

文章编号:1001-9081(2010)05-1331-02

## 高可信度图像修复方法

汪 强, 邹北骥, 朱建凯

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

(courage007@163.com)

**摘 要:**在基于样例图像修复思想的基础上,从填充次序与目标块搜索两个方面进行改进,提出了一种图像修复方法。分析了 Criminisi 等人提出的修复算法,引入混淆系数来确定目标块的填充次序,以图像源区域中“有且只有一个”块与目标块相似来定义可信度,并优先填充可信度高的目标块。混淆系数的计算自然地将寻找高优先级目标块、搜索对应的匹配块两个过程统一,以避免误差累积。通过自然图像移除大面积物体的比较实验,表明算法适用于具有复杂背景的较大区域修复,视觉效果理想。

**关键词:**图像修复;纹理合成;优先权计算;混淆系数;样本匹配

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

## Improved exemplar-based image completion algorithm of high reliability

WANG Qiang, ZOU Bei-ji, ZHU Jian-kai

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** An image completion method based on the exiting exemplar-based image completion idea was proposed by improving the filling order and target patch matching process. The algorithm proposed by Criminisi was analyzed, and a new confusion measuring was used to establish the filling order of the target patch, which considered "having one and the only one" when computing the similarity within patches and filled the target patch with highest reliability. The process of computing confusion coefficient integrated selecting the highest priority target patch with searching the corresponding matching patch to avoid cumulative error. The experiments for large object removal on real images show that the proposed method can efficiently handle large regions of complex background by producing more plausible effect.

**Key words:** image completion; texture synthesis; priority computation; confusion coefficient; exemplars match

### 0 引言

图像修复利用图像中待修复区域周围已知像素的信息来填充待修复区域,使得整幅图像达到视觉上的连续和完整,是当前计算机图形学和计算机视觉的研究热点之一。

基于样本的(也称为基于纹理合成的)图像修复方法<sup>[1]</sup>是目前主流的方法,该方法有效地结合了偏微分方程和纹理合成的优点。这类方法一般分成三个步骤:1)通过计算面片填充的优先权确定目标块的填充次序,优先权最高的面片为当前面片;2)搜索当前面片的匹配差异最小的对应面片;3)更新当前面片及置信度。上述方法的步骤1)对结果影响最大,不同的面片优先权计算公式得到不同的填充次序,而填充次序直接决定修复结果的好坏。

由于填充次序的重要性,文献[1-4]均详细阐述了面片优先权定义。Criminisi 等人<sup>[1]</sup>提出以轮廓点的数据项与信任项的乘积作为优先权标准,使修复结果向线结构方向进行(以下简称 Criminisi 算法)。Jia 等人<sup>[2]</sup>提出用结构张量代替 Criminisi 算法数据项中的等辐照度线方向,以便能更好地反映图像局部变化的各向异性结构。Dror 等人<sup>[3]</sup>引入多分辨率思想,由粗到精逼近,基于信任度图来决定图像不同位置处局部的合成顺序。Sun 等人<sup>[4]</sup>引入用户交互来确定结构曲线,引导结构突出地方的合成顺序,取得很有说服力的效果。然而上述文献并没有完美地解决面片优先权自动计算的问题,例如其优先权考虑了面片本身的信息,如数据项、信任项等,

却没有考虑面片与已知区域的相互联系;并且步骤1)的优先权计算与步骤2)搜索相似块是完全分离的两个过程。带来的问题表现为:步骤1)计算得到的最高优先权的当前面片可能与相似块的最小匹配差异大于可接受的阈值,即当前面片在已知区域中搜索不到合适的相似块。也就是说,此面片的不确定性较高,容易造成误差累积。

为了克服上述工作的缺陷,需要将确定性最高的面片  $\psi_p$  作为当前面片  $\psi_q$  先填充,从而减小误差累积的可能性,使修补结果更可靠。然而面片  $\psi_p$  的确定性如何衡量?一般来说较合理的标准是:如果源区域中“有且只有一个”块与  $\psi_p$  相似,那么  $\psi_p$  的确定性是可信任的。由此可见,  $\psi_p$  的确定性程度与其局部属性如数据项等是无关的,完全取决于与已知区域中的所有面片  $\psi_q$  匹配差异的分布状况。

本文的主要思想是提出混淆系数来描述  $\psi_p$  与  $\psi_q$  匹配差异的分布状况,以此作为面片的确定性度量,并相应地提出可信度高的图像修复算法。算法以面片的确定性程度作为优先权,摒弃了以面片局部信息来计算优先权的思想,并将以 Criminisi 算法为代表的步骤1)和2)两个过程统一,从而确定当前面片时就找到已知区域中对应的相似块,算法逻辑上更简洁。

### 1 Criminisi 算法简介

设整幅图像  $I$  的待修复区域为  $\Omega$  (也称为目标区域),其边界为  $\partial\Omega$ , 已知区域为  $\Phi$ , 则  $\Phi = I - \Omega$ , 目标区域内沿轮廓

收稿日期:2009-11-12;修回日期:2009-12-25。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60970098)。

**作者简介:**汪强(1977-),男,湖南长沙人,讲师,博士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别; 邹北骥(1961-),男,江西南昌人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:计算机图形学、计算机视觉、数字图像处理; 朱建凯(1965-),男,湖南长沙人,副教授,博士研究生,主要研究方向:网络响应、大型数据库应用软件开发、计算机图形学。

线的方形面片为  $\psi_p, p \in \partial\Omega$ 。

重复以下3个步骤直到目标区域  $\Omega$  为空为止:

- 1) 计算边界  $\partial\Omega$  的优先权, 选出最大优先权的当前面片  $\psi_p$ ;
- 2) 在已知区域  $\Phi$  中搜索与  $\psi_p$  匹配差异最小的面片  $\psi_q$ ;
- 3) 以  $\psi_q$  的内容来填充  $\psi_p$ , 并更新置信度  $C(p)$ ;

## 2 本文算法介绍

### 2.1 优先权函数的定义

对于边界  $\partial\Omega$  上的面片  $\psi_p$ , 计算  $\psi_p$  与  $\Phi$  中面片  $\psi_q$  的匹配误差  $Dist(\psi_p, \psi_q)$ , 将差异最小值以升序排列, 并设  $Dist_i (i = 1, 2, 3)$  分别为序列前3位的差异最小值, 定义其优先权为:

$$P(p) = Dist_1 \cdot C_{confuse} / C(p) \quad (1)$$

其中:  $Dist_1$  为  $\psi_p$  匹配差异最小的面片  $\psi_q$  的差异值;  $C_{confuse}$  为混淆系数;  $C(p)$  为信任项。它们分别定义为:

$$Dist_1 = \min(Dist(\psi_p, \psi_q)) \quad (2)$$

$$C_{confuse} = k_1 \cdot (Dist_1 / Dist_2) + k_2 \cdot (Dist_1 / Dist_3) \quad (3)$$

$$C(p) = \left( \sum_{q \in \psi_p \cap \partial\Omega} C(q) \right) / |\psi_p| \quad (4)$$

其中:  $C_{confuse} \in (0, 1)$ ;  $k_1 = 0.7$ ;  $k_2 = 0.3$ 。信任项的定义与文献[1]相同,  $C(q)$  表示模块内像表点的置信度, 初始化时, 位于目标区域的每一个点的值为0, 已知区域值为1;  $|\psi_p|$  为模块  $p$  的面积。

优先权的解释为: 式(2)  $Dist_1$  度量的是  $\psi_p, \psi_q$  的匹配差异, 此值越小, 表示  $\psi_q$  中“有一个面片”与  $\psi_p$  越相似; 式(3)  $C_{confuse}$  度量的是  $Dist(\psi_p, \psi_q)$  的分布状况, 此值越小, 表示最优匹配块越优于次优匹配块, 即“只有一个面片”与  $\psi_p$  相似。若式(2)、式(3)乘积小, 表示源区域中“有且只有一个”块与  $\psi_p$  相似, 即  $\psi_p$  的确定性高。式(4)中  $C(p)$  含义为优先填充那些含已填充像素较多部分的模块, 因为这样可以依赖更多的已知像素。三者相互制约, 共同构成优先权。

优先权的特点是强调“只有一个”, 能很好地区分“有多个”的情况: 例如某一  $\psi_p$  能在已知区域中找到几个匹配差异值相当接近的  $\psi_q$ , 由于差异接近, 所以使用最优匹配块填充的结果不会明显优先使用次优块。这就表明此面片不确定性高, 最好搁置延迟处理。而混淆系数  $C_{confuse}$  会降低这种类型面片的优先级。也就是说, 混淆系数对“有多个”是排斥的。相比较文献[1-3]仅使用面片本身的如等辐照度线、结构张量、梯度等信息, 没有考虑、也无法区分“有多个”的情况。并且此优先权的计算过程明确, 易于理解、操作, 相比 Komodakis 等人[6]对混淆集的定义, 不需要预先设定阈值, 减少了人工参与的程度。

考虑到计算量的因素, 对每一个轮廓点上的面片计算优先权是困难的。因此首先选择三个可能性最高的面片, 以式(1)计算其优先权, 值最小的为当前面片。这里为了方便与 Criminisi 算法的结果进行比较, 使用其优先权作为3个候选面片的选择标准。然而即便这样处理, 其增加的计算量依然过大, 因为遍历已知区域进行匹配的过程是 Criminisi 算法中最耗时的操作。如果算法强制要求候选面片之间的距离略大于面片尺寸, 避免更新目标面片时覆盖次优面片, 那么此次优面片的优先权依然有效; 如果下一次迭代过程中某一次优面片被选为当前面片, 那么无需重复计算其优先权, 可以减少一定的计算量。

### 2.2 算法流程

重复以下三个步骤直到目标区域  $\Omega$  为空为止:

- 1) 类似 Criminisi 算法计算边界  $\partial\Omega$  的面片优先权, 选出前3位差异值最小的  $\psi_{pi}$  为候选面片;

2) 以式(1)计算  $\psi_{pi}$  优先权, 同时得到  $\psi_q$ ;

3) 以  $\psi_q$  的内容来填充  $\psi_p$ , 并更新置信度  $C(p)$ 。

由此可见, 本文着眼于改善目标块的填充次序, 将 Criminisi 算法中寻找合适目标块、搜索对应的匹配块两个过程统一, 对算法整体上进行了重组, 算法结构明显区别于原算法。

## 3 实验结果分析与比较

为了比较算法的性能, 在步骤1)进行候选面片选择, 在步骤2)以式(2)计算匹配差异时采用与 Criminisi 算法相同的公式, 步骤3)则完全相同。

### 3.1 实验效果分析

下面为自然图像大面积物体移除实验, 比较本文方法与 Criminisi 算法、Hays 算法[5]修复效果。图1(a)中掩码覆盖区域包括灌木、草坪、道路三种纹理, 要求修复算法有较强的适应性, 且人们很容易看出纹理区域之间过渡是否合理, 所以此图修复的难度较高。可以看出, Criminisi 算法结果在灌木、道路区域出现容易察觉的痕迹; Hays 算法结果真实感欠佳; 而本文结果中灌木、草坪、道路纹理繁殖在各自的区域内, 效果明显优于上两种结果。图2(a)中掩码覆盖范围大, 包括灌木和杂草, 其尺寸为  $800 \times 600$  像素, 算法中面片大小为  $9 \times 9$ , 算法共迭代4737次。图2(a)由于迭代次数巨大, 容易造成误差累积, 所以能反映贪婪算法的健壮性。Hays 算法结果在接缝处真实感较差; Criminisi 算法结果仅生长较为模糊的杂草区域; 而本文结果中灌木和杂草的比例与已知区域接近, 效果较优。此外, 本文方法不受待修补区域大小、数目的限制, 同样适用于划痕和文字去除等未知信息较少的情况。

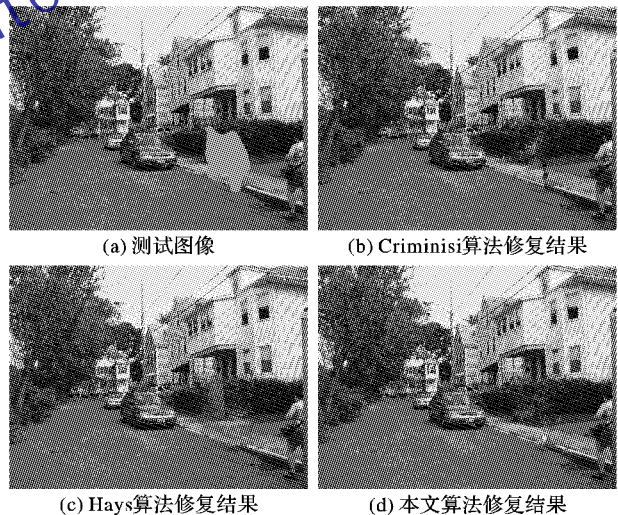


图1 图像1的修复效果比较

### 3.2 时间复杂度分析

设图像  $I$  的已知区域中有  $n$  个非修复面片 (也称为源面片), 修复过程中一共进行了  $r$  次迭代, 即修复了  $r$  个目标面片, 面片大小为  $9 \times 9$ , 则 Criminisi 算法的时间复杂度  $O_1 = r \times 9n$ 。本文方法由于首先选择3个候选面片, 再进行3次全局搜索来计算最小匹配差异以及混淆系数, 考虑到全局搜索几乎占据所有的计算资源, 所以本文方法大约会增加2倍计算量。若限定候选面片之间的距离略大于面片尺寸, 则剩余的2个候选面片不会由于本次迭代的填充而改变。剩余候选面片很可能在以后的迭代中再次成为候选面片, 因此对其记录, 有可能避免再次进行费时的全局搜索。假设剩余候选面片再次成为候选面片的概率为  $c$ , 则本文的  $O_2 = (3 - 2c) \times r \times 9n$ 。

(下转第1401页)



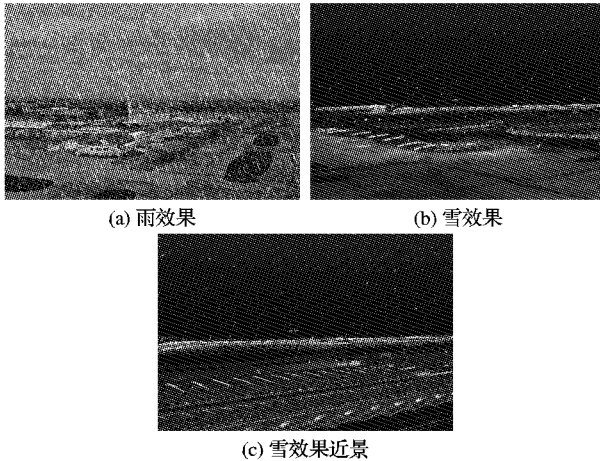


图3 大规模场景实时仿真截图

#### 4 结语

本文在GPU中重复使用消亡粒子在视点坐标系内生成新粒子,通过Geometry Shader将粒子的点坐标转换为矩形坐标进行绘制,提高了GPU运算效率,使之能快速批量地绘制出多边形,进一步将CPU从复杂庞大的几何运算中解放出来,

(上接第1332页)

原方法的时间复杂度仅在系数上有所区别,因此本文用实验数据进一步说明,如表1所示,其中运行时间以分钟为单位。对比表1中本文方法与Criminisi算法的运行时间,可算出图1的 $c$ 值为0.89。在多次实验中发现 $c$ 值的范围大约为0.8~0.9,所以本文算法的总计算量比Criminisi算法大约多20%~30%,而不是二倍。该实验在PIV 2.0 GHz CPU, 2 GB内存的PC机上运行,采用C#作为开发环境。

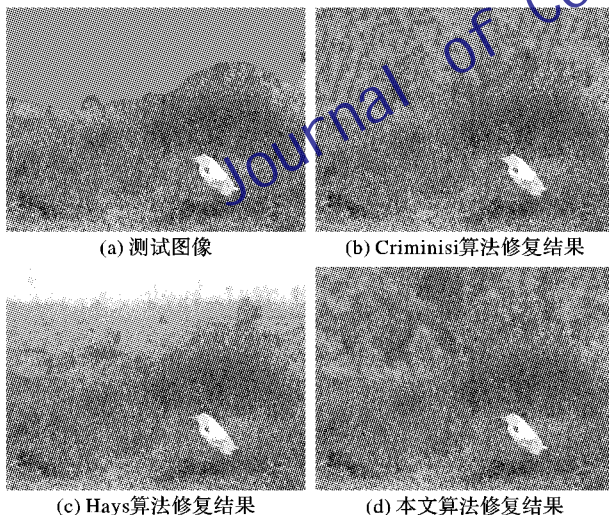


图2 图像2的修复效果比较

表1 Criminisi算法与本文方法运行时间比较

图像	像素个数	Criminisi 算法 运行时间/min	本文方法 运行时间/min
图1	800 × 600	1 260	1 541
图2	800 × 600	8 155	10 455

#### 4 结语

基于以Criminisi算法为代表的算法的优势与不足,本文摒弃使用轮廓点附近的信息定义优先权的方法,提出一种新的思路,以源区域中“有且只有一个”面片与目标面片相似作

对大规模场景的实时模拟效率显著提升,达到了较好的效果。本文的方法在视点移动时粒子的运动未考虑视点运动带来的影响,导致的模拟的效果略显不真实,今后还需进一步改进。

#### 参考文献:

- [1] REEVES W T. Particle systems-a technique for modeling a class of fuzzy objects[J]. Computer Graphics, 1983, 17(3): 359-376.
- [2] 谢剑斌,郝建新,蔡宣平,等. 基于粒子系统的雨点和雪花降落模拟生成[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4(9): 734-738.
- [3] 罗维佳,都金康,谢顺平. 基于粒子系统的三维场地降雨实时模拟[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 495-500.
- [4] van der BURG J. Building an advanced particle system [J]. Game Developer Magazine, 2000, 3(2): 44-50.
- [5] 李建明,吴云龙,何荣盛,等. 基于粒子系统和GPU加速的喷泉实时仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(10): 3139-3141.
- [6] LINDHOLM E. A user-programmable vertex engine[C]// Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 2001: 149-158.
- [7] LATTI L. Game developers conference: Building a million particle system[C]// Proceedings of the Game Developers Conference. San Francisco: Think Services Game Group, 2004: 54-60.

为优先权度量,使得面片的优先权由其确定性度量,而不依赖于其局部信息。同时算法中混淆系数的计算,使得目标面片的优先权计算与匹配相结合,算法整体框架不同于类似算法,而且计算量增加的比例不大。实验结果证明了此方法的合理性,且视觉效果更自然,提高了修复图像的质量。由于算法固有的贪婪性,以及采样填充的纹理合成方法本身的特点,该类方法对于遮挡或缺乏自相似性的复杂自然图像的修补仍然遇到困难,还需要更多的先验知识的约束或者图像结构的其他描述手段。

#### 参考文献:

- [1] CRIMINISI A, PREZ P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(9): 1200-1212.
- [2] JIA J, TANG C-K. Image repairing: Robust image synthesis by adaptive ND tensor voting [C]// Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Press, 2003: 643-650.
- [3] DRORI I, COHEN-OR D, YESHURUN H. Fragment-based image completion [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 303-312.
- [4] SUN JIAN, YUAN LU, JIA JIAYA, et al. Image completion with structure propagation [C]// ACM SIGGRAPH 2005: International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2005: 861-868.
- [5] HAYS J, EFROS A A. Scene completion using millions of photographs [C]// ACM SIGGRAPH 2007: International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2007: 4.
- [6] KOMODAKIS N. Image completion using global optimization [C]// Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 442-452.
- [7] ZHANG YUNJUN, XIAO JIANGJIAN, SHAH M. Region completion in a single image [C]// EUROGRAPHICS 2004. Grenoble, France: [s. n.], 2004 [2009-08-22]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.9.4626&rep=rep1&type=pdf>.