

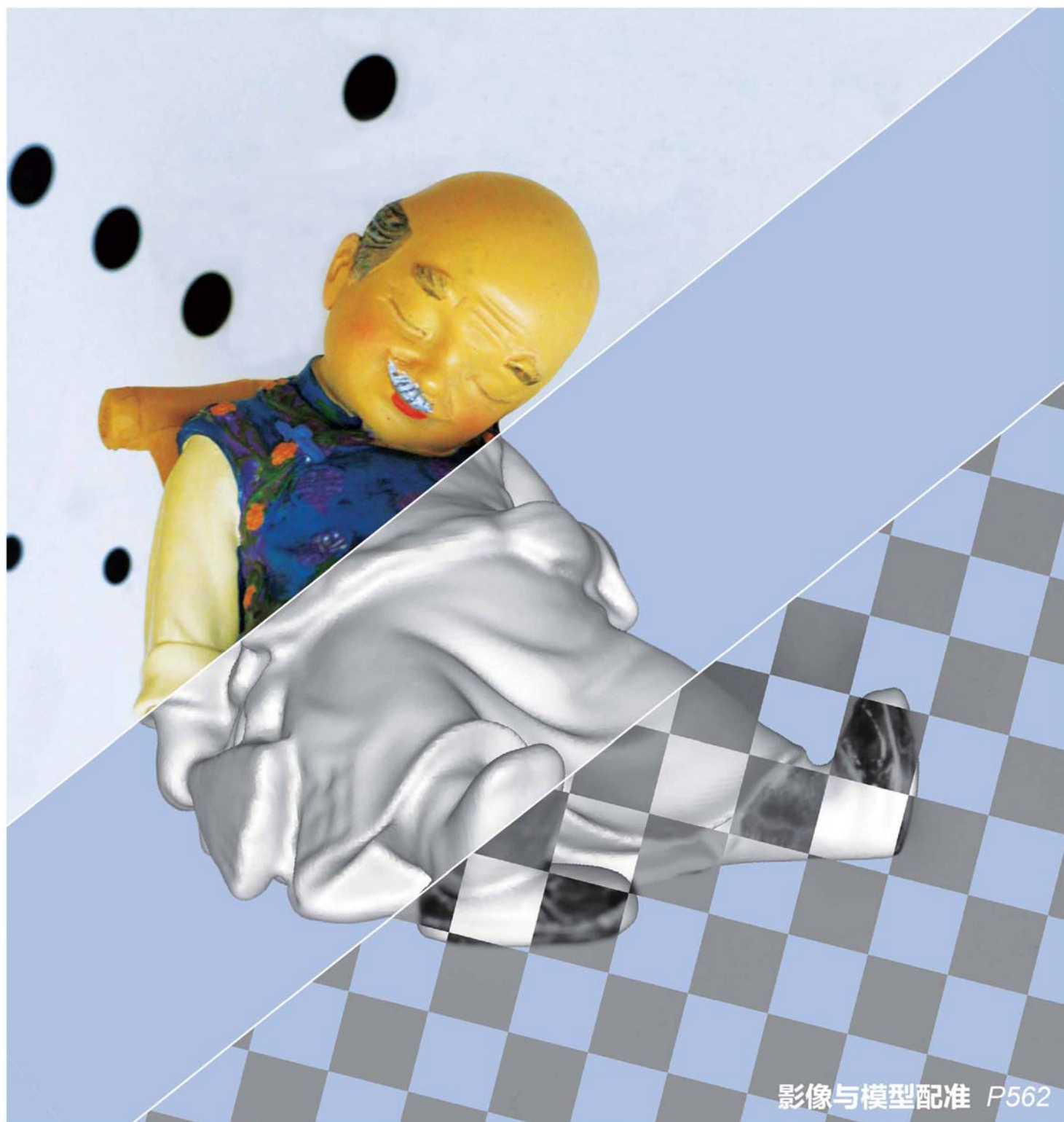


主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
04
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



影像与模型配准 P562



第19卷第4期（总第216期）

2014年4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@irsa.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

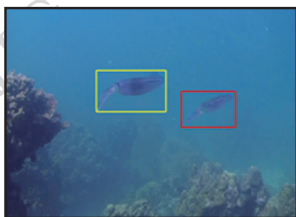
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

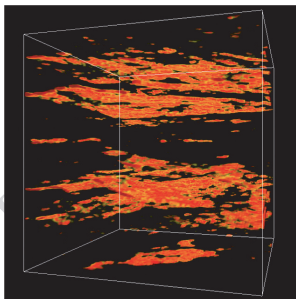
国内定价 50.00元



面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理(第512页)



融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪(第534页)



针对全空子数据体的GPU体绘制(第577页)

图像处理和编码

- 梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪
贾迪, 孟祥福, 张一飞, 董娜, 李思慧 0493
- 联合矩阵F范数的低秩图像去噪
刘新艳, 马杰, 张小美, 胡钊政 0502
- 面泊松融合结合色彩变换的无缝纹理辐射处理
周漾, 郑顺义, 黄荣永, 马电 0512
- 改进的局部方向模式纹理表示方法
刘海军, 常东超, 张凌宇 0520
- 图像插值空间大容量可逆数字水印算法
王继军 0527

图像分析和识别

- 融合视觉深度的特征计算与水下目标跟踪
王慧斌, 程勇, 陈哲 0534
- 融合颜色属性和空间信息的显著性物体检测
徐丹, 唐振民, 徐威 0541
- 采用人工鱼群的改进广义Hough变换目标定位
李志, 谢强 0549
- 非规则弯曲形变的不变量表示
李国祥, 夏国恩 0556

图像理解和计算机视觉

- 小物体3维重建中影像与几何模型的配准
郑顺义, 王晓南 0562
- 像素聚类改进二进制描述子鲁棒性
惠国保, 李东波 0569

计算机图形学

- 针对全空子数据体的GPU体绘制
李国和, 段忠祥, 吴卫江, 洪云峰, 刘智渊, 程远 0577

医学图像处理

- 基于无损水印的医学图像篡改检测和质量恢复
邓小鸿, 陈志刚, 毛伊敏 0583

遥感图像处理

- 特征点和不变矩结合的遥感图像飞机目标识别
曾接贤, 付俊, 符祥 0592
- 结合稀疏识别的自适应Wallis滤波在高分辨率影像控制点匹配中的应用
耿蕾蕾, 孙权森, 纪则轩, 刘佑鑫, 袁凯 0603

第9届和谐人机环境联合学术会议专栏

- 局部特征点的3维模型变换域水印算法
张建明, 周小梅, 王新宇, 詹永照 0613
- 足球视频搜索引擎中的用户偏好挖掘
胡雨成, 于俊清, 黄贤强, 何云峰, 管涛 0622
- 随机亮度差量化的二进制特征描述
庄东晔, 张冬明, 张勇东, 李锦涛 0630
- L_1 优化在网格去噪中的应用
王鹏, 王胜法, 曹俊杰, 李楠楠, 李波, 苏志勋 0637
- 多视点视频双向实时转码技术的设计与实现
孙立峰, 蔡飞飞, 杨士强 0645

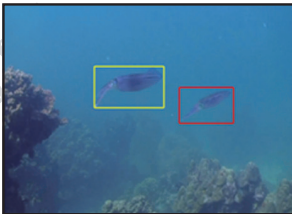
- 第五届数字地球高峰论坛征文通知 封三

CONTENTS

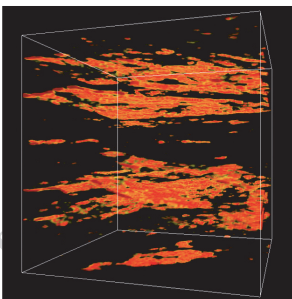
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing(P512)



Visual depth based feature calculation and underwater target tracking(P534)



GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks(P577)

Image Processing and Coding

Edge preserving denoising of color image through controlling the gradient vector Jia Di, Meng Xiangfu, Zhang Yifei, Dong Na, Li Sihui	0493
Image denoising of low-rank matrix recovery via joint Frobenius norm Liu Xinyan, Ma Jie, Zhang Xiaomei, Hu Zhaozheng	0502
Face-wise Poisson blending with color transfer in seamless texturing Zhou Yang, Zheng Shunyi, Huang Rongyong, Ma Dian	0512
Improved local directional pattern texture descriptor Liu Haijun, Chang Dongchao, Zhang Lingyu	0520
High capacity reversible watermarking for image interpolation space Wang Jijun	0527

Image Analysis and Recognition

Visual depth based feature calculation and underwater target tracking Wang Huibin, Cheng Yong, Chen Zhe	0534
Combining color names with spatial information for salient object detection Xu Dan, Tang Zhenmin, Xu Wei	0541
Improved generalized Hough transform using artificial fish swarm algorithm in target location Li Zhi, Xie Qiang	0549
The global descriptor for bending non-rigid shapes Li Guoxiang, Xia Guoen	0556

Image Understanding and Computer Vision

Images and geometric model registration in 3D reconstruction of small objects Zheng Shunyi, Wang Xiaohan	0562
Robust descriptor structured by pixel clustering Hui Guobao, Li Dongbo	0569

Computer Graphics

GPU-based volume rendering for full-empty subdata blocks Li Guohe, Duan Zhongxiang, Wu Weijiang, Hong Yunfeng, Liu Zhiyuan, Chen Yuan	0577
--	------

Medical Image Processing

Lossless watermarking algorithm for medical image's tamper detection and recovery with high quality Deng Xiaohong, Chen Zhigang, Mao Yimin	0583
---	------

Remote Sensing Image Processing

Aircraft target recognition in remote sensing images based on distribution of the feature points and invariant moments Zeng Jiexian, Fu Jun, Fu Xiang	0592
Adaptive enhancement via sparse recognition for automatic control point extraction in high-resolution images Geng Leilei, Sun Quansen, Ji Zexuan, Liu Jixin, Yuan Kai	0603

Special Issue on HHME 2013

Transform domain watermarking scheme of 3D models based on local feature points Zhang Jianming, Zhou Xiaomei, Wang Xinyu, Zhan Yongzhao	0613
User preference mining for soccer video search engine Hu Yucheng, Yu Junqing, Huang Xianqiang, He Yunfeng, Guan Tao	0622
Novel binary feature from intensity difference quantization Zhuang Dongye, Zhang Dongming, Zhang Yongdong, Li Jintao	0630
The application of l_1 -optimization in mesh denoising Wang Peng, Wang Shengfa, Cao Junjie, Li Nannan, Li Bo, Su Zhixun	0637
The design and implementation of real time MVC transcoding Sun Lifeng, Cai Feifei, Yang Shiqiang	0645

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)04-0493-09

论文引用格式: 贾迪, 孟祥福, 张一飞, 董娜, 李思慧. 梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(4): 493-501. [DOI:10.11834/jig.20140401]

梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪

贾迪¹, 孟祥福¹, 张一飞², 董娜¹, 李思慧¹

1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院, 葫芦岛 125105;

2. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004

摘要: 目的 在图像的获取过程中, 由于受到噪声等因素影响, 可能导致图像质量下降, 给后期处理带来困难, 为此提出一种梯度矢量扩散控制实现边缘保持的彩色图像去噪方法。方法 首先分析了彩色图像因灰度化带来的信息损失, 为了更好地利用彩色图像信息, 构造了 RGB 空间下的梯度矢量计算方法。其次分析了噪声邻域梯度矢量与边缘邻域梯度矢量间区域性结构差异, 并指出现有扩散方程的不足, 给出一种控制扩散矩阵的获取方法。最后通过推导矢量图像的边缘函数, 给出了 RGB 空间下的 PM 方程, 分解该模型去除法向扩散, 并结合控制扩散矩阵改进边缘停止函数, 以此获得更好的矢量扩散控制。结果 实验结果表明, 采用这种方法得到的处理结果有较高的信噪比, 验证了该方法的有效性。结论 本文方法能够在去噪的同时, 较好地保持图像对比度与边缘信息, 具备一定的实用性。

关键词: 图像去噪; 梯度矢量; 扩散方程; PM 模型; 方向扩散

Edge preserving denoising of color image through controlling the gradient vector

Jia Di¹, Meng Xiangfu¹, Zhang Yifei², Dong Na¹, Li Sihui¹

1. School of Electronic and Information Engineering Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China;

2. College of Information Science and Engineering, Northeast University, Liaoning Shenyang 110004, China

Abstract: **Objective** Due to the impact of the equipment and the environment, poor quality images could be generated inevitably in the process of image acquisition, which makes the later processing more difficult. In this paper, an edge preserving denoising method for color images through a controlling gradient vector is proposed. **Method** In order to make better use of the color image information, information loss is analyzed by transforming color images to gray image in the first step. Furthermore, the calculation method of a gradient vector in RGB space is proposed. Second, by analyzing regional structure differences of the noise gradient vector in a neighborhood and the edge gradient vector in a neighborhood, the inadequacy with diffusion equation is pointed out, and a method for controlling the diffusion matrix is proposed. Finally, PM equation in RGB space is proposed through the edge function derived by vector images, normal diffusion is removed by decomposition of model and improved edge stopping function with the controlling the diffusion matrix can make better control. **Result** The results show the proposed method has higher signal to noise ratio, and the effectiveness of it is verified. **Conclusion** This method can denoise image, and it could keep the image contrast and edge information at the same time, so it has some practicability.

Key words: image denoising; gradient vector; diffusivity equation; PM model; directional diffusion

收稿日期: 2013-09-23; 修回日期: 2013-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61003162); 辽宁省教育 2013 年杰出青年学者成长计划(LJQ2013038)

第一作者简介: 贾迪(1982—), 男, 讲师, 2011 年于东北大学获计算机应用专业博士学位, 主要研究方向为图像处理与模式识别。

E-mail: apple_jiadi@163.com

0 引言

图像在采集过程中会受到设备、环境等因素的影响引入噪声,使图像的质量下降,因此图像的去噪处理显得尤为重要。经典的滤波方法^[1]包括均值滤波、中值滤波、自适应维纳滤波、小波变换等,与这些方法相比,基于偏微分方程(PDE)的方法通过迭代,从更为细致的角度完成滤波,如在结构元素半径区域0的极限情况下,方向扩散等价于中值滤波。

PM 方程^[2]是 Perona 和 Malik 于 1990 年提出的各向异性扩散算法,通过分析物理学的扩散过程,引入“传导系数”,依赖于局部特征的想法,达到了在图像去噪的同时,保护边缘信息的目的。由于 PM 方程存在病态性质,Weickert 等人引入正则化的方法解决了这一问题,该模型称为 CLMC 模型^[3-4],并在数学上证明了它的稳定性。文献[5]在 PM 模型的基础上,通过对变分方法扩散方程中扩散系数改进,针对不同梯度大小采用不同的扩散系数,在一定程度上解决了小尺度噪声敏感和部分边缘与细节失真问题。文献[6]将均匀扩散曲面去噪模型和 PM 模型相结合,提出基于 PM 模型的曲面去噪模型,在使曲面光滑的同时,能够保持曲面边缘。文献[7]修改传导系数函数的敏感性,并根据滤波方程特点将模型分为平滑模块和抑噪模块,分离了平滑和抑噪两个物理过程,提升了图像的光滑性和降低了图像的噪声。文献[8]根据仿生学原理,通过对人类视觉特性的分析,建立简便和适应性强的梯度阈值估计模型来有效地控制扩散过程,给出了一种改进的各向异性滤波算法,并讨论了其离散实现问题。上述方法的共同点是只利用了图像的梯度值、阈值特征完成 PM 方程的改进,而仅依靠梯度值检测图像中的边缘部分是不够的,不能很好地将噪声与边缘区域进行区分,导致扩散随着迭代次数的增加腐蚀图像中的边缘信息。在彩色图像去噪方面,通常需要先将其转化为灰度图像,完成去噪后通过逆变换获得最终结果,这种方法在图像转化时将损失部分彩色信息,导致处理结果不够理想。

首先给出一种 RGB 空间下的图像梯度矢量计算方法。其次分解 PM 模型扩散方程,去除法向扩散,通过分析图像边缘区域与噪声区域的梯度矢量结构特征构造扩散控制矩阵 g_θ ,并结合 g_θ 构造新的边缘停止矩阵,使边缘区域的扩散速率有别于其他

区域,从而获得更好的局部扩散控制,实现在去除噪声的同时,更好地保护彩色图像边缘信息的目的。

1 RGB 空间下梯度矢量分析

彩色图像的梯度矢量检测通常需要先将其转化为相应的灰度图像,然而这一转化过程会损失部分彩色信息,图 1 给出了一组示例。

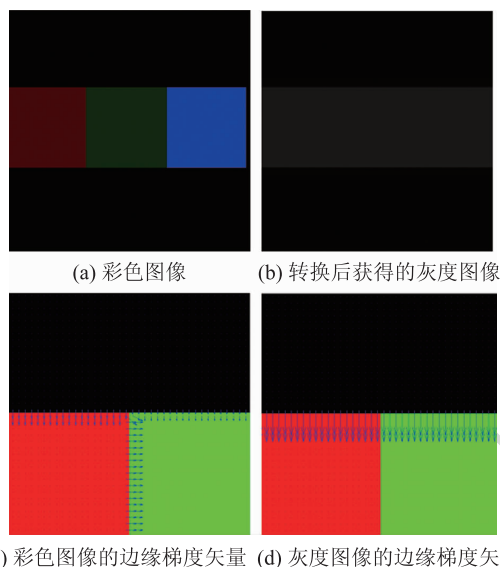


图 1 梯度矢量检测对比

Fig. 1 Contrast of gradient vector detection

图 1(a) 由 4 种颜色构成,每种颜色的 RGB 值分别为(0,0,0)、(76,0,0)、(0,39,0)、(0,0,200)。完成灰度图像转化的公式为

$$I_{\text{gray}}(x,y) = I(x,y,0) \times 0.299 + I(x,y,1) \times 0.587 + I(x,y,2) \times 0.114 \quad (1)$$

式中, $I(x,y,0)$ 、 $I(x,y,1)$ 与 $I(x,y,2)$ 分别为 (x,y) 位置上的 RGB 通道的像素值, $I_{\text{gray}}(x,y)$ 为转化后 (x,y) 位置上的像素灰度值。图 1(a)经式(1)处理得到相应的灰度图 1(b),其中红色、绿色、蓝色区域间的边缘部分没有在灰度图像中体现出来,这是由于转化后的像素值均是 23,因此这种转换是有损的,图 1(d)为图 1(b)相应的梯度矢量图,可见红色与绿色区域间的梯度矢量没有得到检测。为了能够直接在 RGB 空间下实现边缘检测,给出距离公式计算梯度矢量,即

$$(D_{i,j}, \theta_{i,j}) \Rightarrow \begin{cases} D_{i,j} = \sqrt{Dx_{i,j}^2 + Dy_{i,j}^2} \\ \theta_{i,j} = \arctan\left(\frac{Dy_{i,j}}{Dx_{i,j}}\right) \times \frac{180}{\pi} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Dx_{i,j} = \frac{\sum_{k=0}^2 |I(x_{i+1}, y_j, k) - I(x_{i-1}, y_j, k)|}{3} \\ Dy_{i,j} = \frac{\sum_{k=0}^2 |I(x_i, y_{j+1}, k) - I(x_i, y_{j-1}, k)|}{3} \end{cases}$$

$$1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$$

式中, $m \times n$ 为图像的大小, $Dx_{i,j}$ 为 (i,j) 位置上 x 方向的梯度, $Dy_{i,j}$ 为 (i,j) 位置上 y 方向的梯度, $(D_{i,j}, \theta_{i,j})$ 为 (i,j) 位置上的梯度矢量, 它由梯度值 $D_{i,j}$ 与梯度方向 $\theta_{i,j}$ 构成, k 为通道值。通过这种方法描述彩色图像信息, 得到图 1(c) 的梯度矢量描述。与图 1(d) 相比, 可以更好地描述彩色图像的梯度信息。

2 彩色图像局部控制扩散方程

2.1 彩色图像的 PM 方程

可将彩色图像看做 3 维矢量图像 $I(x, y)$ 。根据黎曼几何观点, 将其看做 Euclidean 空间中的一个以 (x, y) 为参数的超曲面。设 dI 为曲面 $I(x, y)$ 上的一个给定方向的弧长微元, 表达式为

$$\begin{aligned} dI &= (dI(1), dI(2), dI(3)) = \\ &\left(\frac{\partial I(1)}{\partial x} dx + \frac{\partial I(1)}{\partial y} dy, \frac{\partial I(2)}{\partial x} dx + \frac{\partial I(2)}{\partial y} dy, \frac{\partial I(3)}{\partial x} dx + \frac{\partial I(3)}{\partial y} dy \right) \quad (3) \\ |dI|^2 &= \langle dI, dI \rangle = \\ &E(dx)^2 + 2Fdx dy + G(dy)^2 \quad (4) \end{aligned}$$

式中

$$\begin{cases} E = \langle I_x, I_x \rangle = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial I(i)}{\partial x} \right)^2 \\ F = \langle I_x, I_y \rangle = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial I(i)}{\partial x} \frac{\partial I(i)}{\partial y} \\ G = \langle I_y, I_y \rangle = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial I(i)}{\partial y} \right)^2 \end{cases}$$

$$|dI|^2 = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}^T A \begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix}$$

矩阵 A 的特征值为

$$\lambda_{1,2} = \frac{(E+G) \pm \sqrt{(E-G)^2 + 4F^2}}{2} \quad (5)$$

令 v_1, v_2 分别为正交归一化向量, 则

$$v_1 = (\cos \theta, \sin \theta), v_2 = (-\sin \theta, \cos \theta)$$

可得

$$\begin{cases} E = \lambda_1 \cos^2 \theta + \lambda_2 \sin^2 \theta \\ F = (\lambda_1 - \lambda_2) \sin \theta \cos \theta \\ G = \lambda_1 \sin^2 \theta + \lambda_2 \cos^2 \theta \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{2F}{E-G}$$

式中, 夹角 θ 为 v_1 与 x 轴的夹角, 如图 2 所示。 $|dI|$ 值的变化与 v_1 和 v_2 相关, 图像 $I(x, y)$ 沿 v_1 方向变化最快, 变化率为 $\sqrt{\lambda_1}$, 沿 v_2 方向变化最慢, 变化率为 $\sqrt{\lambda_2}$ 。因此可将 $\lambda_1 - \lambda_2$ 看做彩色图像的变化率作用于 RGB 各通道上, 当 $I(x, y)$ 只有一个分量时, $E = I_x^2, G = I_y^2, F = I_x I_y$, 则

$$(E-G)^2 + 4F^2 = \left(\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} \right)^2 = |\nabla I|^2 \quad (7)$$

$$\lambda_1 = |\nabla I|^2, \lambda_2 = 0$$

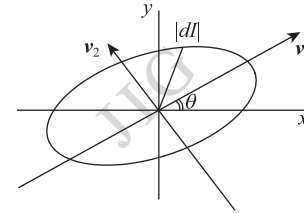


图2 $|dI|$ 的变化

Fig. 2 Change of $|dI|$

可见, v_1 即成为归一化梯度矢量, v_2 为等照度线的切矢量。因此给出彩色图像的 PM 方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(i)}{\partial t} &= \frac{\partial I(i)}{\partial \alpha} \left[g(\lambda_1 - \lambda_2) \frac{\partial I(i)}{\partial \alpha} \right] + \\ &\frac{\partial I(i)}{\partial \beta} \left[g(\lambda_1 - \lambda_2) \frac{\partial I(i)}{\partial \beta} \right] = \\ &g(\lambda_1 - \lambda_2) I(i)_{\alpha\alpha} + \\ &[g(\lambda_1 - \lambda_2) + g'(\lambda_1 - \lambda_2) |\nabla I(i)|] I(i)_{\beta\beta} = \\ &g(\lambda_1 - \lambda_2) I(i)_{\alpha\alpha} + \psi(\lambda_1 - \lambda_2) I(i)_{\beta\beta} \quad (8) \end{aligned}$$

如图 3 所示, α 为归一化梯度切向矢量, β 为归一化梯度法向矢量, $I(i)_{\alpha\alpha}$ 与 $I(i)_{\beta\beta}$ 分别为 $I(i)$ 对 α 和 β 求二次偏导数, $g(\lambda_1 - \lambda_2)$ 为矢量图像的边缘函数, 因此可将 PM 方程分解为两项。前项由切矢

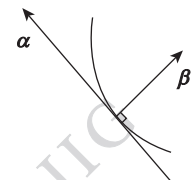


图3 α 与 β 关系图

Fig. 3 Relational graph of α and β

量构成,它将使热扩散按切向进行,后项由法矢量构成并在法向上扩散,由于法向扩散会加速边缘信息的扩散,因此去除法向扩散。 $g(\lambda_1 - \lambda_2)$ 的函数方程为

$$g(\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{1}{1 + ((\lambda_1 - \lambda_2)/K)^p}, p=1, 2 \quad (9)$$

从式(5)中 λ_1 与 λ_2 的求解上看,只考虑了图像的梯度信息,没有考虑边缘附近梯度矢量方向的规律性。图4(b)为图4(a)的局部放大梯度矢量图,从图中的梯度矢量看,边缘附近的矢量呈现出同方向性规律,如图4(b)中红色矩形框内的部分,而黄色矩形框内的梯度矢量描述了噪声部分的特点。如果能够按照这种规律对扩散进行控制,则可以更好地保留图像的边缘信息,因此构造了扩散控制矩阵 g_θ ,用于描述图像区域梯度矢量的同向性结构。区域中的梯度矢量同向性越高,则边缘停止函数 g 的取值越低,边缘附近区域的扩散率越低,因此结合式(8)得到方程

$$\begin{cases} \frac{\partial I(i)}{\partial t} = g I(i)_{\alpha\alpha} \\ g = g_\theta g(\lambda_1 - \lambda_2) \end{cases} \quad (10)$$

式(10)的显式求解方案为

$$I(i)^{n+1} = I(i)^n + \Delta t \cdot g_\theta g(\lambda_1 - \lambda_2) I(i)^n_{\alpha\alpha} \quad (11)$$

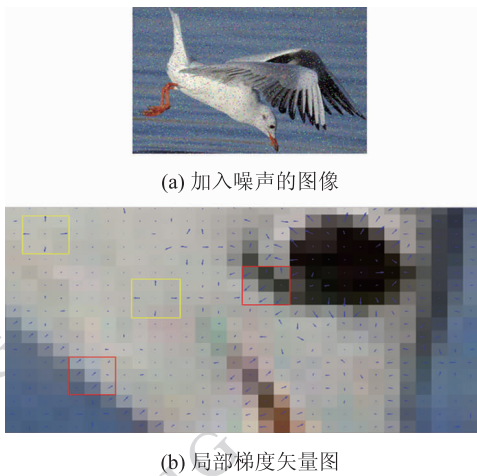


图4 梯度矢量图分析

Fig. 4 Analysis of gradient vector

2.2 扩散控制矩阵 g_θ 的计算

首先需要计算梯度矢量方向矩阵 θ 。设输入图像为 I , $\theta_{\max}$ 取大于 360 的值,代表当前位置的梯度矢量不存在, D_T 为梯度阈值,用于排除梯度过小的点,具体计算过程如下:

Procedure Expand (Input: $I, \theta_{\max}, D_T$; Output: θ)

//获得图像信息,各参数与式(2)中的意义相同

$[m, n, Dx, Dy, D, \theta] = \text{GetImgData}(I);$

for $i = 1 : m$

for $j = 1 : n$

{

if($Dx(i, j) > 0 \ \&\& \ Dy(i, j) > 0$) {

if($Dx(i, j) = 0$)

$\theta(i, j) = 90;$

//第1象限

if($Dx(i, j) < 0 \ \&\& \ Dy(i, j) > 0$) {

$\theta(i, j) = 180 + \theta(i, j);$

if($Dx(i, j) = 0$)

$\theta(i, j) = 90;$

//第2象限

if($Dx(i, j) < 0 \ \&\& \ Dy(i, j) < 0$) {

$\theta(i, j) = 180 + \theta(i, j);$

if($Dx(i, j) = 0$)

$\theta(i, j) = 270;$

//第3象限

if($Dx(i, j) > 0 \ \&\& \ Dy(i, j) < 0$) {

$\theta(i, j) = 360 + \theta(i, j);$

if($Dx(i, j) = 0$)

$\theta(i, j) = 270;$

//第4象限

//处理 Dy 为 0 的情况

if($Dy(i, j) = 0 \ \&\& \ Dx(i, j) \neq 0$)

if $Dx(i, j) > 0$

$\theta(i, j) = 0;$

if $Dx(i, j) < 0$

$\theta(i, j) = 180;$

//处理 Dx, Dy 同时为 0 的情况

if($Dy(i, j) = 0 \ \&\& \ Dx(i, j) = 0$)

$\theta(i, j) = \theta_{\max};$

//当梯度值过小时,忽略不计

if($D(i, j) < D_T$)

$\theta(i, j) = \theta_{\max};$

}

经过上述过程的处理,可以获得角度范围为 $0 \sim 359$ 的梯度矢量角度矩阵,不存在梯度的位置角度值均为 $\theta_{\max}$ 。为了获得控制扩散矩阵,通过统计邻域梯度矢量角度的一致性对扩散矩阵进行赋值,当区域内相似方向的数量超过某个限定值时,则判定当前位置属于边缘区域,被赋予小扩散率系数,否则按单位 1 的速率进行扩散。令 m, n 为图像的长和宽, θ_c 为方向一致性判定阈值, θ_r 为相似方向的统计值, $diff$ 为边缘区域扩散系数,取值范围为 $0 \sim$

1, 扩散矩阵 g_θ 计算过程如下:

```

Procedure Expand( Input:  $m, n, \theta_c, \theta_T, diff$ ;
                  Output:  $g_\theta$  )
  for  $i = 2 : m - 1$ 
    for  $j = 2 : n - 1$ 
      {
         $T_c = 0$ ;
        for  $k = i - 1 : i + 1$ 
          for  $l = j - 1 : j + 1$ 
            if ( $\theta(i, j) \neq \theta_{MAX}$ )
              if ( ! ( (  $i = k$  ) && (  $j = l$  ) ) )
                if (  $abs(\theta(i, j) - \theta(k, l)) \leq \theta_T$  )
                   $T_c = T_c + 1$ ;
            }
        if ( $T_c \geq \theta_c$ )
           $g_\theta(i, j) = diff$ ;
        else
           $g_\theta(i, j) = 1$ ;
      }

```

3 实验分析

选用CPU主频为3.2 GHz, 内存2 G的计算机作为实验环境。采用几类不同的图像进行实验, 包括人物、室内景物、动物和建筑。令边缘扩散系数 $diff = 0.2$, 迭代步长 $\Delta t = 0.5$, 同向性比较阈值 $\theta_T = 45$, 梯度阈值 $D_T = 2$, 梯度值为0的矢量角度 $\theta_c = 1000$ 。选用文献[9]的块匹配和3维变换域滤波(BM3D)算法与本文方法进行比较, 文献[9]方法需要用户对图像的污染程度进行预估计, 通过调整参数 σ 的取值进行去噪, 因此去噪质量与 σ 的估计值密切相关, 取值过大或过小都会影响去噪效果。共进行4组实验, 随着图像受污染程度的增加, σ 的值也随之增加。前两组实验的 σ 选取20~80范围内3个不同值, 后两组实验选用处理效果最好的 σ 值, 实验结果如图5—图8所示。



图5 人物类图像去噪结果对比

Fig. 5 Contrast of character image denoising results

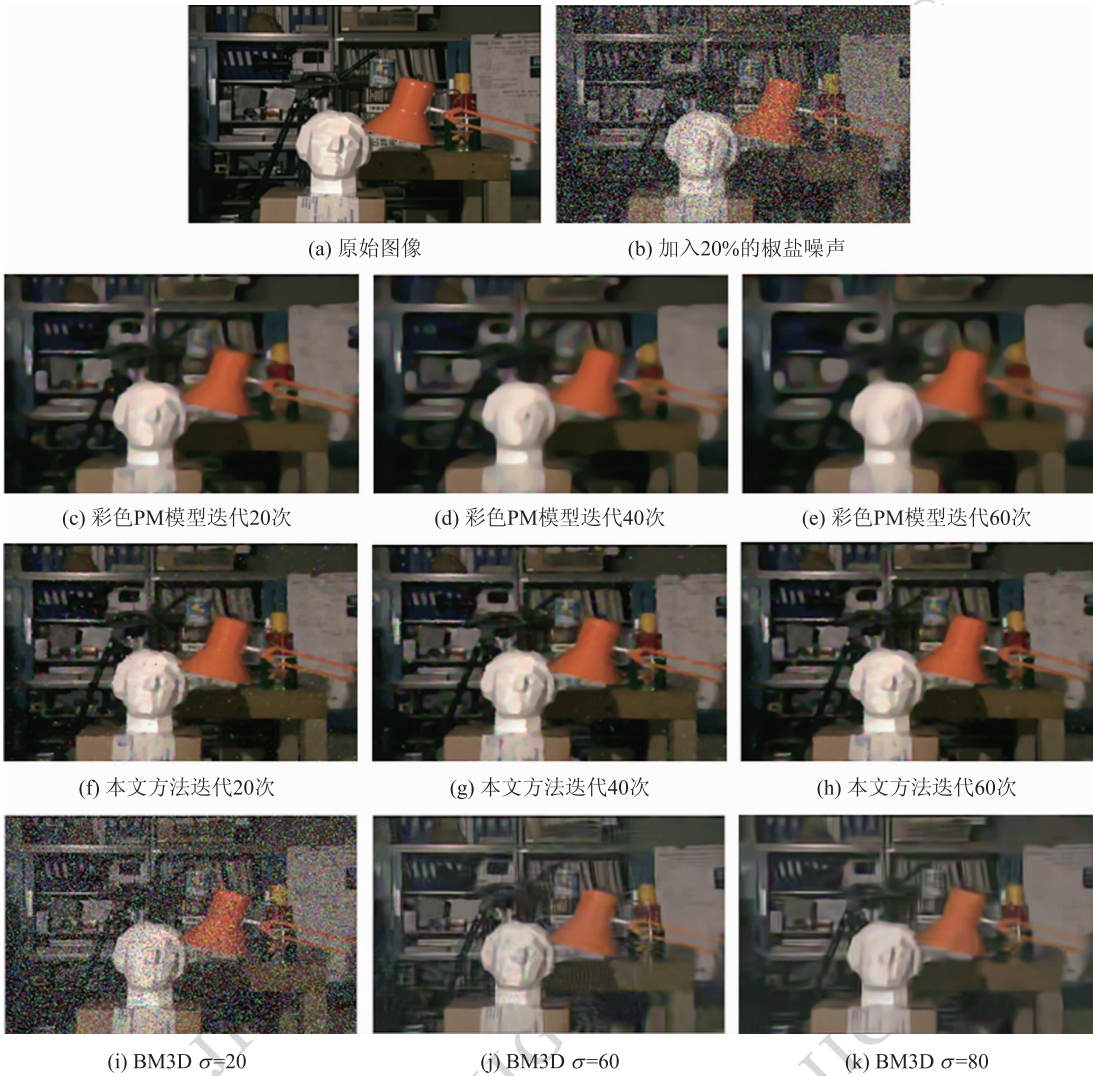


图6 室内景物类图像去噪结果对比

Fig. 6 Contrast of indoor scene image denoising results

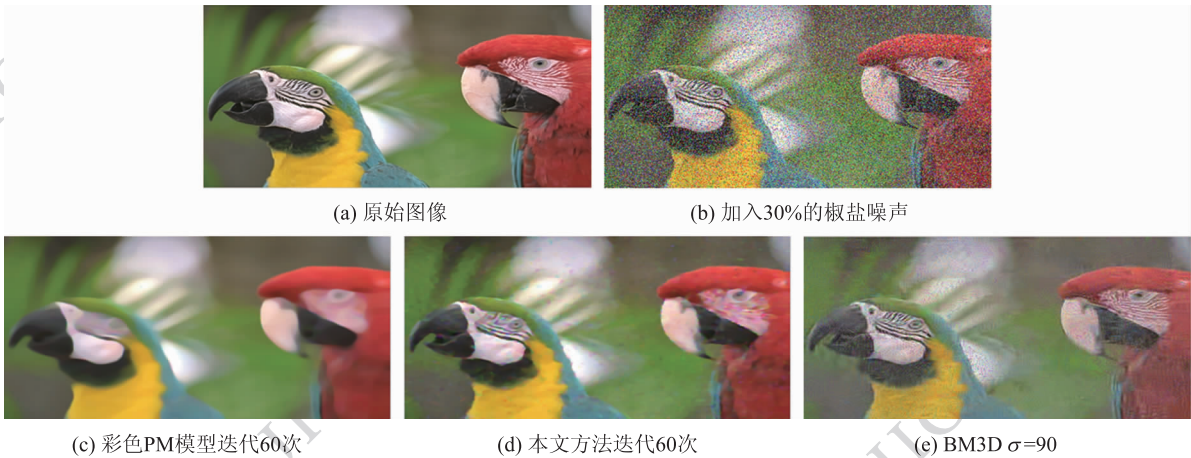


图7 动物类图像去噪结果对比

Fig. 7 Contrast of the animal image denoising results



图8 建筑类图像去噪结果对比

Fig. 8 Contrast of building image denoising results

峰值信噪比(PSNR)是最普遍使用的评鉴画质的客观量测量方法。采用文献[9]中的方法计算去噪后彩色图像的PSNR值,即

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{255^2}{(3|\mathbf{X}|)^{-1} \sum_{c=R,G,B} \sum_{x \in \mathbf{X}} (y_c(x) - \hat{y}_c(x))^2} \right) \quad (12)$$

式中, $\mathbf{X}$ 为图像中像素位置的集合, $y_c(x)$ 为原始图像 c 通道 x 位置上的像素值, $\hat{y}_c(x)$ 为去噪后图像 c 通道 x 位置上的像素值。尽管PSNR值无法和人眼

看到的视觉品质完全一致,但在一定程度上可以客观的评价图像质量。

图5—图8为人物、室内景物、动物、建筑4类不同的图像,分别加入10%~40%的椒盐噪声。对比图5(c)—(e),图5(f)—(h)中人物的边缘信息得到了更好地保持,如眼睛附近的区域。BM3D算法在 σ 取值为40时去噪结果最好,如图5(j)所示。从直观上看,与本文方法相比,BM3D算法的处理结果降低了原图的对比度。图6(b)加入了20%的椒盐噪声。对比图6(c)—(e)与图6(f)—(h),后者可以更好地控制了扩散,保持图像中的局部区域特

征,使区域间的边缘区分度更好,而图 6(i)一(k)的图像颜色对比度明显低于图 6(f)一(h)。与 PM 及 BM3D 算法相比,较大的 PSNR 值在一定程度上也说明了本文算法的处理结果更好。图 7(b)为图 7(a)加入 30% 椒盐噪声的图像,采用两种算法迭代 60 次后,图 7(d)的局部区域边缘信息保持得较好,如鹦鹉眼睛和周围区域的条纹部分,而图 7(e)在该部分的处理结果最好,但对比度稍差。在图 8 建筑类图像的实验中,分别对原始图像加入 40% 的椒盐噪声和标准差为 0.04 的高斯噪声,如图 8(b)(c)所示。图 8(d)尽管在噪声去除方面得到了较好地结果,但由于扩散控制的不够理想,使得部分区域边缘

信息被模糊化,如建筑的房顶,旗帜、骑车人等。图 8(f)的边缘信息保持较好,但区域对比度差。图 8(e)在细节方面得到了很好地保持,同时结果在去噪与对比度方面好于其他两种方法。图 8(h)与图 8(i)相比,在屋顶、树木的细节描述上前者好于后者,而具有渐变色的天空部分的去噪效果稍差。通过对比表 1 中各组实验数据可见,随着噪声的增加,采用本文方法获得的 PSNR 值均高于彩色 PM 与 BM3D 算法,验证了本文方法的稳定性。在算法处理时间方面,由于需要在每次迭代处理中计算 g_{θ} ,因此在处理速度方面较慢,执行时间与图像尺寸成正比,图 9 和图 10 给出了一组算法性能的对比图。

表 1 实验数据
Table 1 Experimental data

图像	图像尺寸	噪声	BM3D 噪声估计 σ 取值	迭代次数 *	PSNR/dB			执行时间/s		
					BM3D	彩色 PM *	本文方法 *	BM3D	彩色 PM *	本文方法 *
图 5(b)	256 × 256	10% 椒盐	20	20	17.247	16.322	22.733	0.634	3.783	6.157
			40	40	26.550	13.415	27.531	0.737	7.924	12.301
			60	60	26.407	10.131	25.438	2.143	11.312	18.684
图 6(b)	384 × 288	20% 椒盐	20	20	12.115	24.172	29.716	0.849	4.113	7.330
			60	40	21.548	18.853	30.681	3.935	8.468	14.572
			80	60	21.436	12.723	28.164	3.936	12.556	21.938
图 7(b)	512 × 384	30% 椒盐	90	60	20.256	15.553	27.961	7.336	33.816	53.788
图 8(b)	680 × 680	40% 椒盐	100	60	17.386	14.454	25.130	16.915	56.169	83.751
图 8(c)	680 × 680	标准差为 0.04 的高斯噪声	100	60	23.155	12.911	25.473	16.402	57.145	85.652

注:“*”代表需要迭代计算

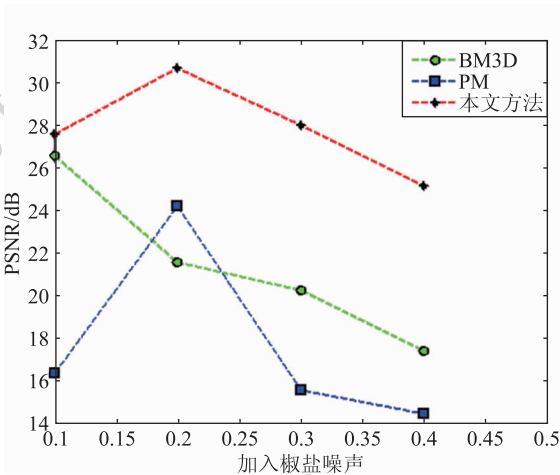


图 9 算法执行结果对比
Fig. 9 Contrast of implementation results

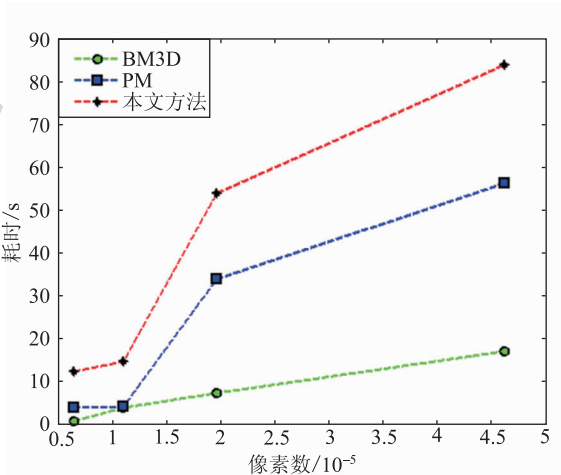


图 10 算法执行速度对比
Fig. 10 Comparison of algorithm execution speed

4 结 论

为了能够实现边缘保持的彩色图像去噪,在分析了PM算法的不足后,提出一种采用梯度矢量扩散控制进行彩色图像去噪的方法。为了充分利用彩色图像的信息,避免因图像灰度化过程中的信息损失,首先提出一种RGB空间构造梯度矢量的方法,通过分析这些边缘区域矢量的规律,给出了控制扩散矩阵的实现过程。其次通过对彩色空间的分析,给出了支持彩色图像去噪的PM模型,并通过去除法向扩散,结合扩散矩阵实现了边缘保持的图像去噪方法。最后通过实验比较了BM3D算法、彩色PM算法和本文方法的优缺点,验证了本文方法在对彩色图像进行去噪时,能够在保持图像对比度的同时,保护图像的边缘信息,具备较好的去噪能力。

参考文献 (References)

- [1] Gonzalez R C, Woods R E. Digital Image Processing [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. [冈萨雷斯, 伍德. 数字图像处理[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2010.]
- [2] 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.
- [3] Scherzer O, Weickert J. Relations between regularization and diffusion filtering [J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 2000, 12(1): 43-63.
- [4] Weickert J, Schnorr C. A theoretical framework for convex regularizers in PDE-based computation of image motion [J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 45(3): 245-264.
- [5] Wang Y, Zhang L P, Li P X. An improved algorithm of anisotropic diffusion smoothing filter [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(2): 210-216. [王毅, 张良培, 李平湘. 各项异性扩散平滑滤波的改进算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(2): 210-216.]
- [6] Cui L, Pan Z K, Wei W B, et al. A variational level set method for surface denoising based on PM model [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 361-366. [崔丽娜, 潘振宽, 魏伟波, 等. 基于PM模型的曲面去噪变分水平集方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 361-366.]
- [7] Li Y B, Jiang G F, Wang Z Q, et al. New well-posed model and classified diffusion [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(1): 76-81. [李彦宝, 姜广峰, 王治强, 等. 新适定模型的提出及分类扩散[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 76-81.]
- [8] Song J J, Hou Z Q, Yu W S. Anisotropic diffusion image smoothing method based on human visual model [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(3): 321-328. [宋建军, 侯志强, 余旺盛. 基于人类视觉模型的各项异性扩散滤波方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(3): 321-328.]
- [9] Dabov K, Foi A, Egiazarian K. Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 1-16.