

基于梯度增强扩散的高速路裂纹图像去噪算法

张永强

(河南财经政法大学计算机与信息工程学院 郑州 450002)

摘要 针对高速公路路面病害裂纹自动检测问题,采用高速 CCD 相机对路面进行成像,并通过图像分析的方法来自动完成路面病害裂纹的检测。由于路面含有油渍、杂质等负信息的干扰,因此需要对路面裂纹图像进行去噪。传统图像去噪算法一般采用全局滤波的方式,这就会破坏图像中裂纹的边缘纹理特征。为解决这一现实难题,提出了一种基于梯度增强扩散的路面裂纹图像的去噪算法。算法主要针对含有裂纹结构的路面图像,在基于偏微分扩散方程的去噪过程中引入了裂纹结构分析,并根据裂纹局部梯度变化,重新定义了扩散系数,以在有效增强路面裂纹边缘特征的同时去除图像中的小尺度噪声。仿真实验表明,与传统的全局平滑滤波以及中值滤波相比,这一算法对裂纹纹理图像的去噪具有很好的效果,表现出一定的实际工程应用价值。

关键词 图像去噪,梯度增强,偏微分扩散方程,路面裂纹

中图法分类号 TP392 **文献标识码** B

Algorithm for Pavement Distress Image Denoising Based on Gradient Enhanced Diffusion

ZHANG Yong-qiang

(College of Computer and Information, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450002, China)

Abstract The pavement distress auto detection with rapid CCD camera suffers from the complicated pavement's background which contains greasy dirt and inclusion. The traditional image denoising algorithm suffers from the edge and texture features' losing which seriously interrupts the reliability of the detection system. In order to overcome this problem, an algorithm for image denoising with line-type texture based on gradient enhanced diffusion was proposed. Taking account of the character of image which includes line-type texture, the structure of texture can be imported into denoising. According to the local change of gradient, the diffusion factor was defined afresh. The simulated experiment results demonstrate that the method has the superiority and stability with the line-type texture image denoising.

Keywords Image denoising, Gradient enhanced, Partial differential equations diffusion, Pavement distress

1 引言

高速公路路面的病害裂纹严重威胁着行车安全,车辆在高速公路上行驶时,为安全起见,要求路面有较高的平整度。但高速公路投入使用后,因为车轮的反复碾压以及雨雪等自然天气因素的影响,路面必定会出现各种裂纹病害^[1,2],若不进行快速及时的检测维修,必将危害行车安全。本课题组设计的高速公路路面裂纹病害自动检测方案的基本原理是利用高速 CCD 对路面进行快速成像,进而根据图像分析来判断路面是否存在裂纹和裂纹的位置,然而由于路面存在油污等杂质以及路面图像噪声颗粒大的客观难题给裂纹的检测带来了困扰,因此必须在进行裂纹检测分析之前进行去噪处理。图像去噪是图像处理领域中的一个重要分支,在工业检测、跟踪定位等多方面都有很强的应用需求。在图像去噪过程中一般需要进行平滑处理,而整体的平滑经常会破坏图像的边缘纹理信息,给后续的检测定位造成很大困难。为了避免纹理信息因平滑而丢失,对图像的去噪处理需要满足两个要求^[3,4]: (1)在图像边缘纹理处平滑力度小,而在平坦区域平滑力度

大,从而去除图像中微小随机噪声;(2)沿着边缘方向平滑力度大,垂直边缘方向平滑力度小,以免破坏图像的梯度信息。

近年来,在图像的分析处理技术中大量引入了扩散偏微分方程(Partial Differential Equations, PDE),这一技术由于使得图像的分析处理拥有显著的效果提升而引人关注,比较经典的有 Perona、Malik 的各向异性扩散,Weickert 提出的相干增强扩散方程^[5],Osher 和 Rudin 提出的图像增强型 shock 滤波器。这些方法代表了当前去噪、锐化以及增强流式结构等几类典型的方向,但这些方法都是为了克服专一问题而提出的,均存在各自难以解决的局限性^[6,7],它们并不适用于对高速路面图像的去噪,比如各向异性扩散无法抑制边缘处噪声,相干增强扩散造成虚假条纹,shock 滤波器容易放大噪声等等。

针对前人研究的不足以及该应用领域对图像去噪的需求,提出了一种基于梯度增强扩散的裂纹纹理图像的去噪方法。该方法主要针对含有裂纹等裂纹结构的路面图像,在去噪过程中引入了裂纹结构分析,能在完成去除噪声任务的前提下,较大程度地保证裂纹特征不被降低,克服了平滑处理对

到稿日期:2012-08-10 返修日期:2012-12-04 本文受河南省科技厅重点科技攻关项目(112102210199)资助。

张永强(1972—),男,硕士,副教授,主要研究方向为软件工程、情景感知,E-mail:hn_zhangyongqiang@yahoo.com。

边缘纹理信息的破坏困难^[8]。为了验证该算法的优越性,开展了仿真实验,并将实验结果与传统的全局平滑滤波以及中值滤波的结果进行了比较分析。

2 扩散方程去噪的基本原理

基于各向异性扩散方程的去噪模型是一种非线性的方法,能克服线性滤波方法存在的模糊边缘和边缘位置移动的缺点^[1]。其基本思想是:图像中边缘强的地方减小扩散,而图像边缘弱的地方加强扩散,方程如下所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}[g(|\nabla u|)\nabla u] \\ u(x, y, 0) = u(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $u(x, y, t)$ 是随时间变化的图像; $|\nabla u|$ 是梯度的模; g 是扩散系数,它的形式决定了扩散机制,为了实现保存细节的去噪效果, g 一般取为关于梯度的非负递减函数,且 $g(0)=1$, $\lim_{x \rightarrow \infty} g(x)=0$ 。

g 的常用形式有 $g(x)=e^{-x/k^2}$ 和 $g(x)=\frac{1}{1+(x/k)^2}$, 其中 x 代表当前的梯度幅值, k 代表全局梯度阈值。在对图像进行逐点扩散时,如果经过梯度较大的边缘纹理处,扩散就会减小幅度,以确保图像边缘的纹理能够得到保存;如果经过梯度较小的平坦区域处,扩散就会增加幅度,使得噪声能够被最大限度地抑制。经过多次迭代处理后,图像的边缘纹理结构就能保存下来,大面积的区域也非常光滑,达到了去噪的目的,这就是各向异性扩散去噪的基本原理。但是这一扩散方案仍然存在问题,在理论上是方程解的唯一性和稳定性无法保证,在实际应用中就表现为:若图像中存在大尺度噪声,这些噪声同样产生大的梯度值,而仅仅通过一个梯度阈值法区分噪声和真实边缘,这一大尺度噪声就无法去除,降低了去噪性能。有鉴于此,本文在各向异性扩散思想的基础上,改进了 g 的形式,并引入了结构分析和前后扩散方向局部判定的思想,以更好地完成去噪任务。

3 梯度增强扩散的算法思路分析

在对含有裂纹纹理的路面图像去噪的处理过程中,为了突出路面裂纹,需要增强的是裂纹纹理,而其他的油污、噪声等杂物则是需要抑制的对象。通过观察分析可知,对高速路面裂纹检测最关心和需要的裂纹纹理的梯度幅值总是大致分布在一个稳定的区间内,而图像中的噪声梯度幅值则呈现无规律散乱分布的特点。根据这一特征,通过预先获取的裂纹结构的梯度先验信息,可以确定扩散形式,通过迭代完成去噪处理。基于梯度增强扩散的裂纹纹理图像去噪算法主要的处理思路包括:(1)反映目标结构信息的扩散张量的引入;(2)局部正反向扩散思想的引入;(3)扩散形式的构建。下面将具体介绍这3个关键内容。

3.1 扩散张量

对于裂纹纹理图像,图像中的裂纹一般具有相似的结构,而这些裂纹方向具有较一致的倾斜方向,同一方向的裂纹线条具有相似的像素灰度分布。灰度变化最剧烈的方向就是梯度方向,其与线条的一致性方向垂直,因此通过分析由梯度向量构成的结构张量,进而得到裂纹结构的方向信息是非常可

行的设想。因此在对路面裂纹图像进行方向性的扩散去噪时,可以引入结构张量的分析,从而达到保存纹理信息的目的。Weickert 等^[4]在非线性扩散方程的基础上,引入了扩散张量,形成了另外一种非线性扩散方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}[D\nabla u] \\ u(x, y, 0) = u(x, y) \end{cases} \quad (2)$$

比较式(1)、式(2)可以看出,两种模型的扩散形式基本相同,只是扩散系数由标量 g 变成了矩阵型张量 D 。在计算矩阵型扩散张量 D 时,需要先计算局部结构张量 S_p :

$$S_p(\nabla u_\sigma) = G_p * (S_0(\nabla u_\sigma)) = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$u_\sigma(x, y, t) = (G_\sigma * u(\cdot, \cdot, t))(x, y)$, $\sigma > 0$, $S_0(\nabla u_\sigma) = \nabla u_\sigma \nabla u_\sigma^T$ 。由于 S_0 为正定矩阵,具有互相正交的特征向量 v_1, v_2 , 并有 $v_1 \perp \nabla u_\sigma, v_2 \parallel \nabla u_\sigma$, 结构张量 S_p 是该正定矩阵 S_0 与高斯函数卷积的结果。当满足 $s_{11} \neq s_{22}$ 时,结构张量 S_p 同样具有正交的特征向量 ω_1, ω_2 , 其对应的特征值为:

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2}(s_{11} + s_{22} \pm \alpha) \quad (4)$$

而扩散张量 D 的特征向量与 S_p 的特征向量相同,其特征值为:

$$\begin{aligned} d_1 &= \mu \\ d_2 &= \begin{cases} \mu, & \omega_1 = \omega_2 \\ \mu + (1-\mu)e^{-c/(\lambda_1 - \lambda_2)^2}, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, μ 为较小正数, c 为正常数,则扩散张量 D 可以表示为:

$$D = \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 & 0 \\ 0 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^T \\ \omega_2^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

3.2 局部正反向扩散思想

在裂纹纹理图像中,感兴趣目标裂纹的梯度幅值往往集中在某一特定区间,因此可以设想通过预先掌握的先验知识来统计目标裂纹梯度幅值的范围,并制定扩散策略。Gilboa 曾经提出了一种正反方向扩散的思想,当扩散系数为正值时,扩散方程的扩散能起到高斯卷积的效果,可用于去噪;当扩散系数为负值时,扩散方程的扩散对应于高斯去卷积,可用于锐化。因此扩散系数的取值可以通过判定梯度幅值来确定,梯度幅值小时可定义对应的扩散系数为正值,反之则为负值,这样即可达到既消除噪声又增强边缘的目的。扩散系数 g 定义为:

$$g(x) = \begin{cases} 1 - (x/k_1)^n, & 0 \leq x \leq k_1 \\ \alpha(((x-k_2)/w)^{2m} - 1), & k_2 - w \leq x \leq k_2 + w \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

式中, k_1, k_2, w, m, n 表示其中的参数,分别控制扩散去噪的方向和强度, x 表示图像某处的梯度幅值。根据这一思路,当梯度处于 $[0, k_1]$ 区间时,扩散系数为正值,图像被正向扩散进程控制,图像得到平滑处理;当梯度处于 $[k_2 - w, k_2 + w]$ 区间时,扩散系数为负值,图像被反向扩散进程控制,图像得到锐化处理;当梯度幅值大于 $k_2 + w$ 时,扩散系数为 0,不扩散。

这一思想的引入,将会更好地起到保留纹理信息的效果,并一定程度地增强了线条结构,为后续检测定位奠定了基础。

3.3 扩散形式的构建

由于扩散张量 D 和结构张量 S_p 的特征向量同为 ω_1, ω_2 , ω_1, ω_2 能够对裂纹的边缘方向进行定位, 因此能够保证扩散进程主要沿裂纹的梯度方向和边缘方向这两个互相垂直的方向进行。由于图像中一致性线条结构能够在小范围内保持稳定, 因此可将 ω_1, ω_2 在一定范围内取为常量, 根据式(2)和式(6), 可以得到扩散方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = d_1 \frac{\partial^2 u}{\partial \omega_1^2} + d_2 \frac{\partial^2 u}{\partial \omega_2^2} \quad (8)$$

式中, d_1, d_2 为扩散张量的特征值。观察式(8)可知, d_1, d_2 分别表示沿梯度方向和边缘方向的扩散强度。由式(5)可知, 在Weickert提出的增强扩散中, d_1 为固定常数, 仅仅 d_2 随局部线条结构的变化而变化, 这有可能会误增强噪声。为了避免这一情况的出现, 同时还要达到锐化线条纹理的目的, 需要把线条的梯度信息考虑进去, 并重新定义 d_1, d_2 。将局部正反向扩散思想融入其中, 假设线条结构的梯度处于 $[k_1, k_2]$ 内, 而梯度小于 k_1 和大于 k_2 的都认为是噪声, 则可以定义为:

$$d_1(x) = \begin{cases} 1 - (x/k_1)^n, & 0 \leq x \leq k_1 \\ (x/k_1)^n - 1, & k_1 < x < k_2 \\ \mu^2 + (1 - \mu)e^{-1/(\lambda_1 - \lambda_2)^2}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$d_2(x) = \begin{cases} 1 - (x/k_1)^n, & 0 \leq x \leq k_1 \\ \mu^2 + (1 - \mu)e^{-1/(\lambda_1 - \lambda_2)^2}, & k_1 < x < k_2 \\ \mu^2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

重新定义扩散强度后, 扩散方程不变, 扩散张量改进为 $D(x)$, 其表达式为:

$$D(x) = [\omega_1 \quad \omega_2] \begin{bmatrix} d_1(x) & 0 \\ 0 & d_2(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^T \\ \omega_2^T \end{bmatrix} \quad (11)$$

4 仿真实验分析

为了验证算法的正确性与有效性, 采用双核 2.4GHz, 内存 2GB 的普通 PC 机, 在 Matlab 平台对本课题组实验采集的一系列含有裂纹的路面图像进行去噪处理。应用本文算法需要预先设置参数, 算法应用到了高斯平滑, 因此首先需要设置高斯平滑中的 ρ, σ , 它们可以描述噪声的尺度和强弱, 较大的 ρ 能更好地增强线条结构, 但同时也可能形成虚假条纹; 较大的 σ 易造成图像模糊, 因此综合考虑多方面因素, 选取 $\rho = 0.75, \sigma = 0.25$ 。

在扩散形式中, $d_1(x), d_2(x)$ 中有 k_1, k_2, n, μ 共 4 个参数需要确定。经过先验判定, 这里选定 $k_1 = 10, k_2 = 16, n = 4, \mu = 0.02$ 。在进行数值迭代求解时, 根据扩散方程进行更新迭代, 设置时间步长 $\delta t = 0.15$, 迭代次数为 30。

为了表现算法在去噪上面的优越性以及同时保存裂纹纹理特征的能力, 同时对上述路面图像进行全局平滑滤波和全局中值滤波, 任选其中的两幅路面图像, 两幅图的处理结果对比如图 1、图 2 所示。

观察图 1 和图 2 的处理结果, 可以发现基于梯度增强扩散的去噪算法对裂纹纹理图像具有很好的去噪效果, 且可以保留裂纹纹理信息不被平滑, 为后续的检测定位做了很好的准备工作。

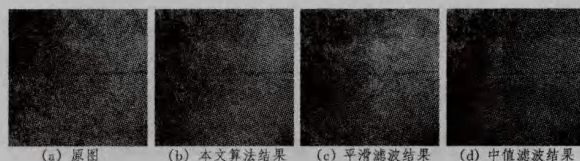


图 1 路面图 1 的去噪前后对比

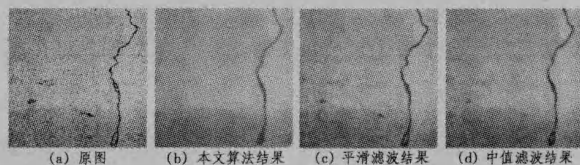


图 2 路面图 2 的去噪前后对比

为了定量地比较算法的优越性, 用峰值信噪比 (PSNR) 对处理结果进行分析, 如表 1 所列。

表 1 3 种去噪算法的峰值信噪比

图像	本文算法	全局平滑滤波	全局中值滤波
图 1	45.67	41.36	42.65
图 2	48.31	44.25	44.66

结果表明, 以峰值信噪比来衡量去噪能力, 本文算法也强于全局平滑滤波和全局中值滤波。

结束语 在考虑裂纹路面图像特点的基础上, 设计了一种基于梯度增强扩散的去噪算法。该算法能对图像进行局部特征分析, 采取相应的增强扩散策略, 在有效增强裂纹结构特征的同时能去除噪声, 为后期进行检测定位奠定了良好基础, 仿真实验表明, 该算法在处理该类图像上具有一定的有效性。

由于算法中的几个重要参数是凭借经验分析得到的, 因此如何根据图像自身的梯度分布自动确定关键参数, 提高算法适应性, 是今后研究的一个重要方向。

参考文献

- [1] 陈华丽, 刘康, 程耕国. 信号自适应去噪方法的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 344-348
- [2] 熊保平, 杜民. 基于 PDE 图像去噪方法[J]. 计算机应用, 2007, 27(8): 2025-2029
- [3] Zhao X L, Bo L G. New numerical algorithms for the nonlinear diffusion of image denoising and segmentation [J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 178: 380-389
- [4] Perona P, Malik J. Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7): 629-639
- [5] Weickert J. Coherence enhancing diffusion filtering[J]. International Journal of computer Vision, 1999, 31(2/3): 111-127
- [6] Osher S, Rudin L I. Feature-oriented image enhancement using shock filters. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1990(27): 919-940
- [7] 谢华英, 周海银. P-M 扩散与相干增强扩散相结合的抑制噪声方法[J]. 中国图像图形学报, 2005, 10(2): 158-163
- [8] 唐磊. 基于图像分析的路面病害自动检测[D]. 南京: 南京理工大学, 2007, 4: 3-4
- [9] 贾瑞芝, 任丽莎, 刘瑞华. 纹理保持的图像去噪[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2011, 25(11): 63-66