

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **5**
Vol.17 No.

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5月 第17卷 第5期(总第193期)

目次

综述

- 中国图像工程:2011 章毓晋(603)
- 植物叶片表面质感建模与真实感绘制研究进展 田原,赵春江,陆声链,郭新宇(613)

图像处理和编码

- 高位有效位概率算术解码的图像密写改进算法 马丽红,吕先明,高小满(621)
- 滑动平均和改进权重函数的快速非局部平均图像去噪算法 熊波,尹周平(628)
- 提升小波的同态滤波在图像烟雾弱化中的应用 范有臣,李迎春,韩意,张来线(635)

图像分析和识别

- 基于彩色模型的重构标记分水岭分割算法 张桂梅,周明明,马珂(641)
- 均衡化特征匹配的非刚体细胞形态跟踪 陈莹,艾春璐(648)
- 图像斑状特征位置与尺寸的自动检测 王志衡,刘红敏(656)
- 改进极化白化滤波的边缘检测 邓少平,张继贤,李平湘,黄国满(665)
- 联合特征在行人检测中的应用 杨阳,杨静宇(671)
- Gabor 相位特征的人脸光照不变量提取 范春年,张福炎(676)

图像理解和计算机视觉

- 保持几何特征的自适应弹性二次曲线模型 蒋建国,郝世杰,郭艳蓉,詹曙,李鸿(682)
- 局部颜色映射的彩色夜视算法 钱小燕,张天慈,王帮峰,黄圣国(689)
- 结合分支定界法和线性规划的摄像机位姿估计 马文娟(694)

金字塔评分改进主方向模板匹配的实时目标检索 洪朝群,朱建科,李娜,卜佳俊,陈纯(700)

计算机图形学

类曲率在曲线相似性判定中的应用 于昊,赵乃良,陈小雕(707)

虚拟现实与增强现实

人机系统中视域评估的可视化 李倩,吉晓民,林文周(715)

遥感图像处理

小波方向子带偏微分方程遥感图像去噪 王相海,李放,王爽(721)

遥感图像理想均衡化及图像质量定量评价 孟天佑,汪云甲(729)

地理信息技术

点要素扇形缓冲区的设计与应用 侯景伟,孔云峰,张迪,吕可文(740)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第5期

2012年5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

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 5 May 2012

Contents

Review

- Image engineering in China: 2011 Zhang Yujin (603)
- Advances in appearance modeling and photorealistic rendering of plant leaves
..... Tian Yuan, Zhao Chunjiang, Lu Shenglian, Guo Xinyu (613)

Image Processing and Coding

- Most significant bits probability arithmetic decoding for improved image steganography
..... Ma Lihong, Lv Xianming, Gao Xiaoman (621)
- Fast non-local means for image de-noising on moving average and modified weight function Xiong Bo, Yin Zhouping (628)
- Weakening of smoke for homomorphic filtering Fan Youchen, Li Yingchun, Han Yi, Zhang Laixian (635)

Image Analysis and Recognition

- Image segmentation algorithm for reconstruction labeling watershed in color space Zhang Guimei, Zhou Mingming, Ma Ke (641)
- Non-rigid cell contour tracking method for balanced feature matching Chen Ying, Ai Chunlu (648)
- Automatically detecting position and size of blob features in images Wang Zhiheng, Liu Hongmin (656)
- Improved polarimetric whitening filter for edge detection Deng Shaoping, Zhang Jixian, Li Pingxiang, Huang Guoman (665)
- Pedestrian detection based on compound feature Yang Yang, Yang Jingyu (671)
- Illumination invariant extraction on Gabor phase Fan Chunnian, Zhang Fuyan (676)

Image Understanding and Computer Vision

- Adaptive geometrical-feature-preserving elastic quadratic wire model
..... Jiang Jianguo, Hao Shijie, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong (682)
- Color night vision algorithm based on local color mapping ... Qian Xiaoyan, Zhang Tianci, Wang Bangfeng, Huang Shengguo (689)
- Camera pose estimation using branch and bound method with linear programming Ma Wenjuan (694)
- Real-time object retrieval with dominant orientation template matching improved by pyramid scoring
..... Hong Chaoqun, Zhu Jianke, Li Na, Bu Jiajun, Chen Chun (700)

Computer Graphics

- Quasi-curvature and its application in similarity measurement of curves
..... Yu Hao, Zhao Nailiang, Chen Xiaodiao (707)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Visualization of the visual range assessment in man-machine system Li Qian, Ji Xiaomin, Lin Wenzhou (715)

Remote Sensing Image Processing

- Remote sensing image de-noising on partial differential equation in wavelet directional subband
..... Wang Xianghai, Li Fang, Wang Shuang (721)
- Ideal equalization of remote sensing images and quantitative assessment of image quality Meng Tianyou, Wang Yunjia (729)

Geoinformatics

- Design and applications of sector buffers for point feature
..... Hou Jingwei, Kong Yunfeng, Zhang Di, Lv Kewen (740)

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)05-0628-07

论文引用格式: 熊波, 尹周平. 滑动平均和改进权重函数的快速非局部平均图像去噪算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 628-634

滑动平均和改进权重函数的快速非局部 平均图像去噪算法

熊波, 尹周平

华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074

摘要: 非局部平均算法(NL-means)是一种有效的高斯噪声去除方法, 由于其实现时效率低下, 很难应用到实际中。针对非局部平均算法的低效率问题, 提出一种快速的非局部平均去噪算法(FNLM)。首先, 为了实现对算法的加速, 采用滑动平均和权重对称技术。其次, 算法在加速时一般会影响到去噪效果, 为了使算法加速的同时保证去噪效果, 提出一种改进的权重计算函数。最后, 对新算法进行了一定的实验分析, 实验结果显示提出的快速算法FNLM与原始的非局部平均算法相比, 效率得到了很大提升, 与其他的经典算法相比, 在效率和效果上都非常有竞争力。

关键词: 图像去噪; 非局部平均; 滑动平均; 稳健估计

Fast non-localmeans for image de-noising on moving average and modified weight function

Xiong Bo, Yin Zhouping

Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: The non-localmeans (NL-means) algorithm provides a powerful framework for removing Gaussian noise. However, it is computationally impractical. In order to accelerate the algorithm, we use a moving average and weight symmetry in this paper. Speeding up the algorithm sometimes may reduce the quality, so we propose a modified weight function for calculating the weights. Finally, numerical results reveal that the proposed algorithm is faster than the original non-localmeans, and is also very competitive to most of the state-of-the-art algorithms in terms of both the PSNR and the subjective visual quality.

Key words: image de-noising; non-localmeans; moving average; robust M-estimator

0 引言

图像去噪^[1]在很多图像应用中是非常关键的一个图像预处理技术。图像去噪效果的好坏直接影响着后续的图像操作, 如目标识别、边缘提取和图像分析等。在近半个世纪中, 图像去噪是数字图像处理

技术中最基本、研究最为广泛的问题之一, 目前为止仍然有很多问题没有得到解决。图像去噪的目的是从噪声数据中恢复出原始图像或者得到其最佳估计。基于这个目的, 大量的去噪算法得到了发展, 比如全变分最小化方法^[2]、双边滤波器^[3]和基于小波的方法^[4-8]等, 关于图像去噪的综述可阅读参考文献^[1-9]。

收稿日期: 2011-06-13; 修回日期: 2011-11-07

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51035002); 国家重点基础研究发展规划(973)计划项目(2009CB724204)

第一作者简介: 熊波(1984—), 男, 华中科技大学机械科学与工程学院机械电子工程专业在读博士研究生, 主要研究方向为图像去噪, 及其他图像恢复相关技术。E-mail: bo.xiong.htf@gmail.com

在文献[1]中提出一种新的去噪算法,即非局部平均算法(NL-means),并得到了较好的效果。不同于以前的基于局部正则性假设的去噪算法,NL-means利用了整幅图像的相关性。在恢复图像中每一个像素时,都是通过对图像中的所有像素进行加权平均而得到的;同时,每一像素对应的权重计算依赖于被处理像素的局部邻域与其他像素的局部邻域之间的相似性程度,而不再是通过比较单个像素而获得。该算法的基本思想源自于图像中一般会表现出自相似性,也就是在图像中的不同地方会有很多相似的结构。但是如果按照文献[1]中的思想来实现NL-means效率会非常低下,使得该算法很难应用到实际中。巨大的计算复杂性主要是由于权重的计算而造成的。最初,文献[1]中提出了加速方法,通过限制相似结构的搜索区域,而不是搜索整个图像来加速算法。在此基础上,后续出现了很多对该算法加速的方法,比如基于均值和梯度的相似性结构的预选择方法^[10],基于均值和方差的方法^[11],基于树的聚类方法^[12],以及基于奇异值分解的方法^[13]。虽然这些方法在一定程度上实现了对NL-means的加速,但是它们都在算法中加入了额外的步骤来实现对相似性结构的预选择或预分类,并且这些步骤会花费一定的时间,甚至有些会非常耗时,比如文献[10-13],如果把这些时间加入整个算法的时间中去,最后的加速效果是非常有限的。在国内也有一些学者对该算法进行了研究^[14-15]。

NL-means的另外一个问题是如何选择最优的权重计算函数,而不仅仅是简单的选用原算法中的指数权重函数。在文献[16-17]中通过引入稳健统计学中的稳健估计函数来代替原始的指数函数,得到比较好的效果。本文中也将稳健估计理论框架的基础上,提出一个改进的权重计算函数。

据上所述,本文将提出一种快速的NL-means算法(FNLM),主要体现在如下两个方面:1)使用滑动平均滤波和权重对称技术实现对NL-means算法的加速;2)在稳健估计的框架上,提出一种改进的权重计算函数,保证算法的去噪效果。最后通过实验表明,提出的FNLM算法与一些经典的算法相比,比如BLS-GSM^[6](Bayes least squares-Gaussians scale mixtures),PPB^[18](probabilistic patch-based)和K-SVD^[19](generalizing the K-means),不论是在数值评价指标上,还是在主观图像质量上,都非常有竞

争力。

1 Non-localmeans 和稳健估计

1.1 Non-localmeans 算法

考虑噪声模型

$$y = x + n \quad (1)$$

式中, $x \in \mathbf{R}^N$ 是原始图像的向量表示, n 表示均值为0方差为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 的高斯白噪声, y 表示观测得到的受噪声污染的图像。在每个索引位置*i*处的恢复像素 $\hat{x}(i)$ 通过对图像中所有像素进行加权平均而得到(所有像素的集合记为 \mathbf{I})

$$\hat{x}(i) = \frac{\sum_{j \in \mathbf{I}} w(i,j)y(j)}{\sum_{j \in \mathbf{I}} w(i,j)} \quad (2)$$

式中,权重 $w(i,j)$ 表示每一对像素的邻域之间的相似程度,并通过下式进行计算:

$$w(i,j) = \exp\left(-\frac{\|y(N_i) - y(N_j)\|_{2,a}^2}{h^2}\right) \quad (3)$$

式中, h 控制着权重的衰减速度,也就是最后的平滑程度,一般与噪声的方差成比例。 $y(N_i)$ 是整个邻域像素的向量表示, $y(N_i) := (y(j)), j \in N_i$ 定义了像素*i*的邻域,一般是在*i*周围的一个方形块,也称为图像块(image patch)。在式(3)中进行相似性度量使用的是欧几里得距离,并使用一个均值为0、方差为*a*的高斯核进行加权。

1.2 稳健估计

稳健估计起源于极大似然估计,通过将极大似然估计的对数似然函数中的平方项用一个多变量的稳健损失函数 $\rho(x)$ 进行替代,得到

$$\hat{x}(i) = \arg \min_x \sum_{j=1}^N \rho(x - y(j)) \quad (4)$$

如果 $\rho(x)$ 是可微的,对式(4)进行微分则有

$$\sum_{j=1}^N \psi(x - y(j)) = 0 \quad (5)$$

式中, $\psi = \rho'$,让

$$W(x) = \begin{cases} \psi(x) & x \neq 0 \\ x & x = 0 \\ \psi'(0) & x = 0 \end{cases} \quad (6)$$

则式(5)可以写为

$$\sum_{j=1}^N W(x - y(j))(x - y(j)) = 0 \quad (7)$$

则式(7)的解为

$$\hat{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^N w(i,j)y_j}{\sum_{i=1}^j w(i,j)} \quad (8)$$

$$w(i,j) = W(y(i) - y(j)) \quad (9)$$

从以上可以看出,式(8)(9)与 NL-means 的式(2)(3)非常相似。如果让 $\rho(x)$ 为 Welsch 稳健估计函数,则有

$$W(x) = \exp\left(-\frac{\|x\|^2}{h^2}\right) \quad (10)$$

可以看到该权重公式与 NL-means 的权重公式在本质上是一样的。因此通过稳健估计与 NL-means 之间的关系,可以很容易使用其他稳健估计函数,并在稳健估计的理论框架上发展更多的权重计算函数。

2 快速的 NL-means 算法

本文提出快速 NL-means 算法(FNLM)的目的是在加速原始 NL-means 算法的同时尽可能地保持算法的去噪效果。为了实现该目的,FNLM 算法主要做了如下两个改进:采用滑动平均滤波和权重对称技术实现加速;利用改进权重函数计算权重来保证算法的效果。

2.1 加速技术

原始 NL-means 算法的复杂度为 $O(N^2)$,其中 N 是图像中像素的总个数。下面是对原始算法速度的一个直观认识:对于一个 512×512 的图像,在 P4 3.0 GHz 内存为 1 024 MB 上需要 5 h 20 min 的时间^[20],因此将原始的 NL-means 应用到实际中是不切实际的。为了实现对 NL-means 的加速,FNLM 采用了滑动平均和权重对称技术。

2.1.1 权重对称技术

NL-means 算法高复杂度主要在于在去噪过程中需要对所有像素的权重进行计算,这花费了大量的时间。因此减少权重的计算次数在加速算法上起着非常关键的作用。大多数的向量距离测度是对称的

$$\|N_i - N_j\|^2 = \|N_j - N_i\|^2 \quad (11)$$

也就是有 $w_{i,j} = w_{j,i}$ 。根据该对称性质,在式(3)中定义的权重也同样是对称的,那么整个的权重计算次数可以减少 1/2。由于权重计算是花费时间最多的,所以这样对算法的加速也接近两倍。

首先,定义两个矩阵:权重归一化矩阵 W 及累加贡献矩阵 C ,矩阵大小与输入图像的大小一致。

在算法的开始,将它们初始化为 0。当处理像素 i ,计算来自像素 j 的贡献时,将得到的 $w(i,j)y_j$ 和 $w(i,j)y_j$ 分别存入矩阵 C 中对应的 j 和 i 位置。同样权重归一化矩阵 W 在对应的位置根据权重 $w(i,j)$ 进行累加。因此,当处理像素 j 时,不再需要计算 $i < j$ 这些像素点的权重,仅仅只需要计算 $i > j$ 这些像素点的权重。最后,只需要将累加贡献矩阵 C 的元素与矩阵 W 中对应位置的元素进行归一化,即可得到最后的恢复图像。

2.1.2 基于滑动平均的快速权重计算算法

在数字信号处理中,滑动平均的应用是非常普遍的。因为滑动平均非常简单,对于降低随机噪声,其是最优的选择之一。另外滑动平均可以快速地实现。对于基于欧几里得距离 $\|y_i - y_j\|$ 的权重函数,当考虑一个常数的位置增量 Δi ,即 $j = i + \Delta i$ 时,函数

$$\beta(i) = \|y_i - y_{i+\Delta i}\|^2 \quad (12)$$

可以通过滑动平均进行计算,对于 1 维信号,如果 y_i 的长度为 $2K + 1$,此时通过滑动平均来计算式(12)只需要两个像素而不是 $2K + 1$ 个,这显然可以降低很多时间。对于 2 维图像,可以直接将滑动平均扩展过来,这样就可以很大程度上加快权重的计算速度。

2.2 权重函数的改进

据上所述和文献[16-17],NL-means 与稳健估计是相关的。因此可以将稳健估计中的权重函数引入 NL-means 中。对于每一个像素而言,在整幅图像中可能有很多不相似的块,就像异常数据一样。对于这些异常块,在恢复时,应该分配的权重越小越好,或者为零,但是在原始的 NL-means 中使用的是指数形式的权重函数,如式(3)所示,它们对于这样的异常块仍然分配了比较小的权重,这些异常块对去噪的影响非常小。但是,如果某个处理的像素,与它不相似的块非常多时,这些小的权重值总和就会比较大,它们对去噪的影响就不能再被忽略了,同时,这些异常块会对去噪过程产生不利的影

响。指数函数的衰减形式如图 1 所示,一般属于软下降类(soft redescending norm)。为了增加算法鲁棒性和更好的去除噪声,尽量避免上面分析出现的情况,权重函数的衰减速度应该更快一些,理论上应该属于硬下降类(hard redescending)。在文献[21]中,作者比较了多种不同的稳健权重函数,并指出 Tukey's Bisquare 稳健估计函数对异常数据的处理是最好的。为了更好的适应异常数据,本文在

Bisquare 权重函数的基础上提出一个改进的权重函数,其形式为

$$\rho(x) = \begin{cases} \frac{h^2}{6} \left(1 - \left[1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right]^3 \right) \\ \frac{h^2}{6} \end{cases} \quad (13)$$

$$W(x) = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right]^6 \\ 0 \end{cases} \quad (14)$$

以保证有更快的衰减速度。常见的稳健估计函数的简单介绍以及改进的函数如表 1 所示,它们对应的函数图如图 1 所示。从图中可以看出,原算法中的指数函数具有最慢的衰减速度,改进的权重函数的衰减速度最快,具有最陡峭的斜率。第 3 节将通过实验分析这些函数分别用于 NL-means 的性能,并进行简单比较。

表 1 常见稳健估计函数以及改进权重函数

Table 1 A simple overview of robust M-estimator functions and modified function

类型	$\rho(x)$	$W(x)$
Welsch	$\frac{h^2}{2} \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right) \right)$	$\exp \left(- \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right)$
Cauchy	$\frac{h^2}{2} \log_2 \left(1 + \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right)$	$\frac{1}{1 + (x/h)^2}$
Bisquare	$\begin{cases} \frac{h^2}{6} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right)^3 \right] \\ h^2/6 \end{cases}$	$\begin{cases} \left[1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right]^2 \\ 0 \end{cases}$
修改的函数	$\begin{cases} \frac{h^2}{14} \left(1 - \left[1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right]^7 \right) \\ h^2/14 \end{cases}$	$\begin{cases} \left[1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right]^6 \\ 0 \end{cases}$

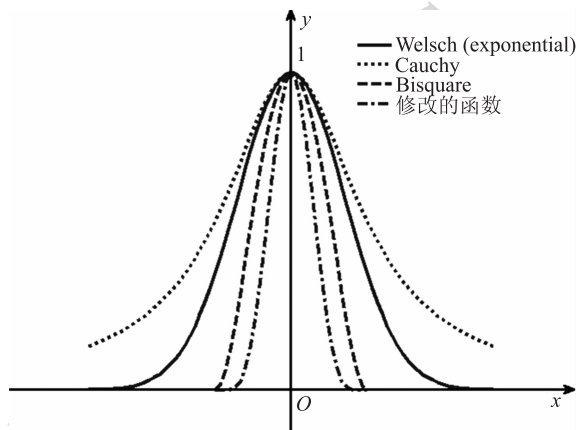


图 1 稳健权重函数与改进权重函数图形

Fig. 1 Comparison of the commonly used robust weight functions and the modified weight function

3 改进算法的实现与参数分析

在该部分将对算法的参数进行一定的分析。根据原始的 NL-means 和前一个部分的描述, FNLM 算法的实现可以简单地描述如下:

1) 选择算法的参数: 搜寻窗口大小 W (实际大小为 $(2W+1) \times (2W+1)$), 图像块的大小 K (实际大小为 $(2K+1) \times (2K+1)$), 控制平滑程度的参数 h ;

2) 使用滑动平均和权重对称技术, 根据改进的权重函数计算权重, 得到矩阵 W 和 C ;

3) 根据步骤 2) 中的矩阵 W 和 C 得到去噪图像。

根据该算法框架, 可以有多种不同的变形。在步骤 2) 中, 可以使用不同权重计算函数, 比如表 1 中所示的函数。理论上只要是对称的, 在对称中心取得极大值, 并在对称轴右边为单调递减的函数都可以用来计算权重。另外, 可以看到在算法中有很多重要的参数需要通过实验确定, 如 h, W 和 K 。参数 h 控制着平滑的程度, 太大则会导致输出的图像过平滑, 损失过多的图像细节; 太小又会导致去噪效果不理想, 虽然能保存更多的图像细节。窗口搜寻大小 W 和图像块大小 K 控制着算法的速度, 对去噪的质量也会有一定的影响, 下面将会对这些参数进行分析。

3.1 参数选择

对于不同的权重函数, 参数 h 的选择是不一样的, 并且它随着噪声的标准差而改变, 一般与噪声的标准差之间会存在近似的线性关系, 即 $h = k\sigma$, 其中对每一个权重函数而言 k 的取值在一个相对固定的区间内。通过大量的实验, 不同权重函数的 h 合理取值如表 2 所示。

表 2 不同权重函数的参数 h 取值

Table 2 The value of h for different weight functions

权重函数	$h = k\sigma$	参数选择
指数函数	$h = 0.7\sigma \sim 0.9\sigma$	$h = 0.75\sigma$
Bisquare	$h = 1.7\sigma \sim 1.9\sigma$	$h = 1.75\sigma$
修改的函数	$h = 2.2\sigma \sim 2.4\sigma$	$h = 2.35\sigma$

参数 W 和 K 对算法的速度和去噪效果都有影响, 所以在实际选取时, 需要根据不同的目的而选

取不同的参数值。如果希望速度快一些,可以选取相对小的 W 和 K ,反之则选择相对大一些的,最后在两者之间找到一个好的平衡。另外这两个参数满足如下基本条件 $W \geq K$,同时为了能得到图像中的精细结果, K 不能取太大的值,一般取 $K = 3$ 。在实验中,采用标准的 Lena 图像,通过加入高斯白噪声,其中标准差的取值为 $\sigma \in \{25, 50, 80\}$ 。关于参数 W 不同取值的实验结果如表 3 所示。

表 3 参数 W 对使用改进权重函数的算法的性能和速度的影响

Table 3 The influence of searching window size W on the performance of the algorithm with modified weight function in terms of PSNR and time

搜寻窗 口大小	$\sigma = 25$		$\sigma = 50$		$\sigma = 80$	
	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s
$W = 5$	30.71	5.70	27.10	5.60	24.63	5.65
$W = 6$	30.74	7.85	27.22	7.81	24.85	8.06
$W = 7$	30.64	10.5	27.32	10.41	24.95	10.52
$W = 8$	30.61	13.51	27.29	13.45	24.83	13.71
$W = 9$	30.53	16.81	27.12	16.93	24.85	16.86
$W = 10$	30.50	20.95	27.13	20.28	24.71	20.81

从表 3 中可以明显地看出,随着 W 的增大,算法的速度变得越来越慢。算法的效果,在开始会随着 W 的增大提高比较多,当 W 超过一定值后,算法的效果变化很微弱,可以认为趋于稳定。从结果中可以看出,改进的算法非常快,只需要几十秒,而原始的算法需要几个小时^[20]。通过表 3,在后面的实

验中将选定如下参数 $W = 7, K = 3$ 。

3.2 不同权重函数的性能分析

如前部分所说,在算法中可以使用不同类型的权重函数。在该部分,将着重研究如下 3 个权重函数:原始的指数函数、Bisquare 函数和改进的权重函数。对于这 3 个函数,参数的选取如上所述。在实验中,使用了 3 个标准图像 Lena、Pepper 和 Barbara,加入的噪声为零均值高斯白噪声,其标准差的取值为 $\sigma \in \{25, 50, 80\}$ 。详细的实验结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出,改进权重的去噪效果是最好的,但是它所花的时间也是最多的。平均上,改进的权重与其他权重相比会有 0.2 dB 的提高。

4 实验结果

对于提出的 FNLM 算法,通过 3 幅标准 512×512 的图像, Lena、Pepper 和 Barbara,加入零均值高斯白噪声,标准差取值为 $\sigma \in \{25, 50, 80\}$,将其与 BLS-GSM^[6], PPB^[18] 和 K-SVD^[19] 进行了比较。算法测试环境为 MATLAB 7.8.0 (R2009a), Thinkpad T410, Core i7 M620, 4 GB 内存。实验结果如表 5 所示,可以看出,与这些算法相比, FNLM 非常有竞争力。虽然 FNLM 算法的 PSNR 比这些算法差一些,但是相差都非常小,而算法的速度比 PPB 和 K-SVD 都要快 5 倍左右,与 BLS-GSM 相当,在表中用加粗标示了最快的两个算法。为了进一步说明算法的去噪效果,图 2 列出了这些算法关于 Barbara 的恢复图

表 4 不同权重函数对 Lena, Pepper 和 Barbara 关于 PSNR 和时间的性能分析

Table 4 The performance of different weight functions with PSNR and time for Lena, Pepper, and Barbara

		$\sigma = 25$		$\sigma = 50$		$\sigma = 80$	
		PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s
Lena	修改的权重函数	30.64	10.5	27.32	10.41	24.95	10.52
	Bisquare 权重函数	30.39	7.23	27.47	7.39	25.07	7.30
	指数权重函数	30.52	7.57	27.19	7.50	24.72	7.47
Pepper	修改的权重函数	30.46	10.43	27.06	10.38	24.78	10.46
	Bisquare 权重函数	30.38	7.38	27.10	7.25	24.92	7.40
	指数权重函数	30.29	7.77	26.89	7.54	24.66	7.41
Barbara	修改的权重函数	29.31	10.20	25.37	10.34	23.10	10.29
	Bisquare 权重函数	28.98	7.20	25.42	7.33	23.00	7.37
	指数权重函数	29.15	7.59	25.16	7.39	23.03	7.49

表5 改进NL-means算法与PPB, BLS-GSM和K-SVD在PSNR和时间上的比较

Table 5 The comparison of improved NL-means with PPB, BLS-GSM, and K-SVD on PSNR and time

图像	噪声水平	FNLM (Proposed)		PPB		BLS-GSM		K-SVD	
		PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s
Lena	$\sigma = 25$	30.64	10.5	30.60	51.26	31.26	9.44	31.28	106.23
	$\sigma = 50$	27.32	10.41	27.55	52.04	28.21	9.34	27.79	54.50
	$\sigma = 80$	24.95	10.52	25.34	51.56	26.22	9.43	25.48	41.54
Pepper	$\sigma = 25$	30.46	10.43	30.58	50.88	31.14	9.16	31.43	102.37
	$\sigma = 50$	27.06	10.38	27.56	51.99	28.128	10.42	28.25	56.81
	$\sigma = 80$	24.78	10.46	25.18	52.76	25.92	10.45	25.51	42.37
Barbara	$\sigma = 25$	29.31	10.20	29.00	51.92	28.00	9.36	29.81	169.51
	$\sigma = 50$	25.37	10.34	26.05	52.50	24.62	9.05	25.43	73.70
	$\sigma = 80$	23.10	10.29	23.40	51.83	23.09	10.54	22.91	45.76

图2 不同算法对被标准差为 $\sigma = 25$ 的高斯白噪声污染的Barbara图像的恢复结果Fig. 2 The restored image of barbara with Gaussian noise $\sigma = 25$ by different algorithms

像,从图中可以看出, FNLM 算法的去噪质量不管是在 PSNR 还是在视觉质量上与它们相比都非常有竞争力。

5 结论

通过使用滑动平均和权重对称技术实现了对

NL-means 的加速,同时通过改进的权重函数保证了算法的去噪效果,增加了算法对异常数据的稳定性。对提出的 FNLM 中的参数进行了详细的分析,并得到了一些可靠有效的参数。大量的实验结果也显示,提出的 FNLM 算法的效率与原始算法相比得到了很好的提高,并与其他经典算法相比在速度和去噪效果上都很有竞争力。

参考文献 (References)

- [1] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image denoising algorithms, with a new one [J]. Multiscale Model. Simul. , 2005, 4(2) : 490-530.
- [2] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. Physica D, 1992, 60(1) : 259-268.
- [3] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C]//Proceedings of the. Computer Vision Sixth International Conference. Bombay, India: Narosa Publishing House, 1998 : 839-846.
- [4] Guerrero-Colon J A, Mancera L, Portilla J. Image restoration using space-variant Gaussian scale mixtures in overcomplete pyramids [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(1) : 27-41.
- [5] Luisier F, Blu T, Unser M. A new SURE approach to image denoising: Interscale orthonormal wavelet thresholding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(3) : 593-606.
- [6] Portilla J, Strela V. Image denoising using scale mixtures of Gaussians in the wavelet domain [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(11) : 1338-1351.
- [7] Fodor I K, Kamath C. Denoising through wavelet shrinkage: An empirical study [J]. Journal of Electronic Imaging, 2003, 12(1) : 151-160.
- [8] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3) : 613-627.
- [9] Katkovnik V, Foi A, Egiazarian K. From local kernel to nonlocal multiple-model image denoising [J] International Journal of Computer Vision, 2010, 86(1) : 1-32.
- [10] 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.
- [11] Coupe P, Yger P, Prima S. An optimized blockwise nonlocal means denoising filter for 3-D magnetic resonance images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 27(4) : 425-441.
- [12] 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.
- [13] Orchard J, Ebrahimi M, Wong A. Efficient nonlocal-means denoising using the SVD [C]//Proceedings of the. IEEE Int. Conference. on Image Processing. San Diego, California, USA: IEEE, 2008 : 1732-1735.
- [14] Yang X Z, Shen J, Fan L H. Structure-preserving speckle reduction of using nonlocal means filter [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(12) : 2443-2450. [杨学志, 沈晶, 范良欢. 基于非局部均值滤波的结构保持相干斑噪声抑制方法 [J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(12) : 2443-2450.]
- [15] 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.]
- [16] Peter D J, Govindan V K, Mathew A T. Nonlocal-means image denoising technique using robust M-estimator [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2010, 25(3) : 623-631.
- [17] Goossens B, Luong H, Pizurica A. An improved non-local denoising algorithm [R]//Proceedings of International. Workshop Local and Non-Local Approximation in Image Processing. Lausanne, Switzerland: TICSP, 2008 : 143-156.
- [18] Deledalle C A, Denis L, Tupin F. Iterative weighted maximum likelihood denoising with probabilistic patch-based weights [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(12) : 2661-2672.
- [19] Elad M, Aharon M. Image denoising via sparse and redundant representations over learned dictionaries [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(12) : 3736-3745.
- [20] Dauwe A, Goossens B, Luong H Q. A fast non-local image denoising algorithm [C]//Proceedings of the SPIE Electron Image. San Francisco, USA: SPIE, 2008 : 68120(1-8).
- [21] Black M J, Sapiro G, Marimont D H. Robust anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3) : 421-432.