

曲率驱动与边缘停止相结合的非纹理图像修复^{*}

祝 轩¹ 周明全^{1,2} 耿国华¹ 王 蕾¹

(西北大学信息科学与技术学院 西安 710127)¹ (北京师范大学信息科学与技术学院 北京 100875)²

摘 要 根据等照度线曲率在图像表征中的重要意义,将曲率作为一个控制传导率的因素引入非线性扩散方程,提出将曲率驱动与边缘停止相结合的非线性扩散模型(C&E)应用于图像修复。该模型在实现热扩散的同时强调了保护小曲率和大梯度重要性,具有能够连接等照度线和强化边缘的作用。针对这一模型进一步讨论了其函数构造方法及其半点显示数值实现方案。实验结果表明 C&E 模型较经典的 Curvature-Driven Diffusions 方程在短时间内能更好地修复非纹理图像。

关键词 曲率驱动,边缘停止,非线性扩散,图像修补

Non-texture Inpainting by Combination of the Curvature-driven and Edge-stopping Nonlinear Diffusion

ZHU Xuan¹ ZHOU Ming-quan^{1,2} GENG Guo-hua¹ WANG Lei¹

(School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)¹

(College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)²

Abstract Considering importance of isophote curvatures for image representation, introduced curvature as a new control factor into the nonlinear diffusion equation to build a novel diffusion model, which combined curvature-driven with edge-stopping (C&E model). The C&E model realizes thermal diffusion, at the same time, the protection of little curvature and big gradient was emphasized. This model has two effects of connecting broken level sets and strengthening edge. The constructs of the curvature function and the edge function, as well as half-point numerical schemes, were further discussed. For image inpainting, C&E model exhibits better performance than curvature-driven diffusions (CDD) model.

Keywords Curvature-driven, Edge-stopping, Nonlinear diffusion, Image inpainting

1 引言

修复受损图像,一直是图像处理和计算机视觉研究中的重要课题之一。数字图像修复(Digital Inpainting)是根据图像中残留的信息,自动地恢复图像中遗失或损坏的信息,使修复后的图像接近或达到原始图像的视觉效果。计算机视觉理论认为,人类对图像中被遮挡物体的感知是根据图像中被遮挡物体周围环境所作的一个最佳猜测。随着对图像局部特征认识的深入,Sapiro 和 Caselles 指出图像中物体的形状信息取决于等照度线(isophote)的形态学特征^[1,2]。沿着这一思路,Bertalmio^[3]等人最早提出利用待修补区域的边缘信息,采用传播机制,估计等照度线的方向,进而将信息传播到待修补区的内部,也就是说扩散方法修复受损图像可以采用尽量延长图像中的等照度线(即图像的水平集),使等照度线自然地过渡到被污损区域内部,进而恢复被遮挡物体的形状。近年来基于扩散机制的图像修复在理论和实践两个方面均有大量的研究工作^[4,5],其中 Chan 等人提出的非纹理的曲率驱动修补模型(CDD)^[6]具有典型的代表意义,并被认为是目前较好的图像修复方法之一。

我们在文献[7]中考虑到等照度线的曲率作为一个二阶微分量是等照度线形态学特征的最重要的描述,因此将图像水平集的曲率作为一个控制因素显式地引入非线性扩散,建

立了一个曲率驱动和边缘停止相结合的三阶非线性扩散模型(简称 C&E 模型)并将其应用于图像平滑滤波,取得了好的平滑滤波效果。由于 C&E 模型在实现热扩散的同时强调了保护小曲率和大梯度重要性,满足扩散方法修复受损图像的要求。因此我们预期同时考虑了图像两个局部特征(梯度和曲率)的 C&E 模型能应用于非纹理图像修复并能使修复后的图像具有光滑的水平集和得到陡峭的边缘。文中通过实验对上述内容进行验证,结果表明提出的方法行之有效。

本文内容安排如下:第 2 节讨论 C&E 模型如何解决图像修复问题。第 3 节讨论解决图像修复问题的 C&E 模型的函数构造和数值实现方法。第 4 节给出若干实验结果。最后是结束语。

2 曲率驱动与边缘停止相结合的非线性扩散模型(C&E 模型)

我们知道自然图像中的物体所形成的等照度线(包括边缘)应该是足够光顺的曲线,即这些等照度线的曲率的绝对值 $|κ|$ 应该足够小。当图像受到污损后,图像的局部灰度值发生变化,这就必然导致等照度线的不连续。如记灰度图像 $u(x,y)$,则图像的水平集定义为 $X_λu = \{(x,y), u(x,y) = λ\}$,如图 1 所示(a)是原图,(b)是原图在 $λ=100, 180$ 时的水平集图,(c)是原图污损后的图像,(d)是污损图像在 $λ=100, 180$

^{*}国家自然科学基金资助项目(No. 60573179)。祝 轩 博士研究生,副教授,主要研究方向为图像/图形处理;周明全 教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为图像/图形处理、计算机视觉;耿国华 教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为数据挖掘、图像/图形处理。

时的水平集图。

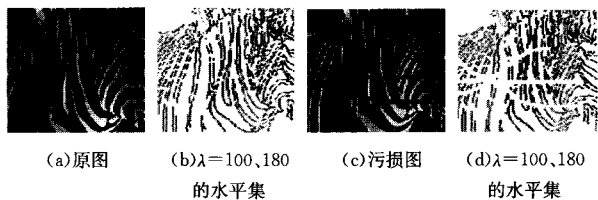


图1 图像及其水平集

正如图1所示,扩散方法修补一幅受到污损的图像应该考虑尽可能地使图像中断裂的水平集连接起来,并且突出较强边缘。

根据以上分析,图像修复中真正应该受到保护的是 $|\nabla u|$ 足够大,同时 $|\kappa|$ 足够小的等照度线。我们在文献[7]中提出的C&E模型

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(f(|\kappa|)g(|\nabla u|)\nabla u) \quad (1)$$

$$u(x, y, 0) = u_0(x, y)$$

满足以上两方面的要求,式中 $u_0(x, y)$ 是初始图像,传导率 D 由两个因子构成 $D = f(|\kappa|)g(|\nabla u|)$,其中 $g(\cdot)$ 称为边缘停止函数,原则上可以是任何一种单调递减函数,以保证 $|\nabla u| \rightarrow \infty$ 时 $g(|\nabla u|) \rightarrow 0$,这就使在 $|\nabla u|$ 足够大的图像局部有足够小的传导率,从而实现保护边缘的功能。而以曲率绝对值为变量的函数 $f(\cdot)$,原则上可以是任何满足 $f(0) = 0$ 的单调递增函数。这样在 $f(|\kappa|)$ 和 $g(|\nabla u|)$ 的共同作用下,图像中强烈并且光顺的边缘由于 $D \approx 0$ 将得到最好的保护,即使不太强($|\nabla u|$ 较小),但足够光顺的等照度线也能持续足够长的时间。反之,如果任何等照度线的局部具有大曲率,即使其梯度模值较大,也将迅速扩散。

C&E模型与CDD模型^[6]

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}\left(f(|\kappa|)\frac{\nabla u}{|\nabla u|}\right), x \in D \quad (2)$$

$$u = u_0, x \in D'$$

表面上看有相似之处,但存在以下重要区别:C&E模型是从非线性扩散的观点出发建立的,而CDD是从全变分(total variational)模型出发的;如果将式(2)中的 $\frac{1}{|\nabla u|}$ 看成式(1)中的 $g(|\nabla u|)$,这样就过分加强了小梯度模值在加快传导率中的作用,从而不利于稳定梯度小但很光顺的等照度线,同时在数学上也潜在分母为零的困难。

3 数值实现

在数值计算之前先要选定适合做图像修补的函数 $f(|\kappa|)$ 和 $g(|\nabla u|)$ 。对于 $f(|\kappa|)$ 的选择,以下几种函数形式均可:

$$f(|\kappa|) = |\kappa|^p, p=1, 2 \quad (3)$$

$$f(|\kappa|) = 1 - \exp\left\{-\left|\frac{\kappa}{\gamma}\right|^2\right\} \quad (4)$$

$$f(|\kappa|) = \begin{cases} \exp(|\kappa|), & |k| \geq 0 \\ 0, & |k| = 0 \end{cases} \quad (5)$$

试验表明,不同的 $f(|\kappa|)$ 对最终完成修补功能没有太大的影响,区别主要在于当取相同的 $|\kappa|$ 时, $f(\cdot)$ 的值不同,因此影响传导率 D 的大小,传导率 D 大则扩散快,图像修复的速度快。此外,式(4)中的参数 γ 可用来控制受保护的曲率范围(这与待修补区域的初始化有关)。本文实验采用的是式

(5)。

函数 $g(|\nabla u|)$ 的选择也不是唯一的,我们的实验中选用了

$$g(|\nabla u|) = \begin{cases} 1, & |\nabla u| = 0 \\ K/|\nabla u|, & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

参数 K 可用来控制受保护的梯度模值的范围。

修复过程是首先确定待修补的区域,其次对待修补区域进行随机初始化,最后利用模型(1)的离散化方案修复。具体采用如下半点显式方案实现:

$$u^{(n+1)} = u^{(n)} - \Delta t \nabla \cdot j^{(n)} \quad (7)$$

其中矢量 $j = -f(|\kappa|)g(|\nabla u|)\nabla u$,若将 j 写成 $j = (j^1, j^2)$,其中 j^1 为水平分量, j^2 为垂直分量,若以当前计算点为中心点 $(0, 0)$,则

$$\nabla \cdot j = \frac{j_{d,0}^1 - j_{-d,0}^1}{h} + \frac{j_{0,d}^2 - j_{0,-d}^2}{h} \quad (8)$$

其中 d 为网格长度, h 为两个网格点之间的距离。半点方案时取 $d=1/2, h=1$,如图2。这时要求计算半点梯度 $|\nabla u|$ 和半点曲率 κ 。

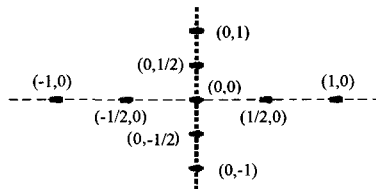


图2 半点网格

半点梯度 $|\nabla u|$,以求 $\nabla u_{(\frac{1}{2}, 0)}$ 为例:

$$\begin{aligned} \nabla u_{(\frac{1}{2}, 0)} &= \left(\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{(\frac{1}{2}, 0)}, \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{(\frac{1}{2}, 0)} \right) \\ &\approx \left(\frac{u_{(1,0)} - u_{(0,0)}}{1}, \frac{u_{(\frac{1}{2}, 1)} - u_{(\frac{1}{2}, -1)}}{2} \right) \\ &= \left(\frac{u_{(1,0)} - u_{(0,0)}}{1}, \frac{(u_{(0,1)} + u_{(1,1)}) - (u_{(0,-1)} + u_{(1,-1)})}{4} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

半点曲率 κ ,以求 $\kappa_{(\frac{1}{2}, 0)}$ 为例:

$$\begin{aligned} \kappa_{(\frac{1}{2}, 0)} &= \nabla \cdot \left[\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right]_{(\frac{1}{2}, 0)} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{u_x}{|\nabla u|} \right]_{(\frac{1}{2}, 0)} + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{u_y}{|\nabla u|} \right]_{(\frac{1}{2}, 0)} \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{u_x}{|\nabla u|} \right]_{(\frac{1}{2}, 0)}$ 和 $\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{u_y}{|\nabla u|} \right]_{(\frac{1}{2}, 0)}$ 的求法与(9)式相同,计算时涉及到的 $\left[\frac{u_x}{|\nabla u|} \right]_{(1,0)}$, $\left[\frac{u_y}{|\nabla u|} \right]_{(0,1)}$ 等值,采用中心差分计算。

4 实验结果

为了突显C&E模型连接等照度线(水平集)的能力,我们污损并截取了部分Lena图像,如图3(a)是污损Lena截图;(b)是(a)的等水平集图($\lambda=90, 150$);(c)是C&E方法修复(b)的结果;(d)是原始Lena图的等水平集图。

比较图3的(c)和(d)可以明显看出,C&E模型修复的水平集连接得很紧密(如眼部),很光顺,并且得到陡峭连续的边缘。

图4是C&E模型修复被“涂鸦”的照片。(c)图是迭代(下转第238页)

(下)所示结构,但并不影响 Bank 服务的应用。

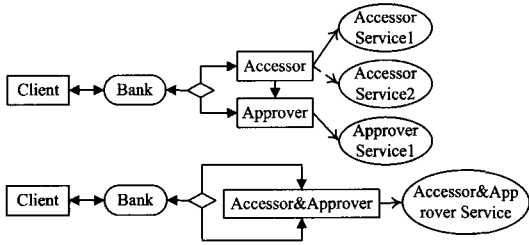


图 8 应用服务绑定的变化(上)和应用整体结构的变化(下)

结束语 本文通过分析现有的 Web 服务组合方式的种类和特点,讨论了多种服务组合方式在动态性和协作性方面的不足,进而提出了一种兼具动态性和协作性的服务组合方式。在此基础上结合 WS-CDL 和 BPEL 对此服务组合方式予以实现,并介绍了其原型支撑系统,最后通过一个客户贷款实例展示了其应用效果。当然,对照完整的 SOA 应用的需求,本文工作尚不全面,还有许多工作,尤其是关于状态、事务等特性的考虑需要进一步深入研究。

参考文献

[1] Web Service Definition Language (WSDL) Specification [EB/OL]. 2002. <http://www.w3.org/TR/wsdl>
 [2] World Wide Web Consortium W3C. Web Services Choreography

Description Language Version 1.0 (WS-CDL)
 [3] BEA Systems, IBM, Microsoft, SAP AG, and Siebel Systems. Business Process Execution Language for Web Services (BPEL4WS) Version1.1. 2003. <http://www.ibm.com/developerworks/library/ws-bpel/>
 [4] Fluegge M, Garcia dos Santos I J, Tizzo N P. Challenges and Techniques on the Road to Dynamically Compose Web Services // 6th International Conference on Web Engineering (ICWE). 2006
 [5] OWL-S1.1 Release [EB/OL]. <http://www.daml.org/services/owl-s/1.1/>
 [6] Pelz C. Web services orchestration and choreography. IEEE Computer, 2003, 36(8): 46-52
 [7] BPWS4J. <http://www.alphaworks.ibm.com/>
 [8] Bart O, Yang J, Papazoglou M P. A Framework for Business Rule Driven Web Service Composition // Jeusfeld M A, Pastor O, Eds. ER 2003 Workshops. LNCS 2814. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003: 52-64
 [9] Wu Dan, Sirin E, Hedler J. Automatic Web Services Composition Using SHOP2. [EB/OL]. <http://www.mindswap.org/papers/ICAPS03-SHOP2.pdf>
 [10] Sirin E, Parsia B, Wu Dan. HTN Planning for Web Service Composition Using [EB/OL]. <http://www.mindswap.org/papers/SHOP-JWS.pdf>
 [11] Mendling J, Hafner M. From Inter-Organizational Workflows to Process Execution: Generating BPEL from WS-CDL // Meersman R, Tari Z, Herrero P, eds. Proceedings of OTM 2005 Workshops, LNCS 3762. 2005: 506-515

(上接第 213 页)

500 次的结果, (d) 图是迭代 5000 次的结果。图示参数: $K=0.9$, 步长 $\Delta t=0.1$, N 是迭代次数。

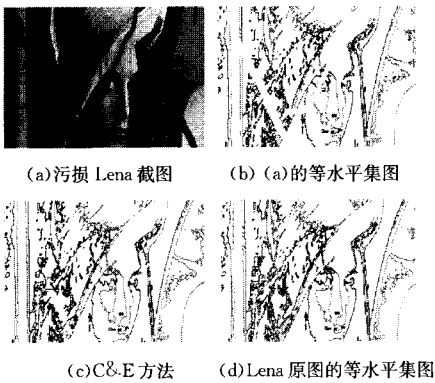


图 3 等水平集修复



图 4 C&E 方法修复被“涂鸦”的照片

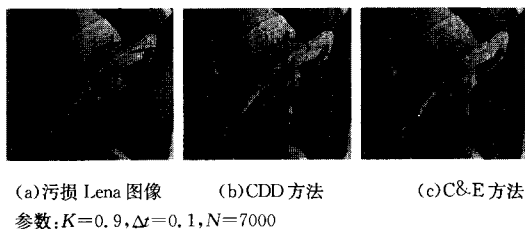


图 5 C&E 和 CDD 方法比较

接着,我们在相同的迭代次数下,对比了 C&E 和 CDD 方法,图 5(a)是带签字的 Lena 图像;(b)是 CDD 方程修复的

结果;(c)是 C&E 模型修复的结果。

值得指出的是,CDD 方法经过足够的迭代次数以后能得到在视觉上较图 5(b)稍好一些的修复效果,但最终效果不及 C&E 方法。

结束语 本文从图像形态学的观点出发,分析了等照度线曲率在控制图像修复中的重要性,提出了将曲率驱动与边缘停止相结合的非线性扩散模型(C&E 模型)应用于图像修复,并讨论了有关这一模型的构造和数值实现。由于 C&E 模型同时强调了保护小曲率和大梯度的重要性,实验结果表明其应用于非纹理数字图像修复性能良好。

参考文献

[1] Sapiro G, Caselles V. Histogram Modification via Differential Equations [J]. Journal of Differential Equations, 1997, 135(2): 238-268
 [2] Caselles V, et al. Shape Preserving Local Contrast Enhancement [C] // Proceedings of the 1997 International Conference on Image Processing (ICIP'97). Washington: IEEE Computer Society, 1997: 314-317
 [3] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting [C] // Proc. of the ACM SIGGRAPH 2000, New Orleans, USA, 2000 (7): 417-424
 [4] Fadili M J, Starck J L. Em algorithm for sparse representation-based image inpainting [J] // Proc. of the 2005 IEEE Int'l Conf. on Image Processing. 2005, 2: 61-64
 [5] Patwardhan K A, Sapiro G, Bertalmio M. Video Inpainting of Occluding and Occluded Objects [J] // Proc. IEEE ICIP'05. 2005, 2: 69-72
 [6] Chan T F, Shen J. Non-texture Inpainting by Curvature-driven Diffusions (CDD) [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12: 436-449
 [7] 祝轩, 周明全, 耿国华, 等. 一种新的三阶非线性扩散图像平滑方法及其算法实现 [J]. 计算机科学, 2007, 34(12): 227-230