

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 3
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3月 第17卷 第3期(总第191期)

目次

图像处理和编码

- 摄影测量共线方程的单位四元数描述 杨化超,卢晓攀,王永波,姚国标(301)
- 分形压缩感知高维信号重构方法 刘佶鑫,孙权森(309)
- 自适应子矢量划分的快速码字搜索算法 吴鑫鹏,潘志斌,李达(315)
- 基于人类视觉模型的各向异性扩散滤波方法 宋建军,侯志强,余旺盛(321)
- 整数提升小波多相矩阵分解系数的快速提取算法 王锋,赵志文,牟盛(329)
- 自适应样本块大小的图像修复方法 孟春芝,何凯,焦青兰(337)

图像分析和识别

- 改进FCM在交互式图像分割中的应用 依玉峰,高立群,郭丽(342)
- 输电导线图像目标识别方法 孙凤杰,杨镇浓,李媛媛,范杰清(349)
- 无表观特征小目标检测与跟踪 陶霖密,李亮,邸慧军(357)
- 应用改进频率调谐的海上小目标检测方法 任蕾,施朝健,冉鑫(365)
- 视觉注意原理局部特征的行人检测 刘俊涛,刘文予,吴彩华,李雄伟,冯镔(370)
- 尺度不变单样本人脸识别方法 王炜强,张晓阳,曹春芹,付奎生(380)
- 复杂交通场景中采用稀疏表示的车辆识别方法 李修志,吴健,崔志明,陈建明(387)
- 利用复合导数的边缘检测新算法 程金梅,叶永强,姜斌(393)

图像理解和计算机视觉

迭代分割逼近:新的基于局部响应显著度的角点检测 马丽红,谭幸均(402)

融合 SIFT 特征的熵图估计医学图像非刚性配准 张少敏,支力佳,赵大哲,林树宽,赵宏(412)

计算机图形学

面向非均匀采样点集的 3 维表面重建算法 刘晓平,段瑞青,余烨(419)

基于可编程图形管线的大规模流程工厂模型多分辨率绘制方法 周剑,唐卫清,朱耀琴,夏明,黄晓剑(426)

带有位置修正的环境映射 王晨昊,汤晓安,孙即祥,马伯宁(435)

遥感图像处理

海岸线遥感信息提取的元胞自动机方法及其应用 冯永玖,韩震(441)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 3 期

2012 年 3 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

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 3 March 2012

Contents

Image Processing and Coding

- Unit quaternion based description of collinearity equations Yang Huachao, Lu Xiaopan, Wang Yongbo, Yao Guobiao(301)
- Fractal compressive sensing for high-dimension signal recovery Liu Jixin, Sun Quansen(309)
- Fast codeword search algorithm based on adaptive subvector partitions Wu Xinpeng, Pan Zhibin, Li Da(315)
- Anisotropic diffusion image smoothing method based on human visual model Song Jianjun, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng(321)
- Fast extraction algorithm of the polyphase matrix decomposition coefficient based integer lifting wavelet
..... Wang Feng, Zhao Zhiwen, Mou Sheng(329)
- Image completion method with adaptive patch size Meng Chunzhi, He Kai, Jiao Qinglan(337)

Image Analysis and Recognition

- Application of improved FCM for interactive image segmentation Yi Yufeng, Gao Liqun, Guo Li(342)
- Methods of transmission line target recognition Sun Fengjie, Yang Zhenhuan, Li Yuanyuan, Fan Jieqing(349)
- Featureless small object detection and tracking Tao Linmi, Li Liang, Di Huijun(357)
- Small target detection method under sea surface environment using revised frequency tuned saliency detection
..... Ren Lei, Shi Chaojian, Ran Xin(365)
- Pedestrian detection method using local feature based on vision attention
..... Liu Juntao, Liu Wenyu, Wu Caihua, Li Xiongwei, Feng Bin(370)
- Scale invariant face recognition from single sample Wang Weiqiang, Zhang Xiaoyang, Cao Chunqin, Fu Kuisheng(380)
- Sparse representation method of vehicle recognition in complex traffic scenes
..... Li Xiuzhi, Wu Jian, Cui Zhiming, Chen Jianming(387)
- Novel edge detection algorithm using a composite derivative Cheng Jinmei, Ye Yongqiang, Jiang Bin(393)

Image Understanding and Computer Vision

- Iterative segment approaching: new corner detection based on local response saliency Ma Lihong, Tan Xingjun(402)
- Entropic graph estimation integrated with SIFT features for medical image non-rigid registration
..... Zhang Shaomin, Zhi Lijia, Zhao Dazhe, Lin Shukuan, Zhao Hong(412)

Computer Graphics

- Three-dimensional surface reconstruction algorithm for non-uniform sampling points Liu Xiaoping, Duan Ruiqing, Yu Ye(419)
- Multi-resolution rendering approach of large-scale process plant models based on programmable graphics pipeline
..... Zhou Jian, Tang Weiqing, Zhu Yaoqin, Xia Ming, Huang Xiaojian(426)
- Environment mapping with position rectification Wang Chenhao, Tang Xiao'an, Sun Jixiang, Ma Boning(435)

Remote Sensing Image Processing

- Cellular automata approach to extract shoreline from remote sensing imageries and its application
..... Feng Yongjiu, Han Zhen(441)

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)03-0321-08

论文引用格式: 宋建军, 侯志强, 余旺盛. 基于人类视觉模型的各向异性扩散滤波方法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(3): 321-328

基于人类视觉模型的各向异性扩散滤波方法

宋建军, 侯志强, 余旺盛

空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077

摘要: 针对各向异性扩散模型中扩散系数的梯度阈值确定问题进行了研究, 提出了一种基于人类视觉模型的各向异性扩散滤波器。首先在 PM 方程的基础上研究了各向异性扩散系数中梯度阈值的取值问题。根据仿生学原理, 分析了韦伯比曲线, 将图像根据背景亮度划分为不同的区域, 分别采用不同的公式计算梯度阈值。然后讨论了改进后算法在 8 邻域内的离散实现问题。仿真结果表明, 与传统的恒常梯度阈值扩散模型相比, 改进后的算法在有效保留图像重要信息的同时对噪声的抑制效果更为理想。

关键词: 各向异性扩散; 扩散系数; 梯度阈值; 仿生学; 韦伯定律

Anisotropic diffusion image smoothing method based on human visual model

Song Jianjun, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng

The Telecommunication Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China

Abstract: We propose an improved anisotropic diffusion method based on the human visual model to gradient threshold for the diffusion coefficients. First, we studied the evaluation of gradient thresholds for anisotropic diffusion coefficient based on the primal PM equation. Through analyzing Weber's law according to the bionics principle and based on the background, the image brightness was divided into different regions. The gradient thresholds for the different areas were calculated according to the different equations. Then, we discussed the discrete implementation of the proposed method for the eight neighborhoods. The simulation results indicate that the proposed method not only preserves the image information better, but also suppression the noise more satisfactory.

Key words: anisotropic diffusion; diffusion coefficients; gradient threshold; bionics principle; Weber law

0 引言

图像滤波与平滑是图像处理中的基本问题,也是早期机器视觉中常用的一种工具。高斯低通滤波器^[1]被称为是一种理想的平滑滤波器,它利用傅里叶变换将空域卷积等价到频域相乘的特性,通过抑制噪声所在的高频部分来平滑图像。早期的研究表明^[2],高斯低通滤波器在平滑噪声的同时,也模糊了图像的重要边缘信息。这就使得平滑后的图像,

不能很好地重现原始图像中的结构信息。近些年来,针对图像滤波中保持重要特征的问题,研究者们提出了大量非线性的图像滤波算子。这些图像滤波算子大多来源于求解初始值为输入图像的非线性偏微分方程,其中最经典的是 Perona 和 Malik^[3]提出了采用方向性分布系数代替高斯卷积的各向异性扩散滤波方法。各向异性滤波^[4]是一种基于偏微分方程的滤波技术,最早是基于热量的各向异性扩散理论而提出来的。Perona 和 Malik 将其引入图像处理领域并研究了其在平滑滤波、噪声抑制以及边缘

收稿日期: 2011-04-21; 修回日期: 2011-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(60805015)

第一作者简介: 宋建军(1987—),男,现为空军工程大学信号与信息处理专业在读硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理。

E-mail: sjj870321@163.com

检测等方面的应用。各向异性滤波在图像的平坦区域选择大尺度的平滑,在边缘区域选择小尺度的平滑,从而在抑制噪声的同时较好地保护了图像的细节信息。但却表现出病态且不稳定,为了解决 PM 模型的不足,Catte^[5]等人通过高斯卷积核(标准差为常数 σ)对图像进行时空域的正则化处理,提出了非线性退化扩散模型(Catte 模型)。尽管 Catte 模型获得了较好的实验结果,可是仍存在扩散系数中的梯度阈值被看成常数。由于噪声图像中梯度具有很大的不确定性,因此梯度阈值若为常数则不能体现各向异性扩散的适用性^[6]。

还有不少学者基于扩散系数以及扩散模型提出了自己的改进模型^[7-9]。他们几乎都没有考虑到人类视觉系统的影响。众所周知,作为信息的载体,所有图像最终需要由人的视觉系统来感知和解释。因此,在图像处理的过程中,我们应该考虑到视觉心理的作用。各向异性扩散方程中扩散系数的梯度阈值是滤波性能的重要参数,只有少数文献[10-11]研究了其取值问题。本文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。提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。

1 各向异性扩散滤波器

各向异性扩散方程(PM 方程)实质上是偏微分方程形式的热传导方程,其具体描述如下:

$$\frac{\partial f(x,y,t)}{\partial t} = \text{div}(c(\|\nabla f(x,y,t)\|) \cdot \nabla f(x,y,t)) \quad (1)$$

式中, $f(x,y,t)$ 是图像经过 t 次迭代后的结果, $\text{div}(\cdot)$ 和 $\nabla(\cdot)$ 分别为散度算子和梯度算子, $\|\nabla f(x,y,t)\|$ 为 t 次迭代后像素点 $f(x,y,t)$ 的梯度模值, $c(\cdot)$ 为“边缘停止函数”,又称为扩散方程的扩散系数,通常是一个以梯度模值为变量的单调减函数,并且当 $\|\nabla f(x,y,t)\|=0$ 时, $c(\|\nabla f(x,y,t)\|)=1$ 。当 $\|\nabla f(x,y,t)\|\rightarrow\infty$ 时, $c(\|\nabla f(x,y,t)\|)\rightarrow 0$ 。表明在梯度值越大的区域扩散系数越小,以利于保护图像的边缘信息;在梯度值越小的地方扩散系数越大,以利于平滑平坦区域的噪声。为此,Perona 和 Malik 在其研究中给出了两个启发性的扩散系数,即

$$c(\|\nabla f(x,y,t)\|) = e^{-\left(\frac{\|\nabla f(x,y,t)\|}{K}\right)^2} \quad (2)$$

$$c(\|\nabla f(x,y,t)\|) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla f(x,y,t)\|}{K}\right)^2} \quad (3)$$

式中, K 是一个重要的梯度阈值参数,在扩散滤波的过程中,梯度值大于 K 的边缘将会被保留下来,梯度值小于 K 的区域将在迭代滤波的过程中变得越来越平滑。Perona 和 Malik 指出可以手动设置 K 值的大小,或是根据局部噪声方差估计值来设置 K 值的大小。文献[10]指出, K 值设为时间的递减函数更利于迭代的收敛。但它们的一个共同特点是: K 值在单次迭代过程中是一个常数。

2 视觉模型

2.1 人类视觉的自适应

通过大量的实验表明,人们对物体亮度的感觉同进入人眼的光强成对数关系,但人们对物体亮度的感觉并不完全由物体本身亮度所决定,还与物体所处的背景亮度有关。视觉对亮度差的敏感程度随背景亮度呈非线性变化^[12],它的特性由人眼的对比度敏感性函数决定。如图1(a)所示,在均匀亮度背景 I 上,圆形目标从亮度 I 开始增加到 $I + \Delta I$ 在背景 I 下可见。测得视觉刚好能鉴别的亮度差异值 ΔI (JND)。这个 ΔI 是由背景亮度决定的, ΔI 与 I 之间的这种非线性关系称为阈值亮度比(TVI)。在低背景亮度和高背景亮度之间的一个相当宽的亮度 $\frac{\Delta I}{I}$ 近似为常数(见图1(b))。此关系式称为韦伯定律,而 $\frac{\Delta I}{I}$ 为韦伯比或对比灵敏度阈值。

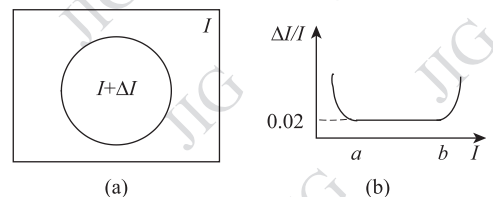


图1 韦伯定律示意图

Fig. 1 Weber law schemes

人眼视网膜上有视杆体和视锥体两种视觉细胞,其中视杆体在暗光环境下特别敏感;视锥体在亮光环境下特别敏感。图2为视杆体和视锥体的阈值亮度比函数曲线(TVI)^[13]。从图中可以看到,当背

景亮度低于 $-4\lg\left(\frac{cd}{m^2}\right)$ 时,视杆体 TVI 曲线为一条水平线,即刚可分辨亮度差近似为一个常数。这表明,背景亮度对刚可分辨亮度差只有非常小的影响,而当背景亮度大于 $2\lg\left(\frac{cd}{m^2}\right)$ 时,视杆体 TVI 曲线近乎一条垂直线。这表明,由于背景亮度的影响,物体在该背景亮度条件下已经无法再被观察到。视锥体的 TVI 曲线也有相似规律。

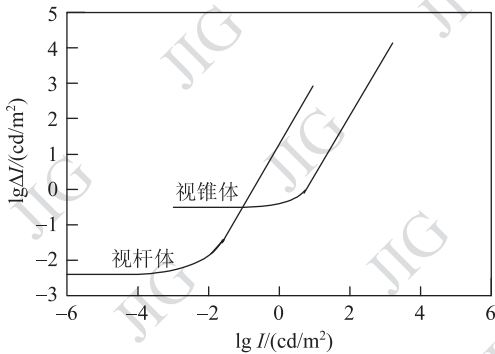


图2 TVI 函数曲线
Fig. 2 TVI function curve

实际上,视觉系统的感知亮度差与背景亮度的关系是可以函数表示的。本文在分析图1和图2的基础上,提出公式如下:

$$\Delta I = \begin{cases} \alpha \exp\left(\frac{1}{I}\right) & 0 \leq I < a \\ \beta \times I & a \leq I < b \\ \lambda \exp\left(\frac{1}{256 - I}\right) & b \leq I < 256 \end{cases} \quad (4)$$

式中, a 和 b 如图1(b)所示,小于 a 的区域为低暗区,大于 b 的区域为高亮区, a 和 b 之间为中间区。 I 为背景亮度灰度值, ΔI 为感知的亮度差。灰度级为256级。在式(4)中 $\alpha, \beta, \lambda, a$ 和 b 为5个待定参数, β 可以参考韦伯常数取值在 $[0.01, 0.3]$ 之间;中间区的起始灰度值 a 和终止灰度值 b 可分别取 $[45, 81]$ 和 $[180, 210]$ 之间。当 β 和 a, b 确定之后, α, λ 可以根据连续性由 β 和 a, b 求得。

2.2 基于视觉模型的梯度阈值的确定

传统的各向异性滤波器中扩散系数的梯度阈值 K 是需要人为设定,而不是由图像边缘的特征信息决定,而且手动设定 K 往往需要经过多次实验才能够得到满意的处理效果。因此不具有自适应能力。而文献[14-15]提出了自动确定梯度阈值 K 的方法,但这些方法确定的梯度阈值在

单次迭代过程中是一个常数。其次由于这些方法中没有考虑人眼的视觉效应是非线性的这一特征,因此所得结果往往和人的主观评价不一致。所以,可以根据人类视觉特性自适应地选择梯度阈值 K 。人类视觉特性描述的是当目标像素和背景像素亮度差小于 ΔI 时,人眼无法将两者区分开来,会认为二者属于同一类,即目标能够从背景中被提取出来的条件。因此,利用人眼视觉特性可以根据图像的局部亮度变化,自适应调整梯度阈值 K 大小,而使得各向异性滤波器在抑制噪声时更好地保护图像边缘。

由式(4)可知,在不同的亮度背景下,人眼对图像边缘识别的亮度差不同。本文根据人眼不同的亮度感知特性,将式(4)应用于梯度阈值 K 的自适应选取。具体算法如下:设 $f(x, y, t)$ 表示经过 t 次迭代后坐标 (x, y) 处的灰度值,在每一个坐标 (x, y) 处的 3×3 领域里求均值:

$$f_m(x, y, t) = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 f(x-1+i, y-1+j, t) \quad (5)$$

当 $f(x, y, t) \geq f_m(x, y, t)$ 时,将 $f(x, y, t)$ 的 3×3 领域内小于等于 $f_m(x, y, t)$ 的像素点的均值作为像素点 (x, y) 的背景值 $I(x, y, t)$ 。

当 $f(x, y, t) < f_m(x, y, t)$ 时,将 $f(x, y, t)$ 的 3×3 领域内大于等于 $f_m(x, y, t)$ 的像素点的均值作为像素点 (x, y) 的背景值 $I(x, y, t)$ 。

又假设参数 $\alpha, \beta, \lambda, a$ 和 b 已确定,则由式(4)可以计算出在背景亮度为 $I(x, y, t)$ 时的感知的亮度差 $\Delta I(x, y, t)$ 。设 $K(x, y, t)$ 表示经过 t 次迭代后坐标 (x, y) 处的梯度阈值 K 的大小,于是可以得到 $K(x, y, t) = \Delta I(x, y, t)$ 。

设经过 t 次迭代后坐标 (x, y) 处的梯度值为 $\nabla f(x, y, t)$,则修正后的扩散系数为

$$c \|\nabla f(x, y, t)\| = e^{-\left(\frac{\|\nabla f(x, y, t)\|}{\Delta I(x, y, t)}\right)^2} \quad (6)$$

$$c(\|\nabla f(x, y, t)\|) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla f(x, y, t)\|}{\Delta I(x, y, t)}\right)^2} \quad (7)$$

利用人类视觉特性对梯度阈值 K 参数进行自适应校正的作用是明显的。背景亮度越低的区域,人类的感知亮度差越小,则所对应的梯度阈值 K 越小,校正后的 K 参数更加有利于保护边缘和细节信息。背景亮度越高的区域,人类的感知亮度差越大,则所对应的梯度阈值 K 越大,校正后的 K 参数具有

更强的平滑能力,能够有效减少迭代的次数,使得算法收敛速度更快。

3 改进算法的离散实现

由于偏微分方程在定义域上是连续的,因此 Perona 和 Malik 研究了 PM 方程的 4 邻域离散实现问题。但是基于 4 个方向的离散实现显然限制了 PM 方程的各向异性性能。本文在此基础上研究了 8 邻域的 PM 方程离散实现问题。选取扩散系数 $c(\|\nabla f(x,y,t)\|) = 1/[1 + (\|\nabla f(x,y,t)\| \Delta I(x,y,t))^2]$ 。

为简便起见,用 $f^{(t)}$ 表示 $f(x,y,t)$, $c^{(t)}$ 表示 $c(\|\nabla f(x,y,t)\|)$, $\nabla f^{(t)}$ 表示 $\nabla f(x,y,t)$, d 表示两像素点的欧氏距离,则 PM 方程的离散迭代形式可表示为

$$f_M^{(t+1)} = f_M^{(t)} + \Delta h \sum_{P \in \varphi_M} \frac{c_{M,P}^{(t)} \cdot \nabla f_{M,P}^{(t)}}{d_{M,P}} \quad (8)$$

式中, M 为中心像素点, P 为以 M 的 8 邻域像素点: N(南), E(东), S(北), W(西), NE(东南), NW(西南), SE(东北) 和 SW(西北)。 $I_M^{(t)}$ 表示 t 次迭代后, 像素点 M 的灰度值, ∇h 表示迭代步长, $d_{m,p}$ 表示像素点 m 与 p 之间的欧氏距离, $c_{M,P}^{(t)}$ 表示 t 次迭代后, 像素点 M 沿 P 方向的扩散系数为

$$c_{M,P}^{(t)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla f_{M,P}^{(t)}\|}{\Delta I_M^{(t)}} \right)^2} \quad (9)$$

式中, $\Delta I_M^{(t)}$ 表示 t 次迭代后像素点 M 的梯度阈值通过式(4)求得。 $\nabla f_{M,P}^{(t)}$ 表示 t 次迭代后, 像素点 M 沿 P 方向的梯度。用 $f_M^{(t)}$ 和 $f_P^{(t)}$ 分别表示 t 次迭代后像素点 M 和 P 的灰度值, 则

$$\nabla f_{M,P}^{(t)} = f_M^{(t)} - f_P^{(t)} \quad (10)$$

结合式(4)(9)(10)即可计算 $\nabla f_{M,P}^{(t)}$ 和 $c_{M,P}^{(t)}$, 代入式(8)即可进行迭代操作。为提高算法的执行效率, 迭代步长 Δh 通常取值为不致引起单次迭代数据溢出的最大值。根据 Weickert^[16] 提出的 4 邻域步长确定方法, 可推广得到 8 邻域的步长为

$$\Delta h \leq \frac{1}{\sum_{P \in \varphi_M} \frac{1}{d_{M,P}^2}} = \frac{1}{6} \quad (11)$$

式中, 迭代的步长 Δh 取值越小, 迭代越细腻, 但影响算法的收敛速度; 适当增大迭代步长 Δh 可以加快算法的收敛, 但容易引起数据的溢出。

4 实验结果与分析

为了验证改进各向异性滤波算法的性能, 选取大量图像进行了仿真实验。图 3—图 6 列出了 4 种

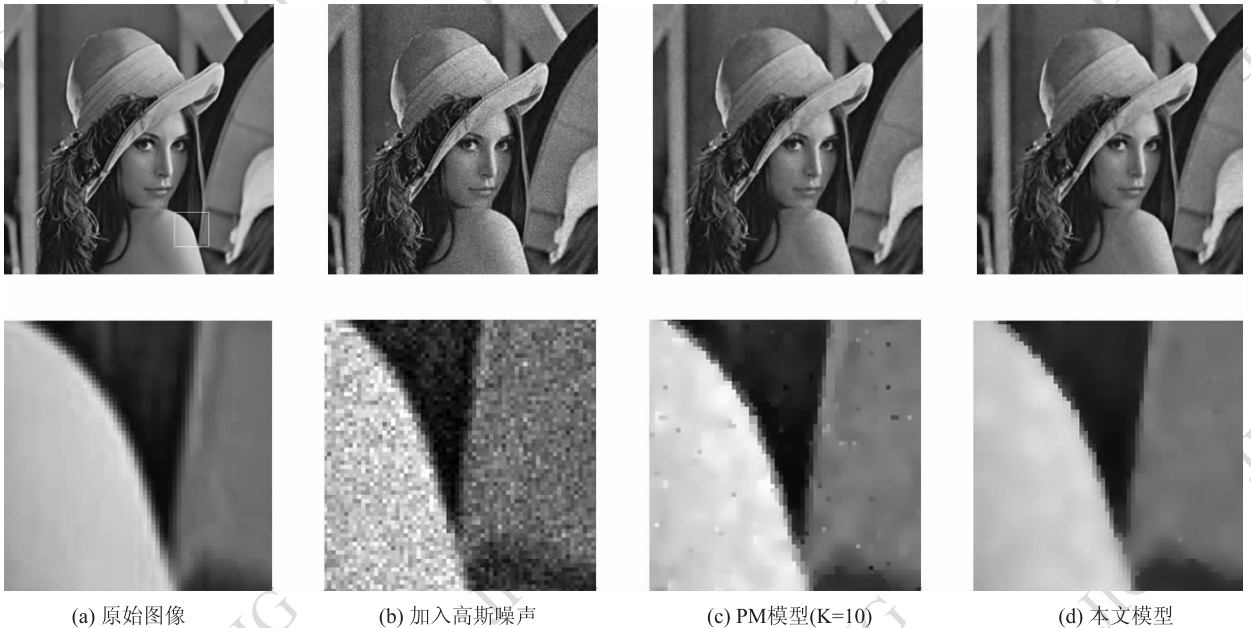


图 3 Lena 图的仿真结果比较

Fig. 3 Comparison of Lena image simulation results

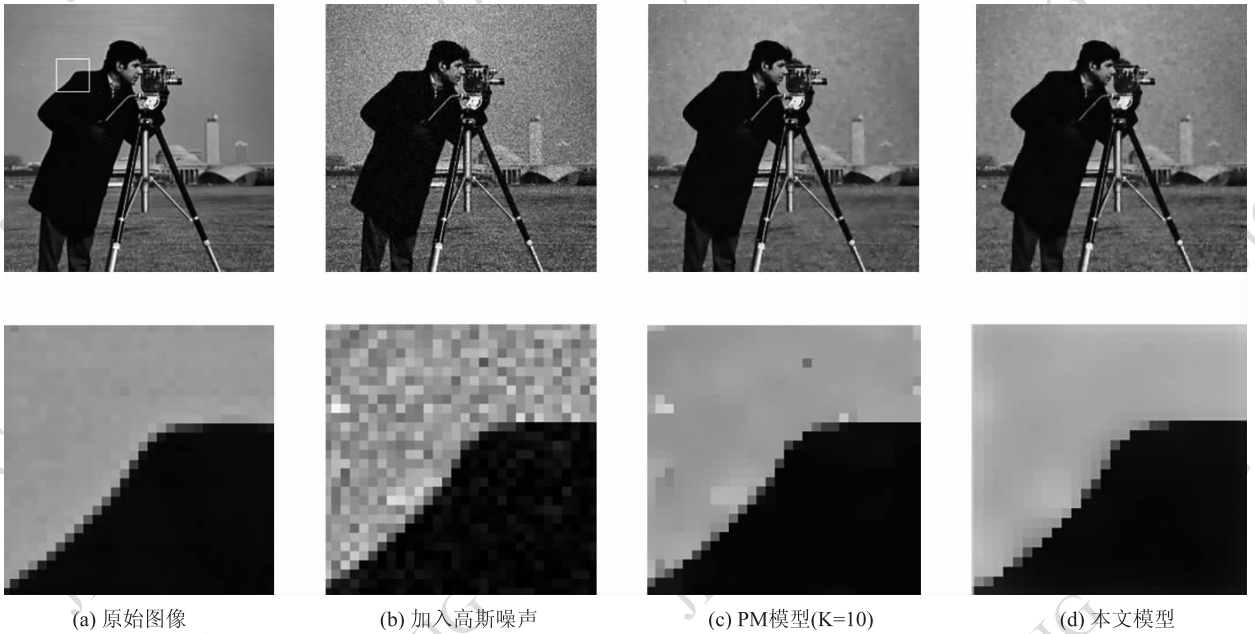


图4 Cameraman 图的仿真结果比较

Fig.4 Comparison of cameraman image simulation results

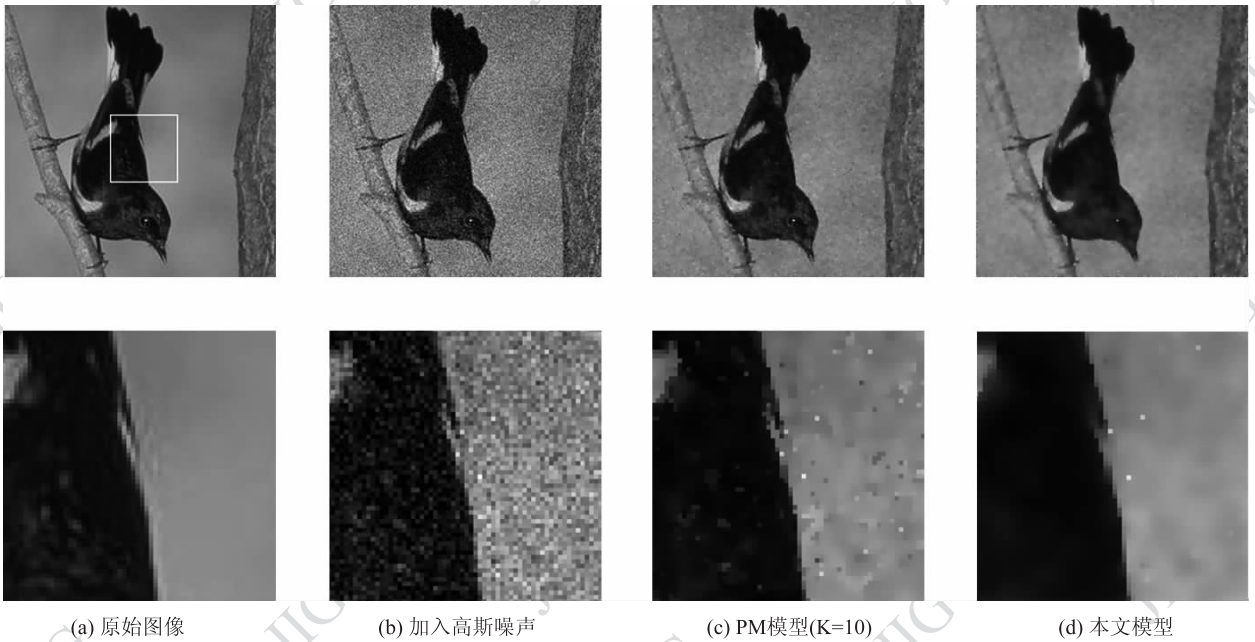


图5 bird 图的仿真结果比较

Fig.5 Comparison of bird image simulation results

图像的仿真结果对比。为了保持扩散模型的稳定性,实验中各种模型的时间步长 ($\Delta h = 0.15$) 和迭代次数 ($t = 10$) 均相同。

从图3—图6的视觉效果来看,相较于改进前的恒常 K 参数 PM 方程,根据人类视觉特性自适应校正 K 参数的 PM 方程不仅更好地抑制了高斯噪

声,而且保证了图像连续性和边缘细节信息不被丢失。

本文采用均方误差^[17] (MSE),信噪比改善因子^[17] (d_{SNR})和峰值信噪比^[18] (PSNR)来定量的衡量图像消噪效果。图像的均方误差(MSE),信噪比改善因子(d_{SNR})和峰值信噪比(PSNR)分别为

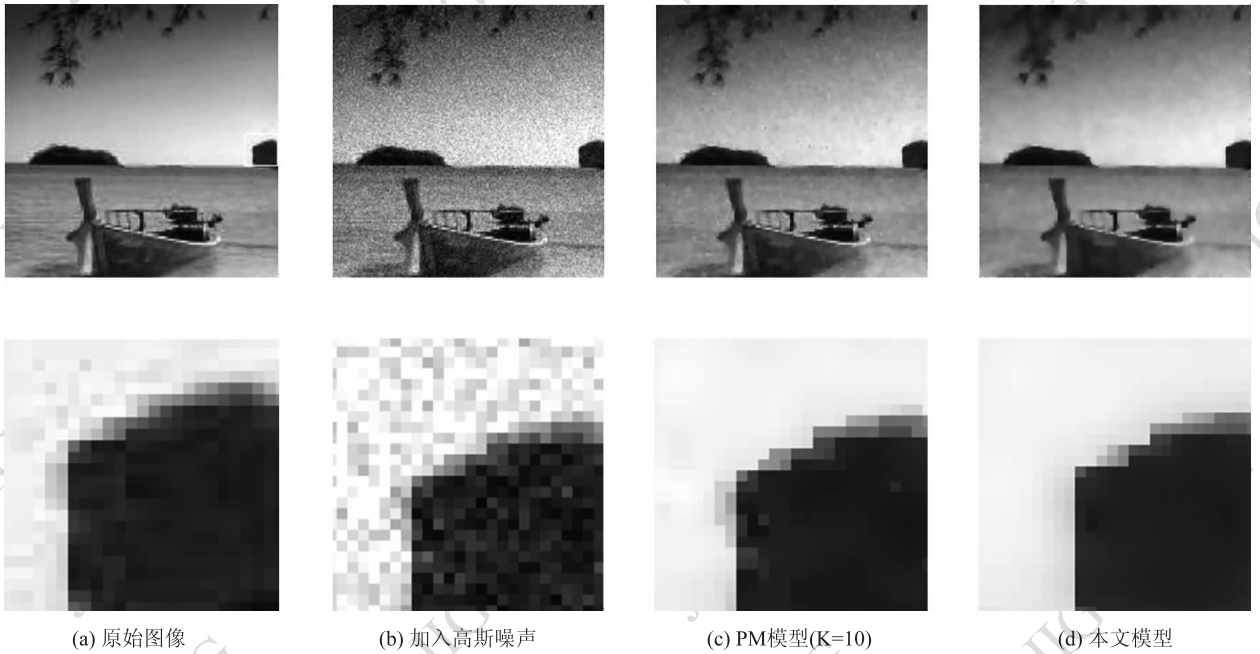


图 6 boat 图的仿真结果比较

Fig. 6 Comparison of boat image simulation results

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_r(i,j) - f_n(i,j))^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_n(i,j))^2} \quad (12)$$

$$d_{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_r(i,j) - f_o(i,j))^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (f_n(i,j) - f_r(i,j))^2} \right) \quad (13)$$

$$PSNR = \left(\frac{N \cdot M \cdot (X_{\max} - X_{\min})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (X(i,j) - Y(i,j))^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式中, M 和 N 分别为图像的宽度和高度, f_r 是未加噪声的原始图像, f_o 是加入噪声后的图像, f_n 是滤波结果, X_{\max} , X_{\min} 分别是未降质图像的最大和最小灰度; X, Y 分别是未降质图像(即 f_r) 和降质图像(即 f_o 和 f_n) 的灰度。表 1 比较了迭代次数相同情况下的 4 种模型的 MSE、 d_{SNR} 和 PSNR。从表 1 可以看出本文的方法, 在参数相同的情况下, 滤波效果优于 PM 模型方法。

图 7—图 9 给出了改进前后各向异性滤波算法对 Lena 图像的扩散平滑的峰值信噪比, 信噪比改善因子和均方误差的比较。由图 7—图 9 可见, 迭代次

数为 9 时, 本文模型的峰值信噪比为 18, 信噪比改善因子为 -6, 均方误差为 0.008, PM 模型的峰值信噪比为 12, 信噪比改善因子为 -2.5, 均方误差为 0.02, 要使 PM 模型的峰值信噪比为 18, 信噪比改善因子为 -6, 均方误差为 0.008, PM 模型都需要 20 次左右。由此说明, 同等迭代次数条件下, 改进算法的平滑效果更好; 要达到相同的平滑效果, 改进算法所需的迭代次数要少。

表 1 各向异性扩散模型定量评价
Table 1 Anisotropic diffusion model of quantitative valuation

图 像	模 型	PSNR	d_{SNR}	MSE
Lena	PM	12.325 9	-2.827 2	0.019 1
	本文	18.984 1	-6.602 7	0.008
Cameraman	PM	12.781 7	-2.331 9	0.020 9
	本文	15.933 2	-4.246 2	0.013 4
Bird	PM	13.432 7	-2.812 7	0.022 1
	本文	17.597 6	-5.158 5	0.012 2
Boat	PM	13.889 3	-2.818 4	0.012 7
	本文	20.056 5	-6.017 7	0.006 1

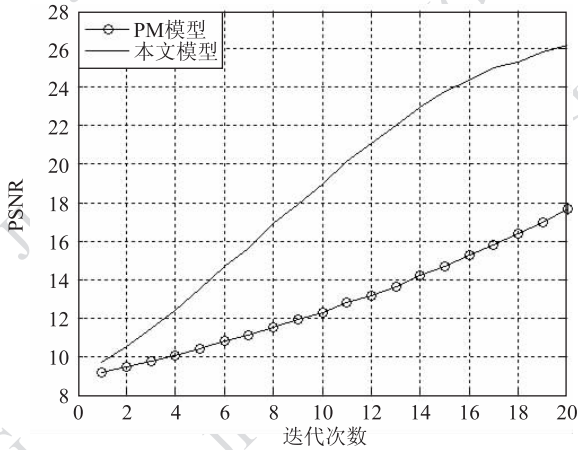


图7 改进的模型和传统模型的 PSNR 结果

Fig.7 PSNR results of the improved model and the traditional

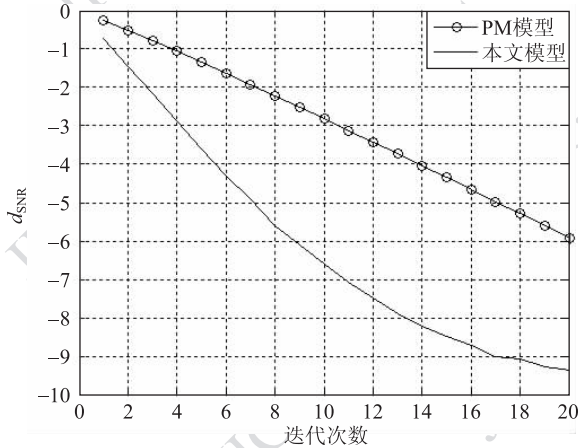
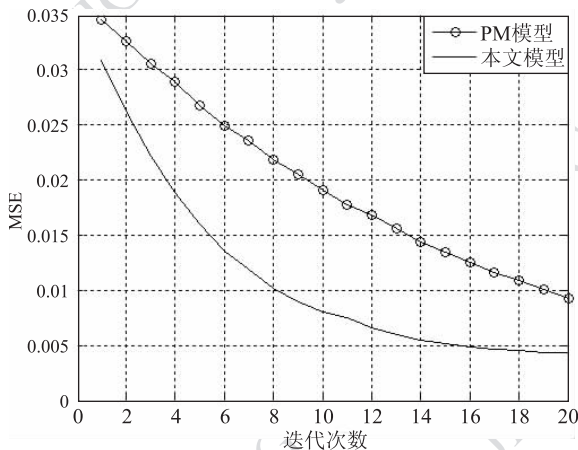
图8 改进的模型和传统模型的 d_{SNR} 结果Fig.8 d_{SNR} results of the improved model and the traditional

图9 改进的模型和传统模型的 MSE 结果

Fig.9 MSE results of the improved model and the traditional

5 结论

针对各向异性扩散模型中扩散系数的梯度阈值确定问题进行了研究,首先根据人类视觉系统的特性,给出一种能根据不同背景亮度自动选取梯度阈值的方法。然后讨论了改进后各向异性扩散方程在8邻域内的离散实现问题。实验结果表明,改进后的算法能够保留图像的重要信息,平滑效果更为理想。在期望得到相同的平滑效果时,改进后的算法能够有效减少迭代的次数。然而由于人类视觉阈值效应只考虑了图像的亮度差,没有考虑颜色信息,所以本文方法只能实现灰度图像的滤波与平滑,对彩色图像的滤波与平滑将是下一步工作的重点。

参考文献 (References)

- [1] Wang Bin, Rose D M, Farag A A, et al. Local estimation of Gaussian-based edge enhancement filters using Fourier analysis [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Minneapolis, USA: IEEE, 1993, 5: 13-16.
- [2] Izquierdo M E, Ghanbari M. Nonlinear Gaussian filtering approach object segmentation [J]. IEE Proceedings of Vision, Image and Signal Processing, 1998, 146(3): 137-143.
- [3] 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.
- [4] Geusebroek J, Smeulders A. Fast anisotropic Gauss filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 938-943.
- [5] Catt F, Lions P L, Morel J M, et al. Image selective smoothing and edge detection by nonlinear diffusion [J]. SIAM J Numer Anal, 1992, 29(2): 182-193.
- [6] Wang Y, Zhang L P, Li P X. Anisotropic diffusion model based on minimal description length criterion [J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(8): 957-963. [王毅, 张良培, 李平湘. 基于最小描述长度原则的各向异性扩散模型 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(8): 957-963.]
- [7] Jiang D H, Feng X C, Song G X. An anisotropic diffusion equation based on nonlinear wavelet shrinkage [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(1): 170-172. [姜东焕, 冯象初, 宋国乡. 基于非线性小波阈值的各向异性扩散方程 [J]. 电子学报, 2006, 34(1): 170-172.]
- [8] Hye S K, Hyo S Y, Nguyen D T, et al. Anisotropic diffusion transform based on directions of edges [C]//IEEE 8th International Conference on Computer and Information Technology

- Workshops. Korea: IEEE, 2008: 396-400.
- [9] Thomas A, Serge N, Dieter S. A posteriori error estimation of residual type for anisotropic diffusion-convection-reaction problems [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2011: 2805-2820.
- [10] 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): 211-217. [王毅, 张良培, 李平湘. 各向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): 211-217.]
- [11] Liu F, Sun F R, Geng J Q, et al. A medical ultrasound image filtering method based on the anisotropic diffusion equation [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2009, 39(5): 38-42. [刘芬, 孙芬荣, 耿俊卿, 等. 一种基于各项异性扩散方程的医学超声图像降噪方法 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2009, 39(5): 38-42.]
- [12] Greenspan H, Ruf A, Goldberger J. Constrained Gaussian mixture model framework for automatic segmentation of MR brain images [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2006, 25(9): 1233-1241.
- [13] Ferwerda J A. Element of early vision for computer graphics [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 22-33.
- [14] YU Yongjian, Acton ST. Edge detection in ultrasound imagery using the instantaneous coefficient of variation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(12): 1640-1655.
- [15] Peng Y, Li D Y, Lin J G, et al. A medical ultrasonic image filtering method based on anisotropic diffusion [J]. Space Medicine and Medical Engineering. 2005, 18(2): 135-139.
- [16] Weickert J, Benamouda B. A semi-discrete nonlinear scale-space theory and its relation to the perona-malik paradox [C] // Proceedings of the Advances in Computer Vision. Germany: Springer, 1997: 1-10.
- [17] Qian W X, Liu R G, Wang W L, et al. The anisotropic diffusion methods based on the directions of the image feature [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(6): 818-822. [钱伟新, 刘瑞根, 王婉丽, 等. 基于图像特征方向的各向异性扩散滤波方法 [J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(6): 818-822.]
- [18] Zhang Y L, Zheng N N, Yuan Z J. Improvement of image adaptive nonlinear filtering [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2): 162-166. [张元林, 郑南宁. 袁泽剑. 一种改进的图像自适应非线性滤波方法 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 162-166.]