



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

中国图象学报 中国图形学报

2014

09

VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第19卷第9期 (总第221期)

2014年9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

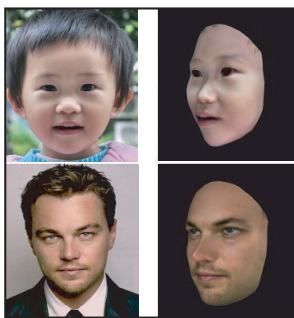
国内定价 50.00元



自适应对称自回归模型的压缩图像内插方法(第1268页)



加权局部特征结合判别式字典的目标跟踪算法(第1316页)



结合特征适配与拉普拉斯形变的3维人脸重建(第1349页)

综述

能量泛函正则化模型在图像恢复中的应用分析

李旭超, 刘海宽, 宋博 1247

图像处理和编码

融合最小化失真与模型保持的隐写算法

高瞻瞻, 汤光明, 张伟伟 1260

自适应对称自回归模型的压缩图像内插方法

刘婧, 干宗良, 崔子冠, 陈昌红, 朱秀昌 1268

基于能量泛函和视觉特性的全变分图像降噪模型

郭从洲, 秦志远, 时文俊 1282

分块策略实现图像椒盐噪声密度估计

林亚明, 李佐勇, 林叶郁 1288

图像分析和识别

Dempster-Shafer证据融合金字塔韦伯局部特征的表情识别

王晓华, 金超, 任福继, 胡敏 1297

运动捕捉数据中足迹的谱聚类检测方法

刘晓平, 陆劲挺, 谢文军 1306

加权局部特征结合判别式字典的目标跟踪

王飞, 房胜 1316

面向瓦当文字识别的改进水平集骨架提取

邓茜芸, 周明全, 武仲科, 王醒策 1324

改进复杂网络模型的形状特征提取

阮瑞, 江波, 汤进, 罗斌 1332

几何特性二元关系的直线匹配

胡海霞, 李钢 1338

图像理解和计算机视觉

结合特征适配与拉普拉斯形变的3维人脸重建

张剑, 何骅, 詹小四, 肖俊 1349

利用背景加权和选择性子模型更新的视觉跟踪算法

黄安奇, 侯志强, 余旺盛, 刘翔 1360

计算机图形学

对可控Bézier曲线的改进

严兰兰, 韩旭里 1368

医学图像处理

结合区域生长与灰度重建的CT图像肺气管树分割

彭双, 肖昌炎 1377

检测肺结节的3维自适应模板匹配

高婷, 龚敬, 王远军, 聂生东, 孙希文 1384

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Novel compression image interpolation method using adaptive symmetrical autoregressive models(P1268)



Visual tracking based on discriminative dictionary and weighted local features (P1316)



Three dimensional face reconstruction via feature adaptation and Laplace deformation (P1349)

Review

- Application analysis of regularization model of energy functional to image restoration
Li Xuchao, Liu Haikuan, Song Bo 1247

Image Processing and Coding

- Steganographic method combining minimum embedding distortion and model preservation
Gao Zhanzhan, Tang Guangming, Zhang Weiwei 1260
- Novel compression image interpolation method using adaptive symmetrical autoregressive models
Liu Jing, Gan Zongliang, Cui Ziguan, Chen Changhong, Zhu Xiuchang 1268
- TV image denoising model based on energy functionals and HVS
Guo Congzhou, Qin Zhiyuan, Shi Wenjun 1282
- Image salt-and-pepper noise estimation based on partitioning strategy
Lin Yaming, Li Zuoyong, Lin Yeyu 1288

Image Analysis and Recognition

- Research on facial expression recognition based on pyramid Weber local descriptor and the Dempster-Shafer theory of evidence
Wang Xiaohua, Jin Chao, Ren Fuji, Hu Min 1297
- Foot plant detection based on spectral clustering algorithm for motion capture data
Liu Xiaoping, Lu Jintong, Xie Wenjun 1306
- Visual tracking based on the discriminative dictionary and weighted local features
Wang Fei, Fang Sheng 1316
- Skeleton extraction using improved level set methods in eaves' text recognition
Deng Qianyun, Zhou Mingquan, Wu Zhongke, Wang Xingce 1324
- Improved shape feature extraction using complex network model
Ruan Rui, Jiang Bo, Tang Jin, Luo Bin 1332
- Line matching based on binary relations of geometric attributes
Hu Haixia, Li Gang 1338

Image Understanding and Computer Vision

- Three dimensional face reconstruction via feature adaptation and Laplace deformation
Zhang Jian, He Hua, Zhan Xiaosi, Xiao Jun 1349
- Visual object tracking method based on weighted background and selective sub-model update strategy
Huang Anqi, Hou Zhiqiang, Yu Wangsheng, Liu Xiang 1360

Computer Graphics

- Improvement of the modifiable Bézier curves
Yan Lanlan, Han Xuli 1368

Medical Image Processing

- Segmentation of pulmonary airway tree in CT images by combining region growing and grayscale reconstruction algorithms
Peng Shuang, Xiao Changyan 1377
- Three dimensional adaptive template matching algorithm for lung nodule detection
Gao Ting, Gong Jing, Wang Yuanjun, Nie Shengdong, Sun Xiwen 1384

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)09-1282-06

论文引用格式: Guo C Z, Qin Z Y, Shi W J. TV image denoising model based on energy functionals and HVS[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(9): 1282-1287. [郭从洲, 秦志远, 时文俊. 基于能量泛函和视觉特性的全变分图像降噪模型[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(9): 1282-1287.] [DOI:10.11834/jig.20140904]

基于能量泛函和视觉特性的全变分图像降噪模型

郭从洲¹, 秦志远¹, 时文俊²

1. 信息工程大学地理信息空间学院, 郑州 450001; 2. 郑州升达经贸管理学院, 郑州 451191

摘要: **目的** 基于能量泛函的全变分图像复原模型(ROF)为偏微分方程在图像处理上的应用开辟了一个新的研究领域。针对 ROF 模型存在的缺陷, 很多学者提出了改进的模型和算法, 并取得了一定的效果。基于能量泛函和视觉特性提出一种全变分图像降噪模型。**方法** 首先利用偏微分方程比较原理证明了该模型解的整体存在性, 并利用变分原理给出了该模型的 Euler-Lagrange 方程; 在数值计算时, 选用人工时间演算法和有限差分方法, 对数值近似解的离散形式进行了图像降噪 matlab 实验; 最后利用峰值信噪比和平均结构相似度两个指标进行了降噪质量评价。**结果** 从实验数据上来分析, 本文的模型在峰值信噪比上都有 0.5 ~ 1 dB 的提高, 结构相似度有 0.05 ~ 0.3 的改进。**结论** 从降噪效果上分析, 基于能量泛函和视觉特性的全变分图像降噪模型能够在降噪的同时, 保持良好的边缘和纹理特征, 优于其他改进的全变分降噪模型。

关键词: 全变分(TV); 人类视觉特性系统(HVS); 图像降噪; Euler-Lagrange 方程; 有限差分; 峰值信噪比; 平均结构相似度

TV image denoising model based on energy functionals and HVS

Guo Congzhou¹, Qin Zhiyuan¹, Shi Wenjun²

1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. Shengda Trade Economics & Management College of Zhengzhou, Zhengzhou 451191, China

Abstract; Objective The total variation image deblurring model (ROF) based on energy functional opened up a new area of research on image processing, particularly on the application of partial differential equations. The defects of the ROF model have prompted many scholars to study the improved model and its algorithm. These scholars have achieved good results. This study presents a TV image denoising model based on energy functionals and HVS. **Method** The existence of solutions for the denoising model in this paper is proven by using the comparison principle of the partial differential equation, and the Euler-Lagrange equation of the model is given using the variation principle. In terms of the numerical calculation of the model, this study discusses the discrete form of numerical approximation solution through artificial time algorithm, finite difference methods, and numerous image denoising MATLAB experiments. Finally, the two indexes of noise quality are evaluated based on the peak signal-to-noise ratio (PSNR) and mean structural similarity (MSSIM). **Result** The (0.5 ~ 1) dB PSNR and the (0.05 ~ 0.3) MSSIM present an improvement based on the experimental data and results. **Conclusion** From the analysis of denoising, the TV image denoising model based on energy functionals and HVS can maintain the image edge and texture features and is thus superior to conventional TV denoising models.

Key words: total variation; human visual system; image denoising; Euler-Lagrange equation; finite difference; peak signal-to-noise ratio (PSNR); mean structural similarity (MSSIM)

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-04-15

第一作者简介: 郭从洲(1980—), 男, 讲师, 信息工程大学地理信息空间学院博士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理与计算机视觉。

E-mail: czguo0618@sina.cn

0 引言

图像在获取、处理和传输过程中,其质量可能退化,典型表现为图像含有噪声、模糊等,再加上处理方法不完善,使实际得到的图像达不到静态设计指标。而在众多的应用领域,需要清晰的、高质量的图像,在这种情况下,图像降噪技术应运而生。图像降噪作为图像处理的一个重要分支,其目的就是通过退化图像质量的提升来达到视觉上的改善^[1]。传统的图像降噪方法包括 Wiener 滤波、最小二乘法滤波^[2]和 PDE 滤波^[3],其效果不能令人满意。在噪声较强时,输出图像中或有明显的“振铃”现象,或残留明显的噪声。因此,很多学者在设计图像降噪模型时,关注的是在抑制噪声的同时能够很好地保持边缘特征^[4]。

由于偏微分方程的全变分降噪模型具有各向异性的特点,可以实现图像的非线性降噪,因此在去除图像噪声的同时又能很好地保留图像的边缘信息^[5],使得该类型降噪模型在国内外形成了一个研究热点。全变分降噪模型的成功之处在于利用了自然图像内在的正则性^[6-7]。它是一种确定性的方法,通过引入能量泛函,将图像降噪问题转化为一个泛函求极值的问题,即变分问题^[8]。它的主要步骤为:

- 1) 从实际图像处理问题上出发,建立能量泛函及其约束条件;
- 2) 通过变分原理,求得欧拉-拉格朗日方程;
- 3) 在初边值条件下求近似解,即求微分方程的数值解。

1 全变分图像降噪模型

在成像系统为线性平移不变系统的假设下,可用如下数学模型来描述退化的图像,即

$$u_0 = k * u + n \quad (1)$$

式中, u 表示理想图像, k 表示成像系统的点扩散函数(PSF), n 表示图像的加性噪声。当 $k=I$ 时,求解 u 的过程就是一个单纯的降噪过程。

通过 u_0 求解 u 是一个不适定的数学反问题^[9]。求解数学反问题最经典的方法是 Tikhonv 正则化方法^[10],即

$$E(u|u_0) = \inf_u \left\{ \int_{\Omega} |\nabla u|^2 + \frac{\lambda}{2} (u - u_0)^2 dx dy \right\} \quad (2)$$

但是,该模型在去除噪声的同时,模糊了图像的边缘,效果不好。为了克服 Tikhonv 正则化模型的弊端,Rudin、Osher 和 Fatemi 提出了全变分图像复原模型(简称为 ROF_TV 模型)^[11]。他们认为,有噪声图像的全变分比无噪声图像的全变分大,最小化全变分可以消除噪声。因此可以通过有噪声图像的全变分极小化去除噪声,加入约束项得到能量泛函

$$E(u|u_0) = \inf_{u \in BV(\Omega)} \left\{ \int_{\Omega} |\nabla u| + \frac{\lambda}{2} (u - u_0)^2 dx dy \right\} \quad (3)$$

式中,第 1 项为全变分项,也称正则项;第 2 项为保真项,也称忠诚项;参数 λ 对平衡降噪和平滑起到重要作用,它依赖于噪声水平; $BV(\Omega)$ 为有界变差函数空间。由于 ROF 模型采用全变分 $\int_{\Omega} |\nabla u| dx dy$ 作为“平滑性”测度,从而避免了在降噪的过程中对图像边缘的模糊。但是,该模型不符合图像形态学原则,其稳态解中往往有明显的“阶梯”效应^[3]。

针对以上问题,很多学者对基本的 ROF_TV 复原模型提出了改进。文献[12]结合 Weber 定律,提出了可以通过最小化

$$\inf_u \left\{ \int_{\Omega} \frac{|\nabla u|}{u} + \frac{\lambda}{2} (u - u_0)^2 dx dy \right\} \quad (4)$$

取得更好的降噪效果,简记为 WROF_TV 模型。

文献[13]提出了一种非线性与线性的加权变分降噪模型

$$\inf_u \left\{ \int_{\Omega} g(|\nabla u|) |\nabla u| + \frac{\lambda}{2} (u - u_0)^2 dx dy \right\} \quad (5)$$

该模型在权函数 $g(|\nabla u|)$ 的引导下,在图像的平坦区域实现较大平滑,在边缘处实现较小平滑,从而更好地保持了图像的边缘信息和纹理特征。

文献[14]提出了一种基于变分偏微分方程的双参数图像降噪模型

$$\inf_u \left\{ \int_{\Omega} |\nabla u| + \frac{\lambda}{2} |\nabla u|^2 + \frac{\beta}{2} (u - u_0)^2 dx dy \right\} \quad (6)$$

利用变分法的极大极小原理,证明了该双参数模型存在唯一的极小值,与 ROF_TV 模型的结果比较,双参数模型在视觉上及峰值信噪比上都有所改进。

2 基于能量泛函和视觉特性的全变分图像降噪模型

图像处理的最终结果要由人眼接受,这就需要关注人类视觉特性系统(HVS)。就像人们熟知的“月高星稀”现象,这其实与HVS之一——对比灵敏度有关,也就是与人眼分辨亮度差异的能力有关。Weber定律^[12]表明,人眼视觉系统的响应主要依赖于背景亮度的局部变化,其数学表述为

$$\frac{\Delta L}{L} = \text{const} \quad (7)$$

式中, L 为物体的客观亮度, ΔL 为目标与背景亮度的差值。只要比值 $\frac{\Delta L}{L} \neq \text{const}$,人眼就感受到图像的局部差异。可见,对于相同的梯度在不同背景亮度下会有不同的视觉效果。

ROF-TV模型对应的Euler-Lagrange方程是

$$\text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) - \lambda(u - u_0) = 0 \quad (8)$$

其扩散系数是 $\frac{1}{|\Delta u|^3}$,在图像边缘处, $|\Delta u|$ 的值较大,扩散系数较小;在平缓区, $|\Delta u|$ 的值较小,扩散系数较大,因此,ROF-TV模型能够在保持纹理细节的同时去除噪声。

受式(6)模型的启发,提出一种基于能量泛函和视觉特性的全变分图像降噪模型

$$\inf_u \left\{ \int_{\Omega} \frac{|\nabla u|}{u} + \beta |\nabla u| + \frac{\lambda}{2} (u - u_0)^2 dx dy \right\} \quad (9)$$

简记为NWROF-TV模型。式中第1项基于Weber定律,即 $\frac{|\nabla u|}{u} = \text{const}$;第2项借鉴ROF-TV模型的平滑项;第3项是基于最小二乘的保真项; λ, β 为平衡参数。

2.1 模型分析

利用变分原理^[12,15],式(9)模型的Euler-Lagrange方程是

$$\left(\frac{1}{u} + \beta\right) \text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) - \lambda(u - u_0) = 0 \quad (10)$$

其梯度下降流是

$$u_t = \left(\frac{1}{u} + \beta\right) \text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) - \lambda(u - u_0) \quad (11)$$

如果该抛物方程的解存在,那么它的解就是式(9)模型的解^[15]。

定理1 抛物方程

$$\begin{cases} u_t = \left(\frac{1}{u} + \beta\right) \text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) - \lambda(u - u_0) & (x, y) \in \Omega, t > 0 \\ u(x, y, 0) = u_0(x, y) & (x, y) \in \Omega, t = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial n} = 0 & (x, y) \in \partial\Omega \end{cases} \quad (12)$$

的解整体存在。

证明 记

$$L(u) \equiv u_t - \left(\frac{1}{u} + \beta\right) \text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) = \lambda(u - u_0) \quad (13)$$

因为 $u(x, y)$ 是像素值,所以有界。故

$$L(u) \leq u_t - \beta' \text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) \quad (14)$$

式中, $\beta' = \min\left\{\frac{1}{u} + \beta\right\}$ 是常数。对于抛物方程

$$\bar{u}_t = \beta' \text{div}\left(\frac{\nabla \bar{u}}{|\nabla \bar{u}|}\right) - \lambda(\bar{u} - u_0) \quad (15)$$

它和ROF-TV模型对应的Euler-Lagrange方程的梯度下降流

$$u_t = \text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right) - \lambda(u - u_0) \quad (16)$$

结构上是一致的,所以存在唯一解^[11]。利用比较原理^[16],原方程式(12)的解整体存在。

2.2 数值解法

方程式(12)属于非线性抛物方程,直接求其解析解是非常困难的。很多情况下,都是求其近似数值解,方法有很多,比如有限差分法、有限元法、有限体积法^[17-18]。为了实验编程简单,采用有限差分法,并利用向前差分格式求解

$$\begin{aligned} u_{i,j}^{n+1} &= \\ u_{i,j}^n + \Delta t \left\{ \left(\frac{1}{u_{i,j}^n} + \beta\right) \text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right)_{i,j}^n - \lambda(u_{i,j}^n - u_{i,j}^0) \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right)_{i,j}^n = \left(\frac{u_{xx}u_y^2 - 2u_xu_yu_{xy} + u_{yy}u_x^2}{|\nabla u|^3}\right)_{i,j}^n \quad (18)$$

2.3 参数估计

由于 $\text{div}\left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right)$ 为非线性各项异性扩散过程,扩散系数 $\left(\frac{1}{u} + \beta\right)\frac{1}{|\nabla u|^3}$ 控制着扩散行为:在图像的

突变区, $|\nabla u|$ 的值比较大,模型的扩散能力弱,可以保护图像细节和纹理;在图像的平缓区, $|\nabla u|$ 的值比较小,模型的扩散能力强,增强消除噪声的效果。

在固定点 $u_0(i, j)$ 处, 对应的梯度模 $|\nabla u_0(i, j)| = \sqrt{u_x^2(i, j) + u_y^2(i, j)}$ 也是固定的, 所以扩散系数 $\left(\frac{1}{u} + \beta\right) \frac{1}{|\nabla u|^3}$ 的大小就取决于参数 β 。

在图像的突变区, 参数 β 的值大一些, 使得模型的扩散能力减弱; 在图像的平缓区, 参数 β 的值大一些, 使得模型的扩散能力减弱。可见参数 β 要满足以下条件:

- 1) 参数 β 的值与梯度的模 $|\nabla u|$ 成反比;
- 2) $\beta \neq \frac{1}{|\nabla u|}$;
- 3) 当 $|\nabla u| \ll 1$ 时。

实验中取 $\beta = \frac{1}{1 + |\nabla u|}$ 。

因为参数 λ 起到平滑和保真的平衡作用, 所以 λ 的取值很重要。将改进模型对应的 Euler-Lagrange 方程式(10)两端同乘 $u - u_0$, 然后再整个图像区域 Ω 上积分可得

$$\lambda = \frac{\int_{\Omega} \left(\frac{1}{u} + \beta \right) \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) (u - u_0) dx dy}{\int_{\Omega} (u - u_0)^2 dx dy} = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \int_{\Omega} \left(\frac{1}{u} + \beta \right) \operatorname{div} \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) (u - u_0) dx dy \quad (19)$$

此处 σ 是噪声的方差。可见, λ 与 $\frac{1}{\sigma^2}$ 成正比。

3 实验对比分析

为了验证改进模型式(7)的有效性, 利用 Matlab2012 进行计算机仿真实验, 共选用了3幅灰度图像作为观测图像。人工加入的噪声是均值为0, 方差为0.001的高斯噪声(图1)。为了不超过 CLF 条件限制, 时间步长取 $\Delta t = 0.1$, 迭代次数为50。

图像复原客观评价标准选用峰值信噪比 (PSNR) 和平均结构相似度 (MSSIM)。PSNR 定义为

$$\text{PSNR} = 10 \lg(L^2 / \text{MSE}) \quad (20)$$

$$\text{MSE} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{(u(i, j) - u^*(i, j))^2}{M \times N} \quad (21)$$

式中, $u^*(i, j)$ 为待评价图像, $u(i, j)$ 为原始清晰图

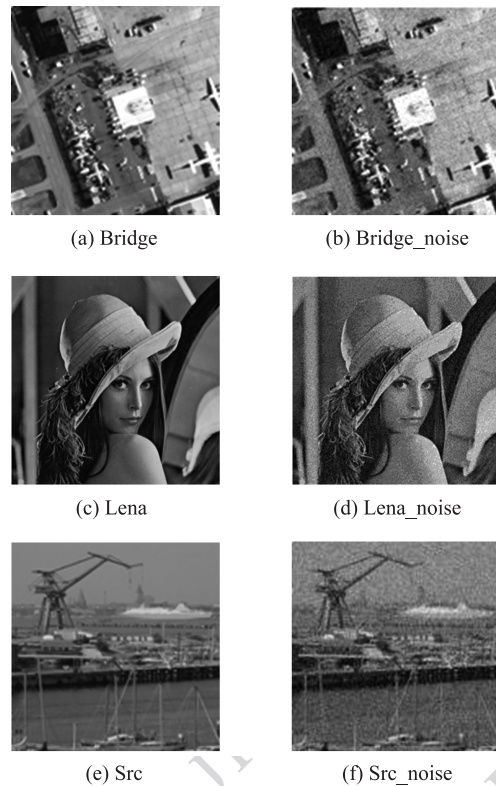


图1 原始图像和高斯噪声图像

Fig. 1 Original image and Gaussian noise images

像, L 是图像灰度的取值范围。从式(7)可以看出, 如果 PSNR 的值大, 就意味着降噪效果好。

平均结构相似度 (MSSIM) 的定义为

$$\text{MSSIM}(u, u^*) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \text{SSIM}(u_k, u_k^*) \quad (22)$$

$$\text{SSIM}(u, u^*) = l(u, u^*) \times \frac{c(u, u^*) s(u, u^*)}{s(u, u^*)} \quad (23)$$

式中, $l(u, u^*)$ 、 $c(u, u^*)$ 和 $s(u, u^*)$ 分别是亮度比较函数、对比度比较函数和结构相似度比较函数。表1分别列出了不同降噪模型的 PSNR 值和 MSSIM 值。

从表1中数据分析可以看出, ROF_TV 降噪模型对应的 PSNR 值明显小于其他两种模型; WROF_TV 和 NWROF_TV 模型的 PSNR 值比较接近, 但是从 MSSIM 的值来看, NWROF_TV 模型更加符合人眼视觉系统 (HVS), 图像的结构相似程度更好。另外, 随着实验迭代次数的增加, NWROF_TV 模型的数值解更加稳定。通过对图2—图4的对比观察, NWROF_TV 模型的降噪效果要优于其他两种模型。单从图像 Bridge 的降噪效果观察, 这说明 NWROF_TV 模型在处理信息量更大的图像 (如遥感图像) 时也比 ROF_TV 图像更有优势。

表 1 3 种降噪模型的峰值信噪比平均结构相似度
Table 1 The PSNR and MSSIM value of three noise models

降噪模型	PSNR 值(迭代 50 次)			MSSIM 值(迭代 50 次)		
	Bridge	Lena	Src	Bridge	Lena	Src
ROF_TV	26.637 4	25.904 5	25.908 1	0.694 4	0.683 8	0.734 1
WROF_TV	29.077 1	29.838 0	29.233 0	0.734 4	0.692 1	0.702 1
NWROF_TV	29.937 5	31.536 8	30.016 6	0.792 5	0.926 3	0.785 4



图 2 ROF_TV 模型降噪图像
Fig. 2 ROF_TV Denoising image processing model



图 3 WROF_TV 模型降噪图像
Fig. 3 WROF_TV Denoising image processing model



图 4 NWROF_TV 模型降噪图像
Fig. 4 NWROF_TV Denoising image processing model

4 结 论

在总变分模型的基础上提出了一种改进的降噪模型,采用简单的差分数值算法进行了对比实验,从实验结果数据和直接观察来看,均好于传统的降噪模型。降噪后的图像边缘细节特征、纹理特征保持

较好。但是,从遥感图像 Bridge 放大观察可以看出,3 种降噪模型对弱边界都不同程度的削弱,这也为以后的研究指出了方向。本文提出的模型与两个参数密切相关,除了进行大量的实验外,如何利用数学的方法确定这些参数的取值是未来关注的重点。另外,该模型对应偏微分方程的数值解法种类繁多,选择恰当的离散格式也是有意义的研究工作。

参考文献 (References)

- [1] Chan T, Esedoglu S, Park F, et al. Total variation image restoration: overview and recent developments [M]//Handbook of Mathematical Models in Computer Vision. New York: Springer, 2006: 17-31. [DOI:10. 1007/0-387-28831-7_2]
- [2] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L, et al. translation. Digital image processing [M]. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2005: 175-207. [Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L, 数字图像处理[M]. 2版. 阮秋琦, 阮宇智, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2005: 175-207.]
- [3] Wang D K, Hou Y Q, Peng J Y. Image Processing Based on PDE[M]. Beijing: Science Press, 2008: 146-147. [王大凯, 侯榆青, 彭进业. 图像处理的偏微分方程方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 146-147.]
- [4] Jiang W, Hu X G. A kind of image restoration model based on PDE[J]. Micro Computer Information, 2008, 24(12): 305-306. [蒋伟, 胡学钢. 一种基于 PDE 的图像复原模型[J]. 微计算机信息(测控仪表自动化), 2008, 24(12): 305-306.] [DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-0570. 2008. 12. 123]
- [5] Shi Y Y, Chang Q S. A model for image deblurring and denoising based on the Rudin Osher Fatemi model[J]. Computational Physics (English version), 2006, 23(5): 551-558.
- [6] Vogel C R, Oman M E. Iterative methods for total variation denoising[J]. SIAM Sci Comput, 1996, 17(5): 227-238. [DOI: 10. 1137/0917016]
- [7] Perona P, Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on PAMI, 1990, 12(7): 629-639. [DOI: 10. 1109/34. 56205]
- [8] Qian W C. Generalized Variational Principle[M]. Shanghai: Knowledge Press, 1985: 19-20. [钱伟长. 广义变分原理[M]. 上海: 知识出版社, 1985: 19-20.]
- [9] Zhou M Y. Deconvolution and Signal Recovery[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2001: 55-74. [邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 55-74.]
- [10] Tikonov A N, Arsenin U Y. Solution of Ill-Posed Problems [M]. New York: John Wiley & Sons, 1977: 9-21.
- [11] Rudin L, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D, 1992, 60: 259-268. [DOI: 10. 1016/0167-2789(92)90242-F]
- [12] Shen J H. Weber's law and weberized TV restoration[J]. Physica D, 2003, 175(3-4): 241-251. [DOI: 10. 1016/S0167-2789(02)00734-0]
- [13] Chen L X, Feng X C, Wang W W, et al. Image denoising algorithms based on weighted variation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 392-395. [陈利霞, 冯象初, 王卫卫, 等. 加权变分的图像降噪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 392-395.]
- [14] Hu X H, Chen D Q. Image denoising model based on variational partial differential equation with double parameters[J]. Journal of Chong qing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2012, 24(3): 392-394. [胡晓红, 陈大卿. 基于变分偏微分方程的双参数图像降噪模型[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 24(3): 392-394.]
- [15] Lao D Z. Fundamentals of the Calculus of Variations[M]. 2nd ed. Beijing: Defense Industry Press, 2011: 181-200. [老大中. 变分法基础[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2011: 181-200.]
- [16] Ye Q X, Li Z Y, Wang M X, et al. Reaction-diffusion equations Introduction[M]. Beijing: Science Press, 2011: 30-69. [叶其孝, 李正元, 王明新, 等. 反应扩散方程引论[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 30-69.]
- [17] Zhang W S. Finite Difference Method in Partial Differential Equations Scientific Computing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 172-268. [张文生. 科学计算中的偏微分方程有限差分法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 172-268.]
- [18] Li R H. Numerical Solution of Partial Differential Equations [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2012: 163-203. [李荣华. 偏微分方程数值解法[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2012: 163-203.]