

# 一种改进的基于样本的图像修复方法

何金海<sup>1</sup>, 李 薇<sup>1</sup>, 屈 磊<sup>1</sup>, 梁 栋<sup>1,2</sup>

(1. 安徽大学电子科学与技术学院, 合肥 230039; 2. 安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

**摘要:**分析了 Criminisi 等人提出的基于样本的图像修复算法, 针对其在计算修复块优先级时存在的一些不足, 提出一种改进的基于样本的图像修复方法, 通过基于 TV 模型的分解算法将待修复图像分解为结构图像和纹理图像, 利用结构图像来计算修复块的优先级, 使得优先级的计算更加准确。实验结果表明该方法对图像结构边缘的修复有明显的改善。

**关键词:** 图像修复; 图像分解; 纹理修复; 优先级

## Improved Method for Exemplar-based Image Inpainting

HE Jin-hai<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, QU Lei<sup>1</sup>, LIANG Dong<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic Science and Technology, Anhui University, Hefei 230039;  
2. Ministry of Education Key Lab of IC & SP, Anhui University, Hefei 230039)

**【Abstract】** The exemplar-based image inpainting algorithm, proposed by Criminisi and his partner, is analysed, in view of some deficiency in calculating the patch priority, an improved method for exemplar-based image inpainting is proposed. The original image is decomposed into structure part and texture part by TV-based decomposition algorithm, the patch priority is calculated by using the structure image, which makes the priority computation more precise. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves better results for structure-edge inpainting.

**【Key words】** image inpainting; image decomposition; texture inpainting; priority

### 1 概述

图像修复是图像处理领域的一个重要分支, 属于图像复原的研究领域。它是利用破损区域周围的已知信息, 按照一定的规则, 来修补图像中遗失或者损坏的部分, 以恢复原图像的完整性。图像修复也是当前计算机视觉领域的一个研究热点, 在文物保护、影视特技制作、虚拟现实、多余物体移除等领域有广泛的应用价值。

近年来出现了许多图像修复方法, 总体上来说, 可以分为基于结构的修复方法和基于纹理的修复方法。Bertalmio 等人于 2000 年提出了基于偏微分方程的数字图像修复算法<sup>[1]</sup>, 从而奠定了图像修复的基础。随后 Chan 等人提出了基于 TV(总体变分)模型的修复方法<sup>[2]</sup>, 以及由 TV 修复模型启发产生的 CDD(曲率驱动扩散)模型修复方法<sup>[3]</sup>。这些方法都是基于结构的修复方法, 通过信息的扩散来进行修复。

Criminisi 等人在 2003 年提出了一种基于样本的图像修复算法<sup>[4-5]</sup>, 它是基于纹理的修复方法, 借鉴了纹理生成方法中的思想来寻找样本区域并匹配复制, 同时充分利用了基于结构的修复方法中的扩散方式来定义修复块的优先级, 使得处在边缘附近(具有较多结构信息)的修复块具有较高的修复优先级, 从而在修复纹理信息的同时对结构信息也有一定的保持。但在实际应用中, 由于纹理等高频信息的影响, 使得对边缘的估计不够准确, 因此导致修复块的优先级顺序出现偏差。

Bertalmio 等人在 2003 年又提出了一种对结构和纹理同时进行修复的方法<sup>[6]</sup>。该算法主要包含 3 个关键步骤: 把图像分解为结构图像和纹理图像; 对结构图像部分使用基于结构的修复方法进行修复; 对纹理图像部分使用纹理合成的方

法进行修复。邵肖伟等人也提出了一种对结构和纹理分别进行修复的方法<sup>[7]</sup>, 它使用基于 TV 模型的图像分解算法将原图像分解为结构图像和纹理图像两部分, 对于结构部分的 Laplacian 场使用基于样本的方法修复, 然后通过 Poisson 方法重建, 以得到修复后的结构图像; 同时对纹理图像进行基于样本的修复, 合成后得到最终的修复结果。

本文在分析上述算法的基础上, 引入了基于 TV 模型的图像分解算法, 将待修复图像分解为结构图像和纹理图像, 利用包含强边缘等结构信息的结构图像来计算修复块的优先级, 以提高在边缘处修复块优先级计算的准确性, 从而提高了图像的修复质量。

### 2 基于样本的图像修复算法

Criminisi 等人提出的基于样本的图像修复算法<sup>[4-5]</sup>包含如下 3 个步骤:

(1) 计算修复块的优先级

优先级的计算方法是该算法的关键和特色所在。各种符号如图 1 所示, 整个图像看作由 2 个彼此相连的区域组成: 源区  $\phi$  和目标区域  $\Omega$ ;  $\delta\Omega$  表示待修复目标区域的边界。对于给定的中心在  $p$  点的修复块  $\mathcal{P}_p$  ( $p \in \delta\Omega$ ), 优先级  $P(p)$  定义

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60473102); 安徽省自然科学基金资助项目(070412065); 安徽省高等学校自然科学研究基金资助项目(2005KJ005ZD)

**作者简介:** 何金海(1983 -), 男, 硕士, 主研方向: 图像修复, 图像分割; 李 薇, 硕士; 屈 磊, 讲师、博士; 梁 栋, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2007-08-30 **E-mail:** hjh\_cx@163.com

为如下 2 项的乘积：

$$P(p) = C(p)D(p) \quad (1)$$

其中， $C(p)$ 和  $D(p)$ 分别称为置信度项和数据项，它们分别定义如下：

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap \Phi} C(q)}{|\Psi_p|}, \quad D(p) = \frac{|\nabla I_p^\perp \cdot \mathbf{n}_p|}{\alpha} \quad (2)$$

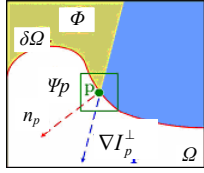


图 1 符号表

其中， $|\Psi_p|$ 为修复块  $\Psi_p$ 的面积； $\alpha$ 为标准化参数(对于典型的灰度图像  $\alpha = 255$ )； $\mathbf{n}_p$ 为在  $p$ 处与破损区域的边界垂直的单位向量； $\nabla I_p^\perp$ 为与梯度垂直的方向，即等照度线的方向。

### (2)搜索最佳匹配块并填充

当目标区域边界上所有修复块的优先级都计算完成后，找出具有最大优先级的修复块  $\Psi_p$ ，然后在源图像中搜索与之最佳匹配的填充块  $\Psi_q$ ，并把  $\Psi_q$ 中的数据拷贝到  $\Psi_p$ ，从而完成一个修复块的修复。

$\Psi_p$ 与  $\Psi_q$ 满足如下的关系：

$$\Psi_q = \arg \min_{q \in \Phi} d(\Psi_p, \Psi_q)$$

其中，距离函数  $d(\Psi_p, \Psi_q)$ 定义为 SSD(Sum of Squared Differences)。

### (3)更新置信度值

当具有最高优先级的修复块  $\Psi_p$ 被修复后，已修复的点的置信度  $C(p)$ 要更新为当前修复块中心点的置信度值，即

$$C(p) = C(\hat{p}) \quad \forall p \in \Psi_p \cap \Omega$$

重复上述 3 个步骤，直至修复所有的破损区域。

上述基于样本的图像修复算法，对一般的纹理图像会取得很好的修复效果；从式(2)中  $D(p)$ 的计算可以看出，它引入了基于结构的修复方法中的扩散方式来定义修复块的优先级，从而对图像中的结构信息也有一定的修复能力。但在实际的图像修复问题中，待修复区域往往包含多样化的信息，如果是一些结构信息与多种纹理并存，这些在结构边缘处存在的纹理信息就会影响到对结构边缘的估计，导致数据项  $D(p)$ 的计算不够准确，使得优先级的计算出现偏差，从而削弱了对线性结构的连接能力。

图 2 给出了使用该算法的一个修复实例，从修复的结果可以看出，由于在结构边缘的周围存在复杂的纹理信息，因此导致结构边缘没有被很好地修复。



图 2 Criminisi 算法修复实例

基于以上分析，为了排除纹理边缘对结构边缘带来的影响，本文引入了基于 TV 模型的分解算法，对基于样本的图像修复算法进行改进。下面将简单介绍基于 TV 模型的分解算法，并给出改进修复方法。

## 3 基于 TV 模型的图像分解算法

一般来说，图像可以理解为由结构和纹理两部分组成。其中结构信息代表了图像的整体变化，它是一种较大尺度下的描述，边缘等结构信息基本上仅包含在结构图像中；纹理信息代表图像局部的细节，通常由一些充斥着各种边缘的模式反复出现而组成。

本文使用 Vese 等人提出的图像分解算法<sup>[8]</sup>来分离结构图像和纹理图像。从本质上来说，它是一种基于 TV 模型实现的去噪算法，通过各向异性的扩散得到平滑的图像，以此作为结构图像，而待修复图像与结构图像之差即为纹理图像。

在基于 TV 模型的分解方法中，定义如下代价函数：

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

其中， $u_0$ 与  $u$ 分别为原图像与去噪后图像； $\lambda$ 为权重； $\Omega$ 为图像区域。上式中第 1 项保证去噪后图像尽可能的平滑，第 2 项则尽可能地维持去噪后与原图像的相似性。

$E(u)$ 取得极值所满足的 Euler-Lagrange 方程为

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

使用梯度下降法解此方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \operatorname{div} \left( \frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) - \lambda(u - u_0)$$

下面以 Lena 图片为例，给出了经 TV 分解后的结构图像和纹理图像，如图 3 所示。



图 3 Lena 图像的 TV 分解结果

从分解的结果可以看出，结构图像背景柔和，同时主要边缘清晰锐利；而一些复杂的细节信息则包含在了纹理图像中。这样一来，在本文的改进算法中利用结构图像来计算修复块的优先级，就在一定程度上降低了在结构边缘处各种纹理边缘带来的影响，从而提高了对修复块优先级计算的准确性。

## 4 改进算法

在基于样本的图像修复算法中，修复块优先级的计算是其关键所在，而优先级  $P(p)$ 由两部分组成：置信度项和数据项。置信度项  $C(p)$ 反映了当前待修复块中包含的可靠信息数量，可理解为修复块中包含已知图像点的个数，很方便处理，而且受其他因素的影响不大。而数据项  $D(p)$ 反映了当前点处所到达的等照度线的强弱，它是该算法的最关键所在。从式(2)也可以看出，数据项值与边缘方向估计的准确与否直接相关，对于原图像线性结构的保持至关重要。如果在图像结构边缘处充斥着很多纹理边缘，就会导致对结构边缘的估计不准确，从而会削弱该算法对线性结构的连接能力。

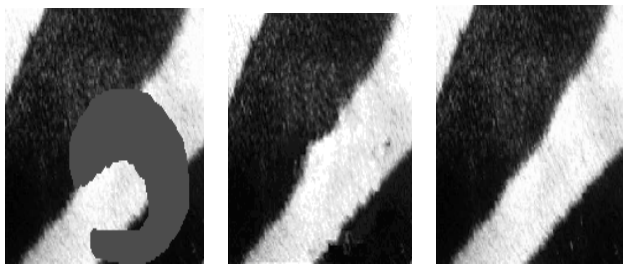
因此,本文考虑先利用基于 TV 模型的图像分解算法,将待修复图像分解为结构图像和纹理图像,在结构图像中,主要的边缘结构信息比较突出,而背景信息平滑柔和。这样,使用结构图像来计算修复块的优先级,就排除了纹理边缘等信息带来的干扰,因此可以提高优先级计算的准确性,从而可以明显改善修复的质量。

改进后的算法主要实现步骤如下:

- (1)确定破损区域的边界  $\delta\Omega$ ;
- (2)用基于 TV 模型的分解算法将原图像分解为结构图像和纹理图像两部分;
- (3)使用结构图像计算目标区域  $\Omega$  边界  $\delta\Omega$  上所有点的优先级  $P(p)$ ;
- (4)找出具有最大优先级的修复块  $\Psi_p$ ;
- (5)到源图像中搜索与当前待修复块  $\Psi_p$  最佳匹配的图像块  $\Psi_q$  并填充;
- (6)更新已修复点的置信度  $C(p)$ ;
- (7)重复上述步骤,直至完全修复。

## 5 实验结果及分析

使用本文改进方法对图 2(a)待修复图像进行修复,实验结果如图 4 所示,可见本文改进方法提高了对结构边缘的修复能力。从对比实验结果可以看出,通过引入基于 TV 模型的分解算法对待修复图像进行分解,利用分解出的结构图像来计算修复块的优先级,在一定程度上排除了纹理边缘对结构边缘带来的干扰,提高了优先级计算的准确性,从而提高了修复的效果。



(a)待修复图像 (b)Criminisi 算法修复结果 (c)本文算法修复结果

图 4 对比实验结果 1

图 5、图 6 为使用 Criminisi 算法和本文改进方法的另外两组对比实验,从实验结果可以看出,与 Criminisi 算法相比,使用本文的改进方法移除图像中的物体后,原有的线性结构都得到了较好的保持。



(a)待修复图像 (b)Criminisi 算法修复结果 (c)本文方法修复结果

图 5 对比实验结果 2



(a)待修复图像



(b)本文方法修复结果

(c)Criminisi 算法修复结果

图 6 对比实验结果 3

## 6 结束语

本文通过引入基于 TV 模型的图像分解算法,将待修复图像分解为结构图像和纹理图像 2 个部分,利用结构图像来计算修复块的优先级,在一定程度上避免了结构边缘处纹理边缘等信息带来的干扰,提高了优先级计算的准确性。从分析和实验结果可以看出,本文提出的改进算法提高了基于样本方法对结构边缘的修复能力。

## 参考文献

- [1] Bertalmio M, Sapiro G, Caselles V, et al. Image Inpainting[C]//Proc. of ACM Conf. Comp. on Graphics. New Orleans, LU, France: [s. n.], 2000: 417-424.
- [2] Chan T, Shen Jianhong. Mathematical Models for Local Nontexture Inpaintings[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics, 2002, 62(3): 1019-1043.
- [3] Chan T, Shen Jianhong. Non-texture Inpainting by Curvature-driven Diffusions(CDD)[J]. J. Visual Comm. Image Rep., 2001, 4(12): 436-449.
- [4] Criminisi A, Perez P, Toyama K. Object Removal by Exemplar-based Inpainting[C]//Proc. of Conf. on Comp. Vision Pattern Rec.. Madison, WI, USA: [s. n.], 2003.
- [5] Criminisi A, Perez P, Toyama K. Region Filling and Object Removal by Exemplar-based Image Inpainting[J]. IEEE Trans. of Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212.
- [6] Bertalmio M, Vese L, Sapiro J, et al. Simultaneous Structure and Texture Image Inpainting[J]. IEEE Trans. of Image Processing, 2003, 12(8): 882-889.
- [7] 邵肖伟, 刘政凯. 数字图像修复技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- [8] Vese L, Osher S. Modeling Textures with Total Variation Minimization and Oscillating Patterns in Image Processing[J]. Journal of Scientific Computing, 2003, 19(1-3): 553-572.