.916 2	34.75	0.906 9	35.17	0.925 6	35.26	0.937 9
	Barbara	10.19	28.14	0.784 7	33.79	0.946 2	33.54	0.918 1	33.92	0.958 7	34.15	0.972 4
	House	10.25	28.14	0.652 2	35.28	0.903 6	35.03	0.882 3	35.37	0.9144	35.48	0.917 3
	Man	9.91	28.16	0.679 8	31.92	0.910 7	31.59	0.894 6	32.11	0.922 5	32.31	0.935 5
20	Lena	20.48	22.13	0.438 8	31.33	0.831 9	30.97	0.814 3	31.59	0.852 6	31.74	0.869 8
	Barbara	19.79	22.12	0.575 1	30.06	0.872 6	29.76	0.852 6	30.37	0.890 5	30.54	0.917 3
	House	19.86	22.14	0.418 5	32.59	0.831 4	32.33	0.815 7	32.75	0.846 1	32.83	0.855 5
	Man	19.76	22.15	0.478 1	29.51	0.831 8	29.36	0.819 5	29.62	0.844 3	29.75	0.853 2
40	Lena	38.94	16.08	0.234 2	28.47	0.690 2	28.16	0.669 6	28.64	0.697 3	28.79	0.711 5
	Barbara	38.79	16.05	0.346 6	26.69	0.739 0	26.42	0.713 2	26.83	0.749 5	26.98	0.762 9
	House	39.17	16.11	0.406 1	29.56	0.680 5	29.38	0.667 9	29.67	0.689 4	29.79	0.703 6
	Man	39.84	16.06	0.304 9	26.07	0.687 1	25.87	0.669 8	26.23	0.697 3	26.36	0.717 7

表 3 给出了 4 种方法的滤波耗时。所用图像为 Man (256×256) 和 Lena (512×512) 图像, 搜索窗口 SW 分别取 13×13 与 21×21 , 噪声标准差为 20。滤波耗时由 Matlab 程序在 Pentium 2.6 GHz 计算机上通过多次平均得到。从表 3 中可以看出, NLMF 方法耗时明显高于其他 3 种方法; Mahmoudi 方法的耗时最少, Mahmoudi 方法滤波耗时基本上由预选阈

值决定, 并受噪声水平影响, 不能有效地解决滤波性能与运行速度之间的矛盾; SVD-NLMF 方法耗时少于 NLMF 方法与 PCA-NLMF 方法。从表 3 中也可以看出, 当图像或搜索窗口增大时, PCA-NLMF 方法耗时增加较明显, 这是由于随着图像、搜索窗口的增大, PCA 提取特征向量要消耗较多的时间, 而 SVD-NLMF 方法的额外开销较小。

表3 滤波方法的运算耗时

Table 3 Computation time comparison

	/s			
	Man(256×256)		Lena(512×512)	
	13×13	21×21	13×13	21×21
NLMF	35.11	99.99	160.18	435.88
Mahmoudi	9.19	28.42	47.65	116.35
PCA-NLMF	13.36	37.52	73.06	197.72
SVD-NLMF	12.34	31.69	55.76	136.61

6 结论

本文提出了一种基于梯度域 SVD 的有效非局部图像滤波方法,即 SVD-NLMF。文中采用梯度域 SVD 提取图像中局部区域结构信息,在此基本上构造了一种鲁棒的、有效的局部结构描述子,通过实验验证了结构描述子提取的特征能够较好地反映图像不同区域的内容;接着利用提取的特征分析了相似集大小与算法滤波性能的关系,给出自动选取相似集中元素的方法;最后分析了滤波参数对滤波性能的影响,提出一种基于图像内容的局部自适应滤波参数选取方法。通过多组实验比较了 SVD-NLMF 方法与 NLMF 方法、Mahmoudi 方法与 PCA-NLMF 方法的滤波性能。实验结果表明,SVD-NLMF 方法滤波后图像在视觉效果和客观评价指标方面都优于对比方法,且运行速度较快。因此,本文提出的 SVD-NLMF 方法能够取得滤波性能与运行速度之间较好的平衡,是一种有效的滤波方法。

参考文献(References)

- [1] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision. New Delhi: N. K. Mehra for Narosa Publishing House, 1998:839-846.
- [2] Chan T F. The digital TV filter and nonlinear denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10 (2):231-241.
- [3] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San

Diego, CA, USA: IEEE, 2005:60-65.

- [4] Mahmoudi M, Sapiro G. Fast image and video denoising via nonlocal means of similar neighborhoods [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(12):839-842.
- [5] Coupé P, Yger P, Prima S, et al. An optimized blockwise nonlocal means denoising filter for 3-D magnetic images [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2008, 27(4):425-441.
- [6] Ramanathan V, Byung T O, C.-C Jay Kuo. Fast Non-Local means (NLM) computation with probabilistic early termination [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(3):277-280.
- [7] Tasdizen T. Principal neighborhood dictionaries for nonlocal means image denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(12):2649-2660.
- [8] Zheng Y H, Sun Q S, Xia D S. An efficient 2DPCA-based non-local means filter [J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(10):1379-1389. [郑钰辉, 孙权森, 夏德深. 基于 2DPCA 的有效非局部滤波方法 [J]. 自动化学报, 2010, 36(10):1379-1389]
- [9] Dimitri Van D V, Michel K. SURE-Based Non-Local means [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(11):873-876.
- [10] Brox T, Kleinschmidt O, Cremers D. Efficient nonlocal means for denoising of textural patterns [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(7):1083-1092.
- [11] Sun W F, Peng Y H. An improved non-local means de-noising approach [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4):923-928. [孙伟峰, 彭玉华. 一种改进的非局部平均去噪方法 [J]. 电子学报, 2010, 38(4):923-928]
- [12] Wang Z M, Zhang L. An adaptive fast non local image denoising algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4):669-675. [王志明, 张丽. 自适应的快速非局部图像去噪算法 [J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4):669-675]
- [13] Feng Xi G, Peyman M. Multiscale principal components analysis for image local orientation estimation [C]//Proceedings of 36th Asilomar Conference Signals, System, and Computers. Pacific Grove, CA, USA: IEEE, 2002:478-482.
- [14] Takeda H, Farsiu S, Milanfar P. Kernel regression for image processing and reconstruction [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2):349-366.
- [15] Brox T, Cremers D. Iterated nonlocal means for texture restoration [C]//Proceedings of 1st International Conference on Scal Space and Variational Methods in Computer Vision. New York: Springer, 2007, 4485:13-24.
- [16] Aishy A, Eric D. Fast and reliable structure-oriented video Noise Estimation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(1):113-118.