

一种非线性逆扩散图像增强算法

黄世国^{1,2}, 耿国华¹

(1. 西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710069;

2. 福建农林大学 计算机与信息学院, 福建 福州 350002)

(fjhsg25@sina.com.cn)

摘 要:针对传统图像增强算法无法同时消除噪声和保持纹理的不足,从线性逆扩散的基本原理出发,提出了非线性逆扩散图像增强算法的原则,给出了适合的扩散系数。试验结果表明本算法有效地增强了图像,消除了图像中的噪声,能够保留图像中的细节纹理。

关键词:图像增强; 逆扩散; 非线性

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

Nonlinear inverse diffusion image enhancement algorithm

HUANG Shi-guo^{1,2}, GENG Guo-hua¹

(1. College of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an Shaanxi 710069, China;

2. College of Computer and Information, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou Fujian 350002, China)

Abstract: Traditional image enhancement algorithms could not eliminate noise and preserve textures at the same time. According to the principle of linear inverse diffusion, criteria on nonlinear inverse diffusion image enhancement algorithm were put forward and suitable diffusion coefficient was proposed. The experimental results show that this algorithm can enhance image effectively, eliminate the noise in the image and preserve the textures and details.

Key words: image enhancement; inverse diffusion; nonlinear

0 引言

Osher 和 Rudin 提出了基于双曲线型的偏微分方程 (Partial Differential Equation, PDE) 图像增强算法,其算法的形式如下^[1]:

$$I_t = -\text{sign}(I_{\eta\eta}) |\nabla I| \quad (1)$$

其中, η 是梯度方向的向量。

该算法也称之为振荡滤波器图像增强算法,可以作为稳定的、盲目去卷积的、去模糊算法。但是当图像中存在微弱噪声时,式(1)的图像增强算法将显著放大噪声,图像增强的效果较差。为此, Alvarez-Mazorra 将方向导数项和 Osher-Rudin 的振荡滤波器相结合,其中振荡滤波器受平滑二阶导数的控制,得到了如下形式^[2]:

$$I_t = -\text{sign}(G_\sigma * I_{\eta\eta}) |\nabla I| + \lambda I_{\xi\xi} \quad (2)$$

其中, λ 是正的常数量。式(2)的右边第一项产生了分段平滑区域,这些区域是由平滑的 η 二阶导数过零点的振荡滤波器分隔开的。第二项是沿着水平集方向各向异性扩散。式(2)的实质是通过引入式(2)右边的第二项来抑制图像中的噪声。

但上述算法均假设图像是用分段常数函数来逼近的,式(2)中的平滑处理在整个图像增强过程中一直存在,这就导致了在图像增强过程中图像的细节纹理消失。

一些学者研究认为线性逆扩散可以用于图像增强^[3],并且当图像中不存在噪声时可以获得较好的图像增强效果。其不足之处在于无法对噪声进行有效地控制。

为此,从线性逆扩散图像增强算法的原理出发,借鉴振荡

滤波器图像增强过程引入去噪处理的思想,提出了不同于改进的振荡滤波器算法的非线性逆扩散图像增强算法。

1 线性逆扩散图像增强算法

传统的线性逆扩散图像增强算法可以用下式表示:

$$I_t = -c\Delta I(x, t) \quad (3)$$
$$I|_{t=0} = I_0$$

其中 c 是扩散系数用于控制图像增强的强度, Δ 是拉普拉斯算子, I_0 是初始图像。

线性逆扩散与高斯盲目去卷积是等价的。当 $c = 1$ 时,在一维情况下, (3) 式的傅立叶系数为:

$$\sum_k \frac{\partial C_k}{\partial t} e^{ikx} = \sum_k k^2 C_k e^{ikx} \quad (4)$$

式(4)的解为:

$$C_k = e^{k^2 t} \quad (5)$$

研究成果表明,当图像的信噪比很高,即图像中基本上不存在噪声时,线性逆扩散增强可以获得较好的图像复原效果。式(5)表明线性逆扩散会放大噪声,随着时间的推进,不断产生新的振荡,直到取得满足极小值和极大值的条件,当时间演变到某一时刻时,图像中的原始信息全部消失。

式(3)的计算过程表明:线性逆扩散算法处理过程中将正的拉普拉斯值变为负的拉普拉斯值,显然,该算法不满足最大值原理,但产生了更为尖锐的斜坡,从而形成更强对比度的增强图像。

线性逆扩散图像增强算法的一般形式为:

$$I_t = -c \nabla I(x, t) \quad (6)$$

$$I|_{t=0} = I_0$$

其中 ∇I 为梯度, c 为常数。

当 $c = 1$ 时, 应用式(6)对取自 Gilboa 论文中的 Teddy bear 原图像^[7,10] (图1(a))进行线性逆扩散图像增强的结果。图1(b)表明原图像经线性逆扩散图像处理, 图像得到了增强, 但图像中存在的微弱噪声也显著增强; 图1(c)表明, 当时间推进到一定时刻时, 应用式(6)增强后, 图像中的信息基本上全部消失了。

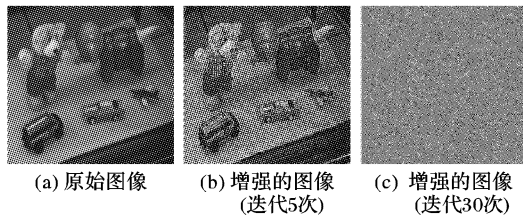


图1 线性逆扩散处理后的图像效果

图1(b), (c)表明, 线性逆扩散是不稳定的 PDE 方程, 图像增强过程中不断产生振荡, 严重破坏了图像中的原有信息。为此, 需要找到在图像增强的同时抑制噪声的算法, 以获得高质量的图像增强效果。

2 非线性逆扩散图像增强算法

一些学者研究表明非线性扩散处理能够有效地去除图像中的噪声, 同时这些算法往往采用了边缘停止方法, 去除噪声的同时有效地保留了图像中的边缘。

非线性扩散去噪算法的一般形式如下^[4,5]:

$$I_t = c(|\nabla I|) \nabla I(x, t) \quad (7)$$

$$I|_{t=0} = I_0$$

其中, $c(|\nabla I|)$ 是扩散系数, 是随着梯度变化的非增正函数, 并且在高梯度值区域其值趋于 0。式(7)的扩散系数的值总为大于等于 0 的实数, 对图像没有增强的功能, 但能够有效地抑制噪声。

以上分析可知, 当线性逆扩散图像增强中结合了非线性扩散去噪算法时, 应该可以克服线性逆扩散图像增强过程中产生振荡的问题, 而且能够很好地保留图像的边缘。为此, 基于线性逆扩散的基本原理, 提出了非线性逆扩散图像增强算法。该算法与原来的振荡器图像增强算法的形式是不同的。因为振荡器图像增强算法应用了双曲线型 PDE, 而非线性逆扩散图像增强算法则采用了基于扩散方程的图像增强算法。

为了既能够抑制噪声, 又能图像增强并保留图像边缘, 需要将扩散和逆扩散相结合。同时, 改进的振荡器图像增强算法中引入新的量抑制噪声的思想对非线性逆扩散图像增强是适用的。Gilboa 将前向扩散和后向扩散相结合提出了前后向扩散图像增强算法^[6-8], 其扩散系数的构造极为困难, 对图像增强算法应遵循的原则也没有详尽的说明。

根据上述分析, 提出了新的非线性逆扩散的图像增强的原则, 同时该算法中逆扩散和扩散必须能够自适应地发生变化。

非线性逆扩散图像增强应遵循如下原则: 对于低梯度值区域即平滑区域, 主要是抑制该区域中的微弱噪声, 实现平滑区域的去噪, 在该区域起主导作用的是扩散过程。随着梯度增大, 扩散过程逐渐减弱直至消失, 然后逆扩散过程起主导作用, 对图像进行增强。当到达图像的高梯度值区域, 应避免对该区域进行增强, 从而克服原有的图像增强算法对图像信息和噪声都进行增强的缺点。同时对该区域也不进行扩散处

理, 从而保留图像的边缘。

2.1 非线性逆扩散图像增强算法

线性逆扩散增强算法中, 扩散系数为负的常数。式(6)和式(7)表明, 当扩散系数为正时是扩散去噪过程; 当扩散系数为负时是逆扩散图像增强过程。前面已给出了基于扩散的图像增强算法应满足的原则, 可以通过自适应地改变扩散系数的值来实现上述原则。

前面已提到该算法导致图像增强过程中不断产生振荡, 为此, 提出了非线性逆扩散图像增强算法, 其形式如下:

$$I_t = c(|\nabla I|) \nabla I(x, t) \quad (8)$$

$$I|_{t=0} = I_0$$

式(7)和式(8)形式上完全一样, 但两者对扩散系数的要求是不同的。式(7)扩散系数的要求为大于等于 0 的非增函数, 仅实现图像去噪的功能。而式(8)中扩散系数的变化必须满足前面提出的图像增强原则。

但是该扩散系数的构造是比较困难的。为此, 我们从窗方法^[9]出发研究扩散系数的问题。

$$h[n] = \begin{cases} \frac{\sin(n-M)}{\pi(n-M)} & \text{对于 } 0 \leq n \leq N \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)是窗方法中最常用的滤波器, 类似于理想的低通滤波器。从该滤波器出发, 提出 $\sin(\sqrt{x})/\sqrt{x}$ 作为非线性扩散图像增强的扩散系数。该系数与梯度的关系图如图2所示。

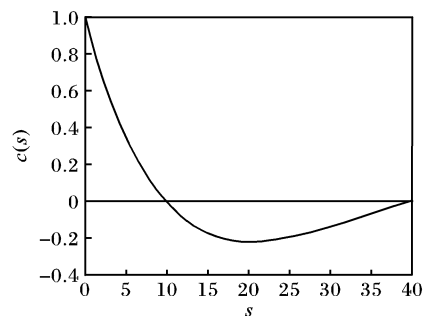


图2 扩散系数与梯度的关系

图2表明: 当梯度较小时, 扩散系数的值为正, 对平滑区域进行去噪处理。随着梯度值变大, 扩散过程不断减弱, 当梯度值超过某个值时, 扩散系数的值为负, 起图像增强的作用。当梯度到达高梯度值区域时, 扩散系数的值趋于 0, 对该区域既不进行图像增强, 又不进行图像去噪处理。扩散系数 $\sin(\sqrt{x})/\sqrt{x}$ 较好地满足了非线性逆扩散图像增强的原则。

2.2 算法的数值实现

非线性逆扩散图像增强算法的数值实现采用了文献[4]的数值算法。

假设图像中某点的像素为 I_{ij} , 那么相邻的四个像素分别为:

$$I_N = I_{i-1,j}, I_S = I_{i+1,j}, I_W = I_{i,j-1}, I_E = I_{i,j+1} \quad (10)$$

相应的方向导数为:

$$D(I_Z) \equiv I_Z - I_{ij} \quad Z \in \{N, S, W, E\} \quad (11)$$

相应的扩散系数为:

$$C(I_Z) = \sin(\sqrt{I_Z})/\sqrt{I_Z} \quad (12)$$

$$c(|\nabla I|) |\nabla I| = D_i I_{i,j}^n = \sum_{Z \in \{N, S, W, E\}} I_Z^n C(I_Z^n) \quad (13)$$

2.3 实验结果

2.3.1 非线性逆扩散图像增强的实验结果

图3(b)表明原图像明显得到了增强, 图像中的微弱噪声受到了抑制。其原因在于梯度值小的区域, 起决定作用的是

扩散去噪处理,有效地抑制了噪声。在该区域逆扩散不起作用。随着梯度值的增大,扩散去噪处理减弱,而逆扩散图像增强的功能增强,当梯度值超过某个值时,逆扩散增强处理占主导地位,起图像增强的作用。在梯度值大的区域既不进行扩散去噪处理又不进行逆扩散增强处理,从而不会放大噪声并保留了图像的边缘。本算法还能有效地保留图像的细节纹理。同时,该算法也没有产生错误的增强效果。

2.3.2 非线性逆扩散图像增强算法与传统算法的比较

图3(b)和图3(c)表明,改进的振荡滤波器图像增强算法增强了图像,保留了图像的边缘,有效地抑制了噪声。但无法保留图像中的细节纹理如玩具熊衣服上的细节纹理。图3(d)~(f)分别是应用直方图均衡化、基于二阶微分的Laplacian掩膜、基于一阶微分的梯度掩膜算法^[11]图像增强后的效果,这些算法均起到了图像增强的作用,保留了图像的细节纹理,但是图像中的噪声也得到了增强。而非线性逆扩散图像增强算法自适应地选择扩散去噪处理和逆扩散图像增强处理,保留了图像的细节纹理,克服了传统图像增强算法无法在图像增强过程中既抑制噪声又保留细节纹理的不足。试验结果表明我们提出的扩散系数很好地满足了图像增强的原则。

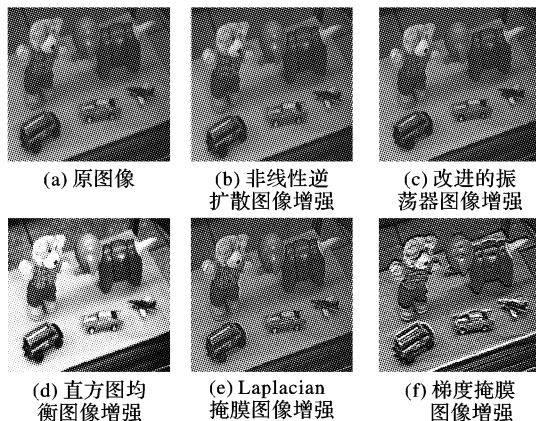


图3 各种图像增强算法效果比较

3 结语

基于PDE的图像增强算法中,基于双曲线型PDE的振荡滤波器算法是经常用到的,而基于逆扩散的图像增强算法则较少研究。为此,从线性逆扩散的基本原理出发,提出了非线性逆扩散图像增强算法的原则,给出了适合的扩散系数 $\sin(\sqrt{x})/\sqrt{x}$ 。试验结果表明非线性逆扩散图像增强算法有效

地增强了图像,消除了图像中的噪声,保留了图像中的细节纹理。同时将非线性逆扩散算法与其他传统的图像增强算法进行比较,比较结果表明传统的图像增强算法无法既抑制噪声又保留细节纹理。

参考文献:

- [1] OSHER SJ, RUDIN LI. Feature-Oriented Image enhancement using Shock Filters[J]. SIAM Journal of Numerical Analysis, 1990, 27(4): 919-940.
- [2] ALVAREZ L, MAZORRA L. Signal and image restoration using shock filters and anisotropic diffusion[J]. SIAM Journal of Numerical Analysis, 1994, 31(2): 590-605.
- [3] KIMMEL R, MALLADI R, SOCHEN N. Images as Embedding Maps and Minimal Surfaces: Movies, Color, Texture, and Volumetric Medical Images[J]. International Journal of Computer Vision, 2000, 39(2): 111-129.
- [4] 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.
- [5] CHARBONNIER P, AUBERT G, BLANC-FERAUD M, et al. Two deterministic half-quadratic regularization algorithms for computed imaging[A]. Proceedings of the International Conference on Image Processing[C]. 1994, Vol 2: 68-172.
- [6] GILBOA G, ZEEVI YY, SOCHEN N. Anisotropic selective inverse diffusion for signal enhancement in the presence of noise[A]. Proceedings of IEEE ICASSP-2000[C]. Istanbul, Turkey, 2000, Vol 1: 221-224.
- [7] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI YY. Forward-and-Backward Diffusion Processes for Adaptive Image Enhancement and Denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(7): 689-703.
- [8] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI YY. Image Enhancement and Denoising by Complex Diffusion Processes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 25(8): 1020-1036.
- [9] CHEN C-T. Digital Signal Processing: Spectral Computation and Filter Design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 305-310.
- [10] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI YY. Variational denoising of partly-textured images by spatially varying constraints[EB/OL]. http://www.math.ucla.edu/~gilboa/pub/IP_fidel_GSZ.pdf, 2005.
- [11] GONZALEZ RC, WOODS RE. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004. 59-116.

(上接第1835页)

4 结语

本文提出利用水印信息调制载体小波矩特征的数字水印算法,可以有效地抵抗几何攻击。把机器学习的方法应用于数字水印的检测中,在水印嵌入时人为地在水印序列前加入一段模板信息,通过网络训练输出未知的隐藏在图像中的水印信息。本算法具有计算简单、容易实现、保密性强的优点,同时对滤波、有损压缩旋转、剪切等攻击具有很强的稳健性,在水印检测时不需要原始图像信号的参与,这大大地扩展了它的应用范围。

参考文献:

- [1] TIRKEL AZ, RANKIN GA, VAN SCHYNDEL RM, et al. Electronic watermark[A]. Digital Image Computing Technology and Applications(DICTA'93)[C]. Sydney Australia, 1993. 666-673.
- [2] TANAKA MK. Video-Steganography: How to secretly embed a signa-

ture in a picture[J]. Journal of the Interactive Multimedia Association Intellectual Property Project, 1994, 1(1): 187-205.

- [3] COX IJ, KILIAN J, LEIGHTON T, et al. A secure, robust watermark for multimedia[A]. Proceedings of First International Information Hiding Workshop[C]. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 185-206.
- [4] PEREIRA S, VOLOSHYNOVSKIY S, PUN T. Optimized wavelet domain watermark embedding strategy using linear programming[A]. Proceeding of SPIE AeroSense[C]. Orlando, USA, Wavelet Applications, 2000, VII: 26-28.
- [5] YU PT, TSAI HH, LIN JS. Digital watermarking based on neural networks for color images[J]. Signal Processing, 2001, 81: 663-671.
- [6] 周亚洲, 白贵儒. 在DCT域内应用神经网络检测图像水印[J]. 数据采集与处理, 2001, 16(4): 498-503.
- [7] 王卫卫, 杨波, 宋国乡. 基于图像小波变换低频系数的数字水印算法[J]. 信号处理, 2001, 17(6): 554-557.
- [8] 许东, 吴铮. 基于MATLAB6.x的系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.