

一种保持边缘线的图像修补技术

黄陈思, 曾超, 王美清

(福州大学数学与计算机科学学院, 福建 福州 350108)

摘要: 图像修补是对图像损毁区域进行适当修补以满足人眼视觉要求的一种技术. 对于边缘清晰的图像, 大部分基于偏微分方程修补模型的修复结果可能会造成边缘的模糊扩散或产生锯齿. 为此, 提出一种基于拟合和插值的边缘保持方法, 通过对边缘线预测保持后再用 TV 修复模型进行修补. 该算法实现速度快, 实验证明对边缘的修复效果较好.

关键词: 图像修补; 偏微分方程; 边缘保持; TV 修复模型

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Image inpainting technology based on edge-directed holding

HUANG Chen-si ZENG Chao WANG Mei-qing

(College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract Image inpainting is a technique which fills proper information into the breakages of an image so that it can satisfy the demands of human vision. For the images with clear edges, most PDE inpainting models would make edges blurry or saw tooth. In this paper a new edge-directed holding method is proposed based on approximation and interpolation. The method first estimates the edge information in the missing area and then inpainting the other area with TV model. The experiments show that the new method can improve the inpainting effect with rapid convergence.

Keywords image inpainting; PDE; edge-directed holding; TV model

1 引言

图像修补 (inpainting) 作为一项特殊的图像恢复技术, 在图像恢复、图像预处理等方面有着广泛的应用, 正在成为研究的热点. 图像修补主要应用于破损图像的恢复以及文字或物体等目标区域的移除, 主要有基于纹理的修复方法和基于非纹理的修复方法. 目前非纹理的修复模型大多基于偏微分方程 (partial differential equation, PDE) 或变分问题 (variational formulation). 文献 [1] 中, Bertalmio 等人将 PDE 方法应用于图像修复^[1], 该模型依据艺术家修补图片的方法, 沿图像等照度线方向将已知区域的信息传输到待修补区域. 由于等照度线之间无信息交互, 因此该模型还附加各向异性扩散过程来保证等照度线间信息交互以保持模型的稳定.

Chan 等人提出了一系列基于变分问题的图像修复模型, 其中最早提出的是总体变分 (total variation, TV) 模型^[2], 该模型通过求 BV 空间中的总体变分求最小值修复图像. 由于 TV 模型不满足连接性原则, 针对这个问题, Chan 等人又提出了曲率驱动扩散模型 (curvature driven diffusion, CDD)^[3], 但这两种模型在修复的图像中可能产生人为的角点. 通过进一步分析与曲率相关的 CDD 模型, Chan, Kang 和 Shen 结合 BSCB 模型又提出了欧拉弹性模型^[4], 但是该模型并不能很好地保持图像的角点. PDE 修复模型基于图像几何特征通过像素间差分实现扩散, 虽然模型具有较好的线性特征保持性能^[5], 但对于破损区域较大的图像, 修复结果会产生很大的失真^[6-7].

对于部分破损区域包含边缘线的图像, PDE 修复模型修复的结果不能很好地保持边缘的形状, 甚至会模糊边缘或在边缘处产生锯齿. 本文提出的在保持边缘的基础上进行修补的方法, 根据待修补区域周

收稿日期: 2008-01-08

作者简介: 黄陈思 (1979-), 女, 硕士研究生, 助教.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10771036); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划资助项目 (003393)

围的边缘信息计算目标区域内部的边缘信息, 再利用 TV 模型对目标区域进行修补. 实验结果表明, 该方法能较好地保持边缘信息, 并取得比较理想的修复效果.

2 TV 图像修复模型

TV 修复模型通过最小化图像的总变分来实现对图像的修补, 有着较好的数学理论基础. TV 修复模型^[2]为:

$$J_{\lambda}[u] = \int_{E \cup D} |\nabla u| \, dx \, dy + \frac{\lambda}{2} \int_E |u - u^0|^2 \, dx \, dy \tag{1}$$

其中: E 为待修补区域 (目标区域); D 为待修补区域周围信息已知的部分, 如图 1 所示. 模型 (1) 的前半部分是对 $E \cup D$ 区域的图像总变分求最优值, 后面一项是去除已知区域噪声. 模型 (1) 的最优解应满足 Euler-Lagrange 方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) + \lambda_c (u^0 - u) \tag{2}$$

当 $\nabla \cdot (\nabla u / |\nabla u|)$ 为 0 时模型达到稳定状态. 其中 $\nabla \cdot (\nabla u / |\nabla u|)$ 为像素点的曲率, 因而当式 (2) 达到稳定状态时, 曲率为零.

TV 修复模型的稳定性较好, 但由于等照度线的扩散结果在修补区域中最终趋向于曲率为零的直线, 因此修复后的目标区域会出现边缘连接形状不自然的情况.

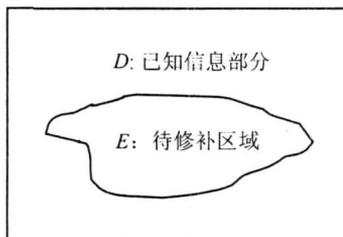


图 1 利用待修补区域 E 外部的信息 D 来修补 E

Fig. 1 Paint the missing domain E using the image information available outside

3 保持边缘线的图像修补

针对 TV 模型存在的问题, 提出对图像中目标区域的修补应该首先对边缘线进行修复, 即光滑地连接起目标区域周围断裂的边缘线, 然后再修补其他目标区域. 而目标区域的边缘线形状应该符合目标区域外部断裂的边缘线的几何特征, 并能自然地连接两端断裂的边缘线. 这样修复的结果才能最大限度地保留边缘特征, 并使得修复的图像看起来更自然. 根据这一思想, 所提出的保持边缘线算法首先检测出目标区域周围一定范围内的边缘线及它们的几何特征; 然后通过拟合和样条插值预测边缘线; 最后将边缘线作为已知信息, 用 TV 算法修复其他待修补区域.

3.1 确定边缘线位置

边缘线的预测包括确定边缘线的位置以及确定边缘线上各像素点的灰度值. 本文提出的算法首先确定目标区域边界上的边缘点, 然后将其作为初始点, 在已知区域通过搜索来确定边缘线. 在图像中边缘点的特征是它的邻域灰度值变化较大, 而非边缘点的邻域像素灰度值变化比较平坦. 因此可以通过设置阈值来区分目标区域边界上的边缘点. 如果该像素点的梯度比预置阈值大, 则归类为边缘像素点, 否则归类为非边缘像素点^[8]. 如图 2 所示, 假设某条断裂边缘线的一端在边界上的边缘像素点为 p , 而这条断裂边缘线的另一端在边界上的所对应的边缘像素点为 q .

以目标区域一侧的边缘点 p 为例, 如果 p 点位于目标区域上方, 则在一定范围内边缘线向已知区域延伸的方向只有水平、左上、右上、上方这几个方向, 如图 3 所示.

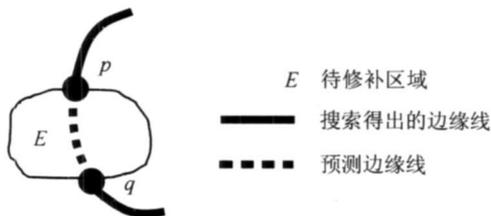


图 2 已知区域边缘线的确定以及目标区域边缘线预测示意图

Fig. 2 The establishment of the edges on available domain and the estimate of the edges on target domain

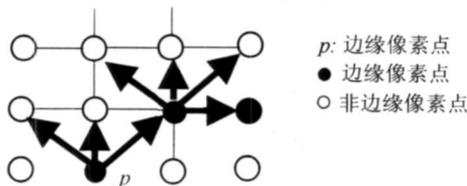


图 3 目标区域上方边缘搜索示意图

Fig. 3 The sketch map of searching the edges above target domain

另一方面, 由于目标区域边界上的边缘像素点可能有多个, 而相邻的边缘像素点像素值必然是有差别的, 因此当选择其中之一为起点开始向已知区域进行边缘线的搜索时应考虑到同一条边缘线上像素值的变化应该是平缓的. 基于以上的分析, 可以分别搜索到一定长度的断裂边缘线 $pp_1p_2 \dots p_m$ 以及 $qq_1q_2 \dots q_n$, 其中 $p_i, i=1, 2, \dots, m$ 为相邻像素点.

利用边缘线上各个像素点 $p_i, i=1, 2, \dots, m$ 的坐标位置获得 x 方向和 y 方向的拟合多项式函数 $x=x(t), y=y(t)$. 并利用拟合函数预测目标区域内部边缘线上等距离点的位置 $p_{-1}, p_{-2}, \dots, p_{-n}$. 同样, 可以得到另一方向边缘线的拟合函数在目标区域内部的延伸点 $q_{-1}, q_{-2}, \dots, q_{-n}$. 把目标区域内部的这些预测点与区域外部的边缘点做为插值节点进行三次样条插值, 可以得到目标区域内部一条连续的边缘线. 由于三次样条插值函数具有在插值节点上 1 阶、2 阶导数都连续的特点, 因此在目标区域内部近似边缘点形成的曲线可以光滑地连接起目标区域外部的两段边缘线.

3.2 区域内部边缘线像素值的求解

要进一步修复边缘, 还需要确定出边缘线上各个像素点的像素值. 由于边缘线上的像素值变化是平缓的且与已知区域上边缘线的像素值差别不大, 因此仍采用了拟合的方法来确定待修复区域内部边缘线的像素值.

3.3 修复图像

3.1 节和 3.2 节对边缘线的位置和亮度进行了计算和确定, 因此边缘线可以作为已知信息, 从掩码中去除, 得到新的掩码. 再利用 TV 修复模型对图像进行修复.

如果存在多条边缘, 则重复上述步骤计算出多条边缘线, 然后进行最后的修补.

综上所述, 提出的保持边缘线的图像修补方法处理过程如图 4 所示.

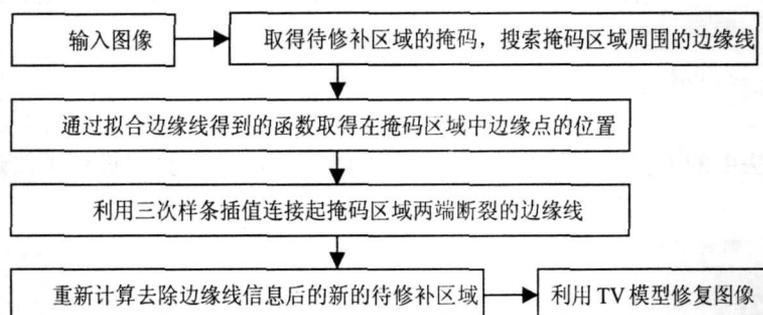


图 4 本文算法的处理过程

Fig. 4 Our proposed method

4 实验结果分析

数值实验采用 Matlab 代码完成, 分别对五边形、圆形和古瓷瓶以及人像图 4 组图像进行了实验. 实验结果如图 5~图 8 所示. 从图 5 和图 6 中可以看出, 由于 TV 修复模型的扩散结果在图像中形成直线, 因此对于缺失边缘部分的修复显得很不自然, 尤其对于较大区域的修复. 而本文算法由于事先修复了边缘, 因此总体修复效果较好.

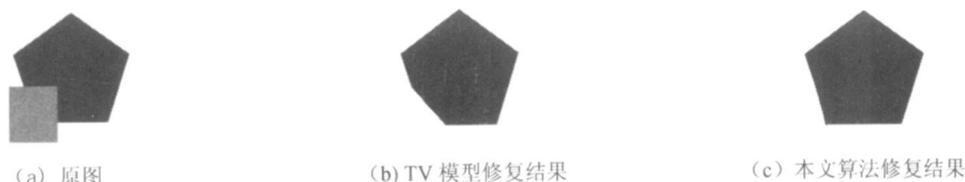


图 5 五边形图像修复

Fig. 5 Inpainting a pentagon



图 6 圆形图像修复

Fig 6 Inpainting a round

图 7 为对古瓷瓶进行的修复实验, 本文算法与 BSCB 模型、TV 模型进行比较, 可以很明显地看出, 在修补完边缘再进行 TV 修复的情况下, 目标区域与已知区域保持一致, 修补结果较好. 而 TV 模型修复后的轮廓与上下边缘的连接不够自然, BSCB 修复模型 1 000 次迭代后的结果呈扩散状态.

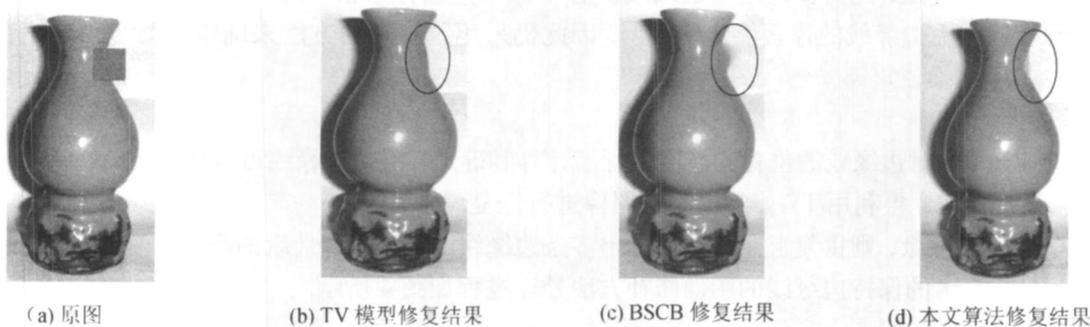


图 7 古瓷瓶修复

Fig 7 Inpainting a bottle

图 8 为对 CDD 算法中的人像图进行的修复, 虽然 CDD 算法对 TV 算法进行了改进, 但仍然未能较好地保持边缘线的特征.



图 8 人像图修复^[3]

Fig 8 Inpainting the "who stole my company"^[3]

5 结语

提出的边缘线保持修补算法, 实用且修复效果好, 能够较好地维持边缘形状, 基本上能够满足人的视觉系统对图像边缘的感知. 通过检测出待修复区域周围被破坏的边缘, 利用拟合与插值预测待修复区域中边缘线的近似位置以及亮度信息, 能够使得目标区域内部边缘线与外部断裂的边缘线实现光滑的连接, 在此基础上进行的修补能够很好地保持边缘形状. 对于边缘形状较为复杂的图像, 边缘线预测比较复杂, 该算法修复效果不够理想, 这也是今后继续研究的方向和重点.

(转第 813 页)

- [2] Hoprasert T. A statistical approach for real-time robust background subtraction and shadow detection[C] // IEEE ICV99 Frame-rate Workshop, 1999: 1-19.
- [3] Stauder J. Detection of moving cast shadows for object segmentation[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 1999, 1(1): 65-76.
- [4] 潘翔. 基于彩色信息和边缘特征的运动阴影检测[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(4): 389-391.
- [5] Martel-Brisson N, André Zaccarin. Moving cast shadow detection from a Gaussian mixture shadow model[C] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, IEEE, 2005: 643-648.
- [6] Nadin S, Bhanu B. Moving shadow detection using a physics-based approach[C] // Proc of Int'l Conference on Pattern Recognition [s.l]: IEEE, 2002: 701-704.
- [7] Cucchiara R, Grana C, Piccardi M. Improving shadow suppression in moving object detection with HSV color information[C] // Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Oakland, IEEE, 2001: 334-339.
- [8] 王华伟, 李翠华, 施华, 等. 基于 HSV 空间和一阶梯度的阴影剪除算法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 43(3): 43-44.
- [9] 李德毅, 杜鹞. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [10] 李众, 杨一栋. 一种新的基于二维云模型不确定性推理的智能控制器[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 866-877.
- [11] 林洪文, 涂丹, 李国辉. 基于统计背景模型的运动目标检测方法[J]. 计算机工程, 2003, 29(16): 97-99.
- [12] Haritaoglu I, Davis L S, Harwood D. W4Wh? When? Where? What? A real time system for detection and tracking people[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, Nara, IEEE, 1998: 222-227.
- [13] 郭建波, 周剑利, 韩鸿哲, 等. 背景差法中的阴影消除方法[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(1): 104-106.
- [14] Foley J D, VanDam A, Fisher S K, et al. Computer graphics: principles and practice[M]. [s.l]: Addison Wesley, 1990.
- [15] 陈柏生, 陈锻生. 基于归一化彩色模型的运动阴影检测[J]. 计算机应用, 2006, 26(8): 1879-1881.

(责任编辑: 杨青)

(接第 808 页)

参考文献:

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image inpainting[C] // Computer Graphics Processings, Annual Conference Series ACM SIGGRAPH, New Orleans, LA, 2000.
- [2] Chan T F, Shen J. Mathematical models for local nontexture inpaintings[J]. SIAM Journal on Applied Math, 2001, 62(3): 1019-1043.
- [3] Chan T F, Shen J. Non-texture inpainting by curvature-driven diffusions(CDD)[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 4(12): 436-449.
- [4] Chan T F, Kang S H, Shen J. Euler's elastica and curvature based inpainting[J]. SIAM Journal of Applied Mathematics, 2002, 63(2): 564-592.
- [5] 仵冀颖, 阮秋琦, 安高云. 偏微分方程约束下基于动态大小模块的图像修复模型[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(8): 1034-1040.
- [6] 邵肖伟, 刘政凯, 宋璧. 一种基于 TV 模型的自适应图像修复方法[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(2): 113-117.
- [7] 丁雯. 一类非线性扩散问题及其在图像修复中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(1): 153-156.
- [8] Kincaid D, Cheney W. Numerical analysis: mathematics of scientific computing[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2003: 349-387.

(责任编辑: 郑美莺)